



UNCUYO
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE CUYO

FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS

TESIS DE DOCTORADO

DOCTORADO EN GEOGRAFÍA

EFFECTOS DEL CAMBIO CLIMATICO EN LA DINÁMICA DE
FORMACIONES VEGETACIONALES EN LA ZONA
CENTRAL Y CENTRO SUR DE CHILE

Nombre del tesista: Fabiola Alejandra Barrenechea Riveros

Nombre del director: Dr. Raúl Alejandro Mikkan

Mendoza, 2023

AGRADECIMIENTOS

La vida siempre me ha empujado de una u otra forma, a estar donde debo estar y a finalizar los procesos y proyectos que inicio, aunque a veces, las fuerzas escasean y el camino se ponga cuesta arriba. En este sentido, agradezco a mis padres, quienes siempre confiaron en mí. A mi padre Fernando Barrenechea, que desde alguna parte en el universo me sigue animando y dando energías. A mi madre María Luisa Riveros, quien ha sido un ejemplo a seguir y gracias a quien hoy soy lo que soy. Sin ellos, nada de esto sería posible.

A mi hija Emilia Laucirica, quien ha tenido la paciencia para entender que no siempre pude estar con ella el tiempo que hubiese querido, por estar trabajando en este proyecto. Tú sabes que te amo con toda mi alma hija querida.

Gracias a ti también mi amor, Claudio Santos, mi marido, mi compañero, que siempre me has apoyado a pesar de los difíciles momentos que hemos tenido que vivir juntos. Gracias por empujarme con todo cuando te conté que quería hacer un doctorado y por siempre apoyarme en el camino de la vida, el estudio y superación profesional.

Gracias a mis amigas Gloria y Andrea, quienes han sido leales confidentes y compañeras de vida, con una paciencia infinita a mi ingratitud involuntaria. ¡Las quiero mucho!

Y por supuesto, gracias infinitas a mi director de tesis Raúl Mikkan, quien me abrió la posibilidad de realizar este doctorado, con plena confianza en mí.

INDICE DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN	21
CAPITULO I: Antecedentes climáticos que inciden en la vegetación nativa	25
1.1 Cambio Climático: concepto y tendencias observadas	25
1.2 Cambio climático en Chile	30
1.3 Biomasa y productividad primaria neta (NPP)	33
1.4 Herramientas de teledetección: sensores remotos de Vegetación	36
CAPÍTULO II: Distribución de las formaciones vegetacionales nativas susceptibles al Cambio Climático	39
2.1 Área de Estudio	39
2.2 Clima de Chile Central y Zona Centro Sur	40
2.2 El bosque Esclerófilo y Nativo de Chile Central	41
2.4 Materiales y Métodos	48
2.4 Análisis de resultados	49
CAPITULO III: Clima de Chile Central y comportamiento de la temperatura y precipitaciones en un régimen temporal de 35 años	55
3.1 Clasificación climática de Chile Central	55
3.2 Materiales y Métodos	57
3.3. Temperatura y precipitaciones	58

3.3.1 Variación temporal de la temperatura	58
3.3.1.1 Estación de Verano	59
3.3.1.2 Estación de Otoño	72
3.3.1.3 Estación de Invierno	85
3.3.1.4 Estación de Primavera	97
3.4 Discusión de Resultados	121
CAPITULO IV: Estatus y productividad de la vegetación Nativa	126
4.1 Balance de la Superficie de Bosque Nativo	126
4.2 Materiales y Métodos	127
4.3. Análisis de resultados	133
CONCLUSIONES	155
BIBLIOGRAFIA	161
ANEXO 1: Procesamiento de imágenes	168
ANEXO 2: Datos Meteorológicos	176

INDICE DE FIGURAS

- Figura 1: Cambios de temperatura proyectados para principios y finales del siglo XXI con respecto al periodo 1980–1999. Los paneles central y el derecho muestran el promedio de las proyecciones multimodelos MCGAO para los escenarios IE-EE I B1 (arriba), A1B (en el medio) y A2 (abajo) promediados en los decenios 2020–2029 (centro) y 2090–2099 (derecha). Los paneles a la izquierda muestran las incertidumbres correspondientes como probabilidades relativas del calentamiento medio mundial estimado en varios estudios de MCGAOs y del Modelo del Sistema Terrestre de Complejidad Intermedia para los mismos periodos. Algunos estudios solo presentan los resultados de un subconjunto de escenarios del IE-EE, o de varias versiones de los modelos. Por tanto, la diferencia en el número de curvas mostradas en los paneles de la izquierda sólo se debe a diferencias en la disponibilidad de los resultados. Fuente IPCC, 2019. 28
- Figura 2: Mapa de ubicación del área de estudio. Fuente: elaboración propia. 39
- Figura 3 y 4: especie de bosque esclerófilo. Fuente: elaboración propia, Fundación Terraca 41
- Figura 5: Perfil longitudinal zona central de Chile. Se pueden apreciar las cuatro principales formaciones geomorfológicas: planicies litorales, donde se ubican los principales balnearios de la zona; Cordillera de la Costa, donde las altitudes pueden alcanzar casi los 3.000 m.s.n.m.; Depresión Intermedia generada por los depósitos aluviales y coluviales provenientes de ambas cordilleras; y la Cordillera de Los Andes, donde se superan los 5.000 m.s.n.m. Fuente: <https://fdocuments.ec/reader/full/perfiles-topograficos>. 50
- Figura 6: Pisos vegetacionales de Luebert y Pliscoff 2017. Elaboración propia con datos obtenidos en IDE Chile, www.ide.cl. 51
- Figura 7: Bosque Esclerófilo del Parque Nacional La Campana, en la Cordillera de la Costa de la Región de Valparaíso, con especies como peumo (*Cryptocaria alba*), quillay (*Quillaja saponaria*) y litre (*Lithraea caustica*), sobre cordones del batolito costero formado por rocas volcanosedimentarias, con presencia de granito, dioritas y granodioritas. 52
- Figura 8: Bosque Esclerófilo de la Reserva Nacional Ñuble, asociados a Bosques Templados Higromórficos, localizados en la precordillera y cordillera andina de la Región de Ñuble, con especies como el roble (*Nothofagus obliqua*), ciprés (*Austrocedrus chilensis*) y raulí (*Nothofagus alpina*), sobre cordones montañosos de rocas volcánicas y volcanoclásticas del Mioceno con presencia de andesitas, basaltos y dacitas. Fuente: CONAF, 1997 52
- Figura 9: Tipos forestales de la zona centro y centro-sur de Chile. A: Región de Valparaíso, se puede observar que predomina el bosque de tipo esclerófilo. B: Región del Maule, se observa una predominancia de Roble, Hualo, Raulí y Coihue. C: Regiones de Ñuble y Biobío, se observa la misma predominancia que en la región del Maule. Fuente: elaboración propia con datos de CONAF años 2015 – 2017. 54
- Figura 10: mapas climáticos del área de estudio. A, Región de Valparaíso, se destaca el clima de tundra de lluvia invernal en la zona cordillerana y el clima mediterráneo de lluvia invernal en la zona de secano costero, B, región del Maule donde predomina el clima mediterráneo y templado de lluvia invernal en valles y cordillera; C, regiones de Ñuble y Biobío, donde predominan los mismo tipos de clima y se suma en la región del Biobío el clima templado lluvia con leve sequedad estival, siendo esta zona la que presenta mayor abundancia en las precipitaciones. Fuente: elaboración propia con datos de IDE Chile, www.ide.cl. 55
- Figura 11: Distribución espacial de la variación de temperatura máxima en la Región de Valparaíso, donde A corresponde al promedio de las temperaturas máximas de verano entre 1985 – 1989; B corresponde al promedio de las temperaturas máximas de verano entre 1990 – 1999; C corresponde al promedio de las temperaturas máximas de verano entre 2000 – 2009 y D corresponde al promedio

de las temperaturas máximas de verano entre 2010 – 2020. Las estaciones corresponden a: 1 Río Juncal en Juncal Dga; 2 Canal Colorado en Bocatoma Dga; 3 Alicahue (DGA); 4 Vilcuya DGA; 5 Quillota DGA; 6 Los Aromos DGA; 7 Lago Peñuelas DGA; 8 Lliu-Lliu Embalse DGA; 9 Río Aconcagua en Chacabucuito DGA y, 10 Portillo DGA. Fuente: Elaboración propia. 60

Figura 12: Distribución espacial de la variación de temperatura mínima en la Región de Valparaíso, donde A corresponde al promedio de las temperaturas mínima de verano entre 1985 – 1989; B corresponde al promedio de las temperaturas mínima de verano entre 1990 – 1999; C corresponde al promedio de las temperaturas mínima de verano entre 2000 – 2009 y D corresponde al promedio de las temperaturas mínima de verano entre 2010 – 2020. Las estaciones corresponden a: 1 Río Juncal en Juncal Dga; 2 Canal Colorado en Bocatoma Dga; 3 Alicahue (DGA); 4 Vilcuya DGA; 5 Quillota DGA; 6 Los Aromos DGA; 7 Lago Peñuelas DGA; 8 Lliu-Lliu Embalse DGA; 9 Río Aconcagua en Chacabucuito DGA y, 10 Portillo DGA. Fuente: Elaboración propia. 62

Figura 13: Distribución espacial de la variación de temperatura en la Región del Maule, donde A corresponde al promedio de las temperaturas máximas de verano entre 1985 – 1989; B corresponde al promedio de las temperaturas máximas de verano entre 1990 – 1999; C corresponde al promedio de las temperaturas máximas de verano entre 2000 – 2009 y D corresponde al promedio de las temperaturas máximas de verano entre 2010 – 2020. Las estaciones corresponden a: 1 Potrero Grande DGA; 2 Talca UC DGA; 3 Colorado DGA; 4 Ancoa Embalse DGA; 5 Digua Embalse DGA; 6 Parral DGA; 7 Penciahue DGA; 8 Río Claro en Rauquén DGA; 9 Lo Aguirre DGA; 10 Río Maule en Armerillo DGA, 11 Río Melado en El Salto DGA; 12 Armerillo DGA; 13 Laguna de Torca DGA; 14 Curico DGA; 15 Constitucion DGA; 16 Río Cipreces en Desagüe Laguna La Invernada DGA; 17 Río Claro En San Carlos DGA y 18 Los Condores DGA. Fuente: Elaboración propia. 64

Figura 14: Distribución espacial de la variación de temperatura mínima en la Región del Maule, donde A corresponde al promedio de las temperaturas mínima de verano entre 1985 – 1989; B corresponde al promedio de las temperaturas mínima de verano entre 1990 – 1999; C corresponde al promedio de las temperaturas mínima de verano entre 2000 – 2009 y D corresponde al promedio de las temperaturas mínima de verano entre 2010 – 2020. Las estaciones corresponden a: 1 Potrero Grande DGA; 2 Talca UC DGA; 3 Colorado DGA; 4 Ancoa Embalse DGA; 5 Digua Embalse DGA; 6 Parral DGA; 7 Penciahue DGA; 8 Río Claro en Rauquén DGA; 9 Lo Aguirre DGA; 10 Río Maule en Armerillo DGA, 11 Río Melado en El Salto DGA; 12 Armerillo DGA; 13 Laguna de Torca DGA; 14 Curico DGA; 15 Constitucion DGA; 16 Río Cipreces en Desagüe Laguna La Invernada DGA; 17 Río Claro En San Carlos DGA y 18 Los Condores DGA. Fuente: Elaboración propia. 66

Figura 15: Distribución espacial de la variación de temperatura en las Regiones del Ñuble y Biobío, donde A corresponde al promedio de las temperaturas máximas de verano entre 1985 – 1989; B corresponde al promedio de las temperaturas máximas de verano entre 1990 – 1999; C corresponde al promedio de las temperaturas máximas de verano entre 2000 – 2009 y D corresponde al promedio de las temperaturas máximas de verano entre 2010 – 2020. Las estaciones corresponden a: 1 Caracol DGA; 2 Coihueco Embalse DGA; 3 Parque Nahuelbuta DGA; 4 Diguillin DGA; 5 Alto Mallines DGA; 6 Río Biobío En La Culebra DGA; 7 Río Huequecura Aguas Arriba Embalse Angostura DGA; 8 Quilaco DGA y 9 Contulmo DGA. Fuente: Elaboración propia. 68

Figura 16: Distribución espacial de la variación de temperatura en las Regiones del Ñuble y Biobío, donde A corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de verano entre 1985 – 1989; B corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de verano entre 1990 – 1999; C corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de verano entre 2000 – 2009 y D corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de verano entre 2010 – 2020. Las estaciones corresponden a: 1

Caracol DGA; 2 Coihueco Embalse DGA; 3 Parque Nahuelbuta DGA; 4 Diguillin DGA; 5 Alto Mallines DGA; 6 Río Biobío En La Culebra DGA; 7 Río Huequecura Aguas Arriba Embalse Angostura DGA; 8 Quilaco DGA y 9 Contulmo DGA. Fuente: Elaboración propia. 70

Figura 17: Disminución del volumen de nieve zona Cordillera de Los Andes Regiones del Biobío y Ñuble, imágenes satelitales obtenidas desde Google Earth Pro donde 1 corresponde a imágenes del Volcán Callaqui Región del Biobío y 2 corresponde a imágenes del Complejo Volcánico Nevados de Chillán de la Región de Ñuble; A corresponde a verano del año 1990, B corresponde a verano del año 2000, C corresponde a verano del año 2010 y D corresponde a verano del año 2020. 71

Figura 18: Distribución espacial de la variación de temperatura en la Valparaíso, donde A corresponde al promedio de las temperaturas máximas de otoño entre 1985 – 1989; B corresponde al promedio de las temperaturas máximas de otoño entre 1990 – 1999; C corresponde al promedio de las temperaturas máximas de otoño entre 2000 – 2009 y D corresponde al promedio de las temperaturas máximas de otoño entre 2010 – 2020. Las estaciones corresponden a: 1 Río Juncal en Juncal Dga; 2 Canal Colorado en Bocatoma Dga; 3 Alicahue (DGA); 4 Vilcuya DGA; 5 Quillota DGA; 6 Los Aromos DGA; 7 Lago Peñuelas DGA; 8 Lliu-Lliu Embalse DGA; 9 Río Aconcagua en Chacabuquito DGA y, 10 Portillo DGA. Fuente: Elaboración propia. 73

Figura 19 Distribución espacial de la variación de temperatura en la Valparaíso, donde A corresponde al promedio de las temperaturas mínima de otoño entre 1985 – 1989; B corresponde al promedio de las temperaturas mínima de otoño entre 1990 – 1999; C corresponde al promedio de las temperaturas mínima de otoño entre 2000 – 2009 y D corresponde al promedio de las temperaturas mínima de otoño entre 2010 – 2020. Las estaciones corresponden a: 1 Río Juncal en Juncal Dga; 2 Canal Colorado en Bocatoma Dga; 3 Alicahue (DGA); 4 Vilcuya DGA; 5 Quillota DGA; 6 Los Aromos DGA; 7 Lago Peñuelas DGA; 8 Lliu-Lliu Embalse DGA; 9 Río Aconcagua en Chacabuquito DGA y, 10 Portillo DGA. Fuente: Elaboración propia. 75

Figura 20: Distribución espacial de la variación de temperatura máxima en la Región del Maule, donde A corresponde al promedio de las temperaturas máxima de otoño entre 1985 – 1989; B corresponde al promedio de las temperaturas máxima de otoño entre 1990 – 1999; C corresponde al promedio de las temperaturas máxima de otoño entre 2000 – 2009 y D corresponde al promedio de las temperaturas máxima de otoño entre 2010 – 2020. Las estaciones corresponden a: 1 Potrero Grande DGA; 2 Talca UC DGA; 3 Colorado DGA; 4 Ancoa Embalse DGA; 5 Digua Embalse DGA; 6 Parral DGA; 7 Pencahue DGA; 8 Río Claro en Rauquén DGA; 9 Lo Aguirre DGA; 10 Río Maule en Armerillo DGA, 11 Río Melado en El Salto DGA; 12 Armerillo DGA; 13 Laguna de Torca DGA; 14 Curico DGA; 15 Constitucion DGA; 16 Río Cipreces en Desagüe Laguna La Invernada DGA; 17 Río Claro En San Carlos DGA y 18 Los Condores DGA. Fuente: Elaboración propia. 77

Figura 21: Distribución espacial de la variación de temperatura máxima en la Región del Maule, donde A corresponde al promedio de las temperaturas mínima de otoño entre 1985 – 1989; B corresponde al promedio de las temperaturas mínima de otoño entre 1990 – 1999; C corresponde al promedio de las temperaturas mínima de otoño entre 2000 – 2009 y D corresponde al promedio de las temperaturas mínima de otoño entre 2010 – 2020. Las estaciones corresponden a: 1 Potrero Grande DGA; 2 Talca UC DGA; 3 Colorado DGA; 4 Ancoa Embalse DGA; 5 Digua Embalse DGA; 6 Parral DGA; 7 Pencahue DGA; 8 Río Claro en Rauquén DGA; 9 Lo Aguirre DGA; 10 Río Maule en Armerillo DGA, 11 Río Melado en El Salto DGA; 12 Armerillo DGA; 13 Laguna de Torca DGA; 14 Curico DGA; 15 Constitucion DGA; 16 Río Cipreces en Desagüe Laguna La Invernada DGA; 17 Río Claro En San Carlos DGA y 18 Los Condores DGA. Fuente: Elaboración propia. 79

Figura 22: Distribución espacial de la variación de temperatura en las Regiones del Ñuble y Biobío, donde A corresponde al promedio de las temperaturas máximas de otoño entre 1985 – 1989; B corresponde al promedio de las temperaturas máximas de otoño entre 1990 – 1999; C corresponde al promedio de las temperaturas máximas de otoño entre 2000 – 2009 y D corresponde al promedio de las temperaturas máximas de otoño entre 2010 – 2020. Las estaciones corresponden a: 1 Caracol DGA; 2 Coihueco Embalse DGA; 3 Parque Nahuelbuta DGA; 4 Diguillin DGA; 5 Alto Mallines DGA; 6 Río Biobío En La Culebra DGA; 7 Río Huequecura Aguas Arriba Embalse Angostura DGA; 8 Quilaco DGA y 9 Contulmo DGA. Fuente: Elaboración propia. 82

Figura 23: Distribución espacial de la variación de temperatura en las Regiones del Ñuble y Biobío, donde A corresponde al promedio de las temperaturas mínima de otoño entre 1985 – 1989; B corresponde al promedio de las temperaturas mínima de otoño entre 1990 – 1999; C corresponde al promedio de las temperaturas mínima de otoño entre 2000 – 2009 y D corresponde al promedio de las temperaturas mínima de otoño entre 2010 – 2020. Las estaciones corresponden a: 1 Caracol DGA; 2 Coihueco Embalse DGA; 3 Parque Nahuelbuta DGA; 4 Diguillin DGA; 5 Alto Mallines DGA; 6 Río Biobío En La Culebra DGA; 7 Río Huequecura Aguas Arriba Embalse Angostura DGA; 8 Quilaco DGA y 9 Contulmo DGA. Fuente: Elaboración propia. 84

Figura 24: Distribución espacial de la variación de temperatura en la Valparaíso, donde A corresponde al promedio de las temperaturas máximas de invierno entre 1985 – 1989; B corresponde al promedio de las temperaturas máximas de invierno entre 1990 – 1999; C corresponde al promedio de las temperaturas máximas de invierno entre 2000 – 2009 y D corresponde al promedio de las temperaturas máximas de invierno entre 2010 – 2020. Las estaciones corresponden a: 1 Río Juncal en Juncal Dga; 2 Canal Colorado en Bocatoma Dga; 3 Alicahue (DGA); 4 Vilcuya DGA; 5 Quillota DGA; 6 Los Aromos DGA; 7 Lago Peñuelas DGA; 8 Lliu-Lliu Embalse DGA; 9 Río Aconcagua en Chacabuquito DGA y, 10 Portillo DGA. Fuente: Elaboración propia. 86

Figura 25: Distribución espacial de la variación de temperatura en la Valparaíso, donde A corresponde al promedio de las temperaturas mínima de invierno entre 1985 – 1989; B corresponde al promedio de las temperaturas mínima de invierno entre 1990 – 1999; C corresponde al promedio de las temperaturas mínima de invierno entre 2000 – 2009 y D corresponde al promedio de las temperaturas mínima de invierno entre 2010 – 2020. Las estaciones corresponden a: 1 Río Juncal en Juncal Dga; 2 Canal Colorado en Bocatoma Dga; 3 Alicahue (DGA); 4 Vilcuya DGA; 5 Quillota DGA; 6 Los Aromos DGA; 7 Lago Peñuelas DGA; 8 Lliu-Lliu Embalse DGA; 9 Río Aconcagua en Chacabuquito DGA y, 10 Portillo DGA. Fuente: Elaboración propia. 88

Figura 26: Distribución espacial de la variación de temperatura en la Región del Maule, donde A corresponde al promedio de las temperaturas máximas de invierno entre 1985 – 1989; B corresponde al promedio de las temperaturas máximas de invierno entre 1990 – 1999; C corresponde al promedio de las temperaturas máximas de invierno entre 2000 – 2009 y D corresponde al promedio de las temperaturas máximas de invierno entre 2010 – 2020. Las estaciones corresponden a: 1 Potrero Grande DGA; 2 Talca UC DGA; 3 Colorado DGA; 4 Ancoa Embalse DGA; 5 Digua Embalse DGA; 6 Parral DGA; 7 Pencahue DGA; 8 Río Claro en Rauquén DGA; 9 Lo Aguirre DGA; 10 Río Maule en Armerillo DGA, 11 Río Melado en El Salto DGA; 12 Armerillo DGA; 13 Laguna de Torca DGA; 14 Curicó DGA; 15 Constitución DGA; 16 Río Cipreces en Desagüe Laguna La Invernada DGA; 17 Río Claro En San Carlos DGA y 18 Los Cóndores DGA. Fuente: Elaboración propia. 90

Figura 27: Distribución espacial de la variación de temperatura en la Región del Maule, donde A corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de invierno entre 1985 – 1989; B corresponde

al promedio de las temperaturas mínima de invierno entre 1990 – 1999; C corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de invierno entre 2000 – 2009 y D corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de invierno entre 2010 – 2020. Las estaciones corresponden a: 1 Potrero Grande DGA; 2 Talca UC DGA; 3 Colorado DGA; 4 Ancoa Embalse DGA; 5 Digua Embalse DGA; 6 Parral DGA; 7 Pencahue DGA; 8 Río Claro en Rauquén DGA; 9 Lo Aguirre DGA; 10 Río Maule en Armerillo DGA, 11 Río Melado en El Salto DGA; 12 Armerillo DGA; 13 Laguna de Torca DGA; 14 Curicó DGA; 15 Constitución DGA; 16 Río Cipreces en Desagüe Laguna La Invernada DGA; 17 Río Claro En San Carlos DGA y 18 Los Cóndores DGA. Fuente: Elaboración propia. 92

Figura 28: Distribución espacial de la variación de temperatura en las Regiones del Ñuble y Biobío, donde A corresponde al promedio de las temperaturas máximas de invierno entre 1985 – 1989; B corresponde al promedio de las temperaturas máximas de invierno entre 1990 – 1999; C corresponde al promedio de las temperaturas máximas de invierno entre 2000 – 2009 y D corresponde al promedio de las temperaturas máximas de invierno entre 2010 – 2020. Las estaciones corresponden a: 1 Caracol DGA; 2 Coihueco Embalse DGA; 3 Diguillin DGA; 4 Parque Nahuelbuta DGA; 5 Alto Mallines DGA; 6 Río Biobío En La Culebra DGA; 7 Río Huequecura Aguas Arriba Embalse Angostura DGA; 8 Quilaco DGA y 9 Contulmo DGA. Fuente: Elaboración propia. 94

Figura 29: Distribución espacial de la variación de temperatura en las Regiones del Ñuble y Biobío, donde A corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de invierno entre 1985 – 1989; B corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de invierno entre 1990 – 1999; C corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de invierno entre 2000 – 2009 y D corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de invierno entre 2010 – 2020. Las estaciones corresponden a: 1 Caracol DGA; 2 Coihueco Embalse DGA; 3 Diguillin DGA; 4 Parque Nahuelbuta DGA; 5 Alto Mallines DGA; 6 Río Biobío En La Culebra DGA; 7 Río Huequecura Aguas Arriba Embalse Angostura DGA; 8 Quilaco DGA y 9 Contulmo DGA. Fuente: Elaboración propia. 96

Figura 30: Distribución espacial de la variación de temperatura en la Valparaíso, donde A corresponde al promedio de las temperaturas máximas de primavera entre 1985 – 1989; B corresponde al promedio de las temperaturas máximas de primavera entre 1990 – 1999; C corresponde al promedio de las temperaturas máximas de primavera entre 2000 – 2009 y D corresponde al promedio de las temperaturas máximas de primavera entre 2010 – 2020. Las estaciones corresponden a: 1 Río Juncal en Juncal Dga; 2 Canal Colorado en Bocatoma Dga; 3 Alicahue (DGA); 4 Vilcuya DGA; 5 Quillota DGA; 6 Los Aromos DGA; 7 Lago Peñuelas DGA; 8 Lliu-Lliu Embalse DGA; 9 Río Aconcagua en Chacabuquito DGA y, 10 Portillo DGA. Fuente: Elaboración propia. 98

Figura 31: Distribución espacial de la variación de temperatura en la Valparaíso, donde A corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de primavera entre 1985 – 1989; B corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de primavera entre 1990 – 1999; C corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de primavera entre 2000 – 2009 y D corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de primavera entre 2010 – 2020. Las estaciones corresponden a: 1 Río Juncal en Juncal Dga; 2 Canal Colorado en Bocatoma Dga; 3 Alicahue (DGA); 4 Vilcuya DGA; 5 Quillota DGA; 6 Los Aromos DGA; 7 Lago Peñuelas DGA; 8 Lliu-Lliu Embalse DGA; 9 Río Aconcagua en Chacabuquito DGA y, 10 Portillo DGA. Fuente: Elaboración propia. 100

Figura 32: Distribución espacial de la variación de temperatura en la Región del Maule, donde A corresponde al promedio de las temperaturas máximas de primavera entre 1985 – 1989; B

corresponde al promedio de las temperaturas máximas de primavera entre 1990 – 1999; C corresponde al promedio de las temperaturas máximas de primavera entre 2000 – 2009 y D corresponde al promedio de las temperaturas máximas de primavera entre 2010 – 2020. Las estaciones corresponden a: 1 Potrero Grande DGA; 2 Talca UC DGA; 3 Colorado DGA; 4 Ancoa Embalse DGA; 5 Digua Embalse DGA; 6 Parral DGA; 7 Pencahue DGA; 8 Rio Claro en Rauquén DGA; 9 Lo Aguirre DGA; 10 Rio Maule en Armerillo DGA, 11 Rio Melado en El Salto DGA; 12 Armerillo DGA; 13 Laguna de Torca DGA; 14 Curicó DGA; 15 Constitución DGA; 16 Rio Cipreces en Desagüe Laguna La Invernada DGA; 17 Rio Claro En San Carlos DGA y 18 Los Cóndores DGA. Fuente: Elaboración propia. 102

Figura 33: Distribución espacial de la variación de temperatura en la Región del Maule, donde A corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de primavera entre 1985 – 1989; B corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de primavera entre 1990 – 1999; C corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de primavera entre 2000 – 2009 y D corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de primavera entre 2010 – 2020. Las estaciones corresponden a: 1 Potrero Grande DGA; 2 Talca UC DGA; 3 Colorado DGA; 4 Ancoa Embalse DGA; 5 Digua Embalse DGA; 6 Parral DGA; 7 Pencahue DGA; 8 Rio Claro en Rauquén DGA; 9 Lo Aguirre DGA; 10 Rio Maule en Armerillo DGA, 11 Rio Melado en El Salto DGA; 12 Armerillo DGA; 13 Laguna de Torca DGA; 14 Curicó DGA; 15 Constitución DGA; 16 Rio Cipreces en Desagüe Laguna La Invernada DGA; 17 Rio Claro En San Carlos DGA y 18 Los Cóndores DGA. Fuente: Elaboración propia. 104

Figura 34: Distribución espacial de la variación de temperatura en las Regiones del Ñuble y Biobío, donde A corresponde al promedio de las temperaturas máximas de primavera entre 1985 – 1989; B corresponde al promedio de las temperaturas máximas de primavera entre 1990 – 1999; C corresponde al promedio de las temperaturas máximas de primavera entre 2000 – 2009 y D corresponde al promedio de las temperaturas máximas de primavera entre 2010 – 2020. Las estaciones corresponden a: 1 Caracol DGA; 2 Coihueco Embalse DGA; 3 Diguillin DGA; 4 Parque Nahuelbuta DGA; 5 Alto Mallines DGA; 6 Rio Biobío En La Culebra DGA; 7 Rio Huequecura Aguas Arriba Embalse Angostura DGA; 8 Quilaco DGA y 9 Contulmo DGA. Se puede observar una escasa variación en las temperaturas y su distribución geoespacial. Fuente: Elaboración propia 107

Figura 35: Distribución espacial de la variación de temperatura en las Regiones del Ñuble y Biobío, donde A corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de primavera entre 1985 – 1989; B corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de primavera entre 1990 – 1999; C corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de primavera entre 2000 – 2009 y D corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de primavera entre 2010 – 2020. Las estaciones corresponden a: 1 Caracol DGA; 2 Coihueco Embalse DGA; 3 Diguillin DGA; 4 Parque Nahuelbuta DGA; 5 Alto Mallines DGA; 6 Rio Biobío En La Culebra DGA; 7 Rio Huequecura Aguas Arriba Embalse Angostura DGA; 8 Quilaco DGA y 9 Contulmo DGA. Fuente: Elaboración propia. 109

Figura 36: Variación de las precipitaciones medias para el período comprendido entre mayo y septiembre en la Región de Valparaíso. Donde A corresponde al promedio de las precipitaciones entre 1985 – 1989; B corresponde al promedio de las precipitaciones entre 1990 – 1999; C corresponde al promedio de las precipitaciones entre 2000 – 2009 y D corresponde al promedio de las precipitaciones entre 2010 – 2020. 113

Figura 37: Variación de las precipitaciones medias para el período comprendido entre mayo y septiembre en la Región del Maule. Donde A corresponde al promedio de las precipitaciones entre 1985 – 1989; B corresponde al promedio de las precipitaciones entre 1990 – 1999; C corresponde

al promedio de las precipitaciones entre 2000 – 2009 y D corresponde al promedio de las precipitaciones entre 2010 – 2020. 116

Figura 38: Variación de las precipitaciones medias para el período comprendido entre mayo y septiembre en la Región del Ñuble y Biobío. Donde A corresponde al promedio de las precipitaciones acumuladas entre 1985 – 1989; B corresponde al promedio de las precipitaciones acumuladas entre 1990 – 1999; C corresponde al promedio de las precipitaciones acumuladas entre 2000 – 2009 y D corresponde al promedio de las precipitaciones acumuladas entre 2010 – 2020. 119

Figura 39: Grilla orbital del satélite LANDSAT-5 TM y códigos path and row de las escenas resultantes. Fuente: Elaboración propia 131

Figura 40: Áreas de análisis seleccionadas de acuerdo a los criterios explicados en color verde. En el cuadrante A, están las áreas seleccionadas para la Región de Valparaíso; en el cuadrante B, están las áreas seleccionadas para la Región del Maule y en el cuadrante C, están las áreas seleccionadas para las Regiones de Ñuble y Biobío. 134

Figura 41: Cálculo de NDVI y elaboración de ráster binario con el umbral entre la presencia y ausencia de clorofila en un área de análisis, sobre las imágenes Landsat en T1 y T2. 1 corresponde a la Imagen Landsat del año 1986; 2 corresponde a cálculo de NDVI del año 1986; 3 corresponde a la Imagen enmascarada del año 1986; 4 corresponde a la Imagen Landsat del año 2019; 5 corresponde al cálculo de NDVI del año 2019 y, 6 corresponde a la Imagen enmascarada del año 2019. Fuente: Imágenes USGS. Elaboración propia. 136

Figura 42: Porcentaje de cambios en la superficie de suelos desnudos registradas entre T1: 1986 y T2: 2019- 20, para las áreas de análisis de la Región de Valparaíso. Los valores positivos indican aumento de suelos desnudos en el período. Fuente: Elaboración propia. 134

Figura 43: cambios en la biomasa de bosque nativo y cambio de temperaturas en la Región de Valparaíso. En el cuadrante A, se puede observar el promedio de la temperatura máxima para primavera entre los años 1985 al 1990. En el cuadrante B, se observa el promedio de temperaturas máximas para primavera entre los años 2011 al 2020. En ambos cuadrantes se superpuso las áreas de análisis y reducción del bosque nativo. Fuente: elaboración propia. 137

Figura 44: cambios en la biomasa de bosque nativo y cambio de temperaturas en la Región de Valparaíso. En el cuadrante A, se puede observar el promedio de la temperatura máxima para verano entre los años 1985 al 1990. En el cuadrante B, se observa el promedio de temperaturas máximas para verano entre los años 2011 al 2020. En ambos cuadrantes se superpuso las áreas de análisis y reducción del bosque nativo. Fuente: elaboración propia. 138

Figura 45: cambios en la biomasa de bosque nativo y precipitaciones en la Región de Valparaíso. En el cuadrante A, se puede observar la precipitación media acumulada entre los años 1985 al 1990. En el cuadrante B, se observa la precipitación media acumulada para los años 2011 al 2020. En ambos cuadrantes se superpuso las áreas de análisis y reducción del bosque nativo. Fuente: elaboración propia. 139

Figura 46: Porcentaje de cambios en la superficie de suelos desnudos registradas entre T1: 1986 y T2: 2019- 20, para las áreas de análisis de la Región del Maule. Los valores positivos indican aumento de suelos desnudos en el período. Fuente: Elaboración propia. 141

Figura 47: cambios en la biomasa de bosque nativo y cambio de temperaturas en la Región de Valparaíso. En el cuadrante A, se puede observar el promedio de la temperatura máxima para primavera entre los años 1985 al 1990. En el cuadrante B, se observa el promedio de temperaturas máximas para primavera entre los años 2011 al 2020. En ambos cuadrantes se superpuso las áreas de análisis y reducción del bosque nativo. Fuente: elaboración propia. 143

Figura 48: cambios en la biomasa de bosque nativo y cambio de temperaturas en la Región de Valparaíso. En el cuadrante A, se puede observar el promedio de la temperatura máxima para verano entre los años 1985 al 1990. En el cuadrante B, se observa el promedio de temperaturas máximas para verano entre los años 2011 al 2020. En ambos cuadrantes se superpuso las áreas de análisis y reducción del bosque nativo. Fuente: elaboración propia. 144

Figura 49: cambios en la biomasa de bosque nativo y precipitaciones en la Región del Maule. En el cuadrante A, se puede observar la precipitación media acumulada entre los años 1985 al 1990. En el cuadrante B, se observa la precipitación media acumulada para los años 2011 al 2020. En ambos cuadrantes se superpuso las áreas de análisis y reducción del bosque nativo. Fuente: elaboración propia. 145

Figura 50: Porcentaje de cambios en la superficie de suelos desnudos registradas entre T1: 1986 y T2: 2019- 20, para las áreas de análisis de la Región de Ñuble. Los valores positivos indican aumento de suelos desnudos en el período. Fuente: Elaboración propia. 148

Figura 51: Porcentaje de cambios en la superficie de suelos desnudos registradas entre T1: 1986 y T2: 2019- 20, para las áreas de análisis de la Región del Biobío. Los valores positivos indican aumento de suelos desnudos en el período. Fuente: Elaboración propia. 149

Figura 52: cambios en la biomasa de bosque nativo y cambio de temperaturas en las regiones de Ñuble y Biobío. En el cuadrante A, se puede observar el promedio de la temperatura máxima para primavera entre los años 1985 al 1990. En el cuadrante B, se observa el promedio de temperaturas máximas para primavera entre los años 2011 al 2020. En ambos cuadrantes se superpuso las áreas de análisis y reducción del bosque nativo. Fuente: elaboración propia. 150

Figura 53: cambios en la biomasa de bosque nativo y cambio de temperaturas en las regiones de Ñuble y Biobío. En el cuadrante A, se puede observar el promedio de la temperatura máxima para verano entre los años 1985 al 1990. En el cuadrante B, se observa el promedio de temperaturas máximas para verano entre los años 2011 al 2020. En ambos cuadrantes se superpuso las áreas de análisis y reducción del bosque nativo. Fuente: elaboración propia. 151

Figura 54: cambios en la biomasa de bosque nativo y precipitaciones en la Región del Biobío. En el cuadrante A, se puede observar la precipitación media acumulada entre los años 1985 al 1990. En el cuadrante B, se observa la precipitación media acumulada para los años 2011 al 2020. 153

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Valores de NPP para biomas terrestres. Fuente: Kloeppe, B.D.; M.E. Harmon; T.J. Fahey. 2007.	38
Tabla 2: formaciones vegetacionales zona central y sur. Fuente: SAG, (2014), Prado, (2013).	43
Tabla 3. Formaciones vegetacionales de Chile Central y Centro Sur años 2001-2017. Fuente: Mc Wethy D.B., Pauchard, A., Garcia, R.A., Holz, A., Gonzalez, M.E., Veblen, T.T., et al. (2018).	44
Tabla 4: Superficie regional y superficie de prospección con vegetación nativa Fuente: INE, (2006); GeoHack, (2020).	53
Tabla 5: estaciones meteorológicas consultadas por región. Fuente: elaboración propia en base a la información de la Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas de Chile.	57
Tabla 6: Estaciones Pluviométricas. Fuente Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas.	110
Tabla 7. Superficie regional y superficie de prospección con vegetación nativa Fuente: Elaboración propia a partir de INE, (2006) y GeoHack, (2020).	128
Tabla 8: Resolución espectral y espacial de las imágenes de Landsat 5. Fuente: Congedo Luca (2016).	129
Tabla 9: Resolución espectral y espacial de las imágenes de Landsat 5. Fuente: U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey.	130
Tabla 10: Códigos y fechas de imágenes Landsat 5 seleccionadas para el proyecto. Fuente: Elaboración propia.	130
Tabla 11: Códigos y fechas de imágenes Landsat 8 seleccionadas para el proyecto. Fuente: Elaboración propia.	130
Tabla 12: Rangos porcentuales de los cambios en la detección de suelos desnudos sobre imágenes Landsat, entre los años 1986 y 2019-20 para las áreas de análisis. Fuente: Elaboración propia.	133
Tabla 13: Resumen de los resultados de la detección de suelos desnudos entre 1986 y 2019-20 para las áreas de análisis para la Región de Valparaíso. Fuente: Elaboración propia.	136
Tabla 14. Evolución de la superficie, NDVI y biomasa de formaciones vegetacionales nativas en la Región de Valparaíso. Fuente: elaboración propia.	140
Tabla 15: Resumen de los resultados de la detección de suelos desnudos entre 1986 y 2019-20 para las áreas de análisis para la Región del Maule. Fuente: Elaboración propia.	142
Tabla 16. Evolución de la superficie, NDVI y biomasa de formaciones vegetacionales nativas en la Región del Maule. Fuente: elaboración propia.	146
Tabla 17: Resumen de los resultados de la detección de suelos desnudos entre 1986 y 2019-20 para las áreas de análisis para la Región del Ñuble. Fuente: Elaboración propia.	148

Tabla 18: Resumen de los resultados de la detección de suelos desnudos entre 1986 y 2019-20 para las áreas de análisis para la Región del Biobío. Fuente: Elaboración propia. 148

Tabla 19. Evolución de la superficie, NDVI y biomasa de formaciones vegetacionales nativas en la Región de Ñuble. Fuente: elaboración propia. 154

Tabla 20. Evolución de la superficie, NDVI y biomasa de formaciones vegetacionales nativas en la Región del Biobío. Fuente: elaboración propia. 154

INDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Parte proporcional que representan diferentes GEI antropogénicos. Fuente: elaboración propia con datos del IPCC 2021. 27

Gráfico 2: Emisiones de CO₂ y variación de la temperatura global. Fuente: Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC) y National Aeronautics and Space Administration (NASA), 2018. 27

Gráfico 3: Cambio en la temperatura media global en superficie observada mensualmente. Fuente, IPCC 2019. 29

Gráfico 4: Variación de la temperatura máxima en la Región de Valparaíso, donde Verano 1 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de verano entre 1985 – 1989; Verano 2 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de verano entre 1990 – 1999; Verano 3 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de verano entre 2000 – 2009 y Verano 4 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de verano entre 2010 – 2020. En las estaciones, 1 Río Juncal en Juncal Dga; 2 Canal Colorado en Bocatoma Dga; 3 Alicahue (DGA); 4 Vilcuya DGA; 5 Quillota DGA; 6 Los Aromos DGA; 7 Lago Peñuelas DGA; 8 Lliu-Lliu Embalse DGA; 9 Río Aconcagua en Chacabuquito DGA y, 10 Portillo DGA. Fuente: Elaboración propia. 61

Gráfico 5: Variación de la temperatura mínima en la Región de Valparaíso, donde Verano 1 corresponde al promedio de las temperaturas mínima de verano entre 1985 – 1989; Verano 2 corresponde al promedio de las temperaturas mínima de verano entre 1990 – 1999; Verano 3 corresponde al promedio de las temperaturas mínima de verano entre 2000 – 2009 y Verano 4 corresponde al promedio de las temperaturas mínima de verano entre 2010 – 2020. En las estaciones, 1 Río Juncal en Juncal Dga; 2 Canal Colorado en Bocatoma Dga; 3 Alicahue (DGA); 4 Vilcuya DGA; 5 Quillota DGA; 6 Los Aromos DGA; 7 Lago Peñuelas DGA; 8 Lliu-Lliu Embalse DGA; 9 Río Aconcagua en Chacabuquito DGA y, 10 Portillo DGA. Fuente: Elaboración propia. 63

Gráfico 6: Variación de la temperatura máxima en la Región del Maule, donde Verano 1 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de verano entre 1985 – 1989; Verano 2 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de verano entre 1990 – 1999; Verano 3 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de verano entre 2000 – 2009 y Verano 4 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de verano entre 2010 – 2020. En las estaciones, 1 Potrero Grande DGA; 2 Talca UC DGA; 3 Colorado DGA; 4 Ancoa Embalse DGA; 5 Digua Embalse DGA; 6 Parral DGA; 7 Penciahue DGA; 8 Río Claro en Rauquén DGA; 9 Lo Aguirre DGA; 10 Río Maule en Armerillo DGA, 11 Río Melado en El Salto DGA; 12 Armerillo DGA; 13 Laguna de Torca DGA; 14 Curicó DGA; 15 Constitución DGA; 16 Río Cipreces en Desagüe Laguna La Invernada DGA; 17 Río Claro En San Carlos DGA y 18 Los Condores DGA. Fuente: Elaboración propia. 65

Gráfico 7: Variación de la temperatura mínimas en la Región del Maule, donde Verano 1 corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de verano entre 1985 – 1989; Verano 2 corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de verano entre 1990 – 1999; Verano 3 corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de verano entre 2000 – 2009 y Verano 4 corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de verano entre 2010 – 2020. En las estaciones, 1 Potrero Grande DGA; 2 Talca UC DGA; 3 Colorado DGA; 4 Ancoa Embalse DGA; 5 Digua Embalse DGA; 6 Parral DGA; 7 Penciahue DGA; 8 Río Claro en Rauquén DGA; 9 Lo Aguirre DGA; 10 Río Maule en

Armerillo DGA, 11 Río Melado en El Salto DGA; 12 Armerillo DGA; 13 Laguna de Torca DGA; 14 Curicó DGA; 15 Constitución DGA; 16 Río Cipreces en Desagüe Laguna La Invernada DGA; 17 Río Claro En San Carlos DGA y 18 Los Condores DGA. Fuente: Elaboración propia. 67

Gráfico 8: Variación de temperatura en las Regiones del Ñuble y Biobío, donde Verano 1 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de verano entre 1985 – 1989; Verano 2 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de verano entre 1990 – 1999; Verano 3 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de verano entre 2000 – 2009 y Verano 4 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de verano entre 2010 – 2020. Las estaciones corresponden a: 1 Caracol DGA; 2 Coihueco Embalse DGA; 3 Parque Nahuelbuta DGA; 4 Diguillin DGA; 5 Alto Mallines DGA; 6 Río Biobío En La Culebra DGA; 7 Río Huequecura Aguas Arriba Embalse Angostura DGA; 8 Quilaco DGA y 9 Contulmo DGA. Fuente: Elaboración propia. 69

Gráfico 9: Variación de temperatura en las Regiones del Ñuble y Biobío, donde A corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de verano entre 1985 – 1989; B corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de verano entre 1990 – 1999; C corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de verano entre 2000 – 2009 y D corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de verano entre 2010 – 2020. Las estaciones corresponden a: 1 Caracol DGA; 2 Coihueco Embalse DGA; 3 Parque Nahuelbuta DGA; 4 Diguillin DGA; 5 Alto Mallines DGA; 6 Río Biobío En La Culebra DGA; 7 Río Huequecura Aguas Arriba Embalse Angostura DGA; 8 Quilaco DGA y 9 Contulmo DGA. Fuente: Elaboración propia. 71

Gráfico 10: Variación de temperatura en la Valparaíso, donde Otoño 1 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de otoño entre 1985 – 1989; Otoño 2 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de otoño entre 1990 – 1999; Otoño 3 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de otoño entre 2000 – 2009 y Otoño 4 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de otoño entre 2010 – 2020. Las estaciones corresponden a: 1 Río Juncal en Juncal DGA; 2 Canal Colorado en Bocatoma DGA; 3 Alicahue (DGA); 4 Vilcuya DGA; 5 Quillota DGA; 6 Los Aromos DGA; 7 Lago Peñuelas DGA; 8 Lliu-Lliu Embalse DGA; 9 Río Aconcagua en Chacabuquito DGA y, 10 Portillo DGA. Fuente: Elaboración propia. 74

Gráfico 11: Variación de temperatura en la Valparaíso, donde Otoño 1 corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de otoño entre 1985 – 1989; Otoño 2 corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de otoño entre 1990 – 1999; Otoño 3 corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de otoño entre 2000 – 2009 y Otoño 4 corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de otoño entre 2010 – 2020. Las estaciones corresponden a: 1 Río Juncal en Juncal DGA; 2 Canal Colorado en Bocatoma DGA; 3 Alicahue (DGA); 4 Vilcuya DGA; 5 Quillota DGA; 6 Los Aromos DGA; 7 Lago Peñuelas DGA; 8 Lliu-Lliu Embalse DGA; 9 Río Aconcagua en Chacabuquito DGA y, 10 Portillo DGA. 76

Gráfico 12 Variación temporal de la temperatura máxima en la Región del Maule, donde Otoño 1 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de otoño entre 1985 – 1989; Otoño 2 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de otoño entre 1990 – 1999; Otoño 3 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de otoño entre 2000 – 2009 y Otoño 4 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de otoño entre 2010 – 2020. En las estaciones, 1 Potrero Grande DGA; 2 Talca UC DGA; 3 Colorado DGA; 4 Ancoa Embalse DGA; 5 Digua Embalse DGA; 6 Parral DGA; 7 Pencahue DGA; 8 Río Claro en Rauquén DGA; 9 Lo Aguirre DGA; 10 Río Maule en Armerillo DGA, 11 Río Melado en El Salto DGA; 12 Armerillo DGA; 13 Laguna de Torca DGA; 14 Curicó DGA; 15 Constitución DGA; 16 Río Cipreces en Desagüe Laguna La

Invernada DGA; 17 Río Claro En San Carlos DGA y 18 Los Cóndores DGA. Fuente: Elaboración propia. 78

Gráfico 13: Variación temporal de la temperatura mínimas en la Región del Maule, donde Otoño 1 corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de otoño entre 1985 – 1989; Otoño 2 corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de otoño entre 1990 – 1999; Otoño 3 corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de otoño entre 2000 – 2009 y Otoño 4 corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de otoño entre 2010 – 2020. En las estaciones, 1 Potrero Grande DGA; 2 Talca UC DGA; 3 Colorado DGA; 4 Ancoa Embalse DGA; 5 Digua Embalse DGA; 6 Parral DGA; 7 Penciahue DGA; 8 Río Claro en Rauquén DGA; Fuente: Elaboración propia. 80

Gráfico 14: Variación temporal de la temperatura mínimas en la Región del Maule, donde Otoño 1 corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de otoño entre 1985 – 1989; Otoño 2 corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de otoño entre 1990 – 1999; Otoño 3 corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de otoño entre 2000 – 2009 y Otoño 4 corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de otoño entre 2010 – 2020. En las estaciones, 1 Potrero Grande DGA; 2 Talca UC DGA; 3 Colorado DGA; 4 Ancoa Embalse DGA; 5 Digua Embalse DGA; 6 Parral DGA; 7 Penciahue DGA; 8 Río Claro en Rauquén DGA; 9 Lo Aguirre DGA; 10 Río Maule en Armerillo DGA, 11 Río Melado en El Salto DGA; 12 Armerillo DGA; 13 Laguna de Torca DGA; 14 Curicó DGA; 15 Constitución DGA; 16 Río Cipreces en Desagüe Laguna La Invernada DGA; 17 Río Claro En San Carlos DGA y 18 Los Cóndores DGA. Fuente: Elaboración propia. 81

Gráfico 15: Variación temporal de temperatura en las Regiones del Ñuble y Biobío, donde Otoño 1 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de otoño entre 1985 – 1989; Otoño 2 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de otoño entre 1990 – 1999; Otoño 3 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de otoño entre 2000 – 2009 y Otoño 4 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de otoño entre 2010 – 2020. Las estaciones corresponden a: 1 Caracol DGA; 2 Coihueco Embalse DGA; 3 Parque Nahuelbuta DGA; 4 Diguillín DGA; 5 Alto Mallines DGA; 6 Río Biobío En La Culebra DGA; 7 Río Huequecura Aguas Arriba Embalse Angostura DGA; 8 Quilaco DGA y 9 Contulmo DGA. Fuente: Elaboración propia. 83

Gráfico 16: Variación temporal de la variación de temperatura en las Regiones del Ñuble y Biobío, donde Otoño 1 corresponde al promedio de las temperaturas mínima de otoño entre 1985 – 1989; Otoño 2 corresponde al promedio de las temperaturas mínima de otoño entre 1990 – 1999; Otoño 3 corresponde al promedio de las temperaturas mínima de otoño entre 2000 – 2009 y Otoño 4 corresponde al promedio de las temperaturas mínima de otoño entre 2010 – 2020. Las estaciones corresponden a: 1 Caracol DGA; 2 Coihueco Embalse DGA; 3 Parque Nahuelbuta DGA; 4 Diguillín DGA; 5 Alto Mallines DGA; 6 Río Biobío En La Culebra DGA; 7 Río Huequecura Aguas Arriba Embalse Angostura DGA; 8 Quilaco DGA y 9 Contulmo DGA. Fuente: Elaboración propia. 85

Gráfico 17: Variación temporal de la variación de temperatura en la Valparaíso, donde A corresponde al promedio de las temperaturas máximas de invierno entre 1985 – 1989; B corresponde al promedio de las temperaturas máximas de invierno entre 1990 – 1999; C corresponde al promedio de las temperaturas máximas de invierno entre 2000 – 2009 y D corresponde al promedio de las temperaturas máximas de invierno entre 2010 – 2020. Las estaciones corresponden a: 1 Río Juncal en Juncal Dga; 2 Canal Colorado en Bocatoma Dga; 3 Alicahue (DGA); 4 Vilcuya DGA; 5 Quillota

DGA; 6 Los Aromos DGA; 7 Lago Peñuelas DGA; 8 Lliu-Lliu Embalse DGA; 9 Río Aconcagua en Chacabuquito DGA y, 10 Portillo DGA. Fuente: Elaboración propia. 87

Gráfico 18: Variación temporal de la variación de temperatura en la Valparaíso, donde A corresponde al promedio de las temperaturas mínima de invierno entre 1985 – 1989; B corresponde al promedio de las temperaturas mínima de invierno entre 1990 – 1999; C corresponde al promedio de las temperaturas mínima de invierno entre 2000 – 2009 y D corresponde al promedio de las temperaturas mínima de invierno entre 2010 – 2020. Las estaciones corresponden a: 1 Río Juncal en Juncal Dga; 2 Canal Colorado en Bocatoma Dga; 3 Alicahue (DGA); 4 Vilcuya DGA; 5 Quillota DGA; 6 Los Aromos DGA; 7 Lago Peñuelas DGA; 8 Lliu-Lliu Embalse DGA; 9 Río Aconcagua en Chacabuquito DGA y, 10 Portillo DGA. Fuente: Elaboración propia. 89

Gráfico 19: Variación temporal de la temperatura máxima en la Región del Maule, donde Invierno 1 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de invierno entre 1985 – 1989; invierno 2 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de invierno entre 1990 – 1999; invierno 3 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de invierno entre 2000 – 2009 y Invierno 4 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de otoño entre 2010 – 2020. En las estaciones, 1 Potrero Grande DGA; 2 Talca UC DGA; 3 Colorado DGA; 4 Ancoa Embalse DGA; 5 Digua Embalse DGA; 6 Parral DGA; 7 Pencahue DGA; 8 Río Claro en Rauquén DGA; 9 Lo Aguirre DGA; 10 Río Maule en Armerillo DGA, 11 Río Melado en El Salto DGA; 12 Armerillo DGA; 13 Laguna de Torca DGA; 14 Curicó DGA; 15 Constitución DGA; 16 Río Cipreces en Desagüe Laguna La Invernada DGA; 17 Río Claro En San Carlos DGA y 18 Los Cóndores DGA. Fuente: Elaboración propia. 91

Gráfico 20: Variación temporal de la temperatura mínimas en la Región del Maule, donde Invierno 1 corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de invierno entre 1985 – 1989; invierno 2 corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de invierno entre 1990 – 1999; invierno 3 corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de invierno entre 2000 – 2009 y Invierno 4 corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de otoño entre 2010 – 2020. En las estaciones, 1 Potrero Grande DGA; 2 Talca UC DGA; 3 Colorado DGA; 4 Ancoa Embalse DGA; 5 Digua Embalse DGA; 6 Parral DGA; 7 Pencahue DGA; 8 Río Claro en Rauquén DGA; 9 Lo Aguirre DGA; 10 Río Maule en Armerillo DGA, 11 Río Melado en El Salto DGA; 12 Armerillo DGA; 13 Laguna de Torca DGA; 14 Curicó DGA; 15 Constitución DGA; 16 Río Cipreces en Desagüe Laguna La Invernada DGA; 17 Río Claro En San Carlos DGA y 18 Los Cóndores DGA. Fuente: Elaboración propia. 93

Gráfico 21: Variación temporal de temperatura en las Regiones del Ñuble y Biobío, donde Invierno 1 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de invierno entre 1985 – 1989; Invierno 2 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de invierno entre 1990 – 1999; Invierno 3 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de invierno entre 2000 – 2009 y Invierno 4 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de invierno entre 2010 – 2020. Las estaciones corresponden a: 1 Caracol DGA; 2 Coihueco Embalse DGA; 3 Diguillin DGA; 4 Parque Nahuelbuta DGA; 5 Alto Mallines DGA; 6 Río Biobío En La Culebra DGA; 7 Río Huequecura Aguas Arriba Embalse Angostura DGA; 8 Quilaco DGA y 9 Contulmo DGA. Fuente: Elaboración propia. 95

Gráfico 22: Variación de temperatura en las Regiones del Ñuble y Biobío, donde Invierno 1 corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de invierno entre 1985 – 1989; Invierno 2 corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de invierno entre 1990 – 1999; Invierno 3 corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de invierno entre 2000 – 2009 y Invierno 4

corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de invierno entre 2010 – 2020. Las estaciones corresponden a: 1 Caracol DGA; 2 Coihueco Embalse DGA; 3 Diguillin DGA; 4 Parque Nahuelbuta DGA; 5 Alto Mallines DGA; 6 Río Biobío En La Culebra DGA; 7 Río Huequecura Aguas Arriba Embalse Angostura DGA; 8 Quilaco DGA y 9 Contulmo DGA. Fuente: Elaboración propia. 97

Gráfico 23: Variación temporal de temperatura en la Región Valparaíso, donde Primavera 1 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de primavera entre 1985 – 1989; Primavera 2 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de primavera entre 1990 – 1999; Primavera 3 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de primavera entre 2000 – 2009 y Primavera 4 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de primavera entre 2010 – 2020. Las estaciones corresponden a 1 Río Juncal en Juncal Dga; 2 Canal Colorado en Bocatoma Dga; 3 Alicahue (DGA); 4 Vilcuya DGA; 5 Quillota DGA; 6 Los Aromos DGA; 7 Lago Peñuelas DGA; 8 Lliu-Lliu Embalse DGA; 9 Río Aconcagua en Chacabuquito DGA y, 10 Portillo DGA. Fuente: Elaboración propia. 99

Gráfico 24: Variación temporal de temperatura en la Región Valparaíso, donde Primavera 1 corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de primavera entre 1985 – 1989; Primavera 2 corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de primavera entre 1990 – 1999; Primavera 3 corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de primavera entre 2000 – 2009 y Primavera 4 corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de primavera entre 2010 – 2020. Las estaciones corresponden a 1 Río Juncal en Juncal Dga; 2 Canal Colorado en Bocatoma Dga; 3 Alicahue (DGA); 4 Vilcuya DGA; 5 Quillota DGA; 6 Los Aromos DGA; 7 Lago Peñuelas DGA; 8 Lliu-Lliu Embalse DGA; 9 Río Aconcagua en Chacabuquito DGA y, 10 Portillo DGA. Fuente: Elaboración propia. 101

Gráfico 25: Variación temporal de la temperatura máxima en la Región del Maule, donde Primavera 1 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de primavera entre 1985 – 1989; Primavera 2 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de primavera entre 1990 – 1999; Primavera 3 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de primavera entre 2000 – 2009 y Primavera 4 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de primavera entre 2010 – 2020. En las estaciones, 1 Potrero Grande DGA; 2 Talca UC DGA; 3 Colorado DGA; 4 Ancoa Embalse DGA; 5 Digua Embalse DGA; 6 Parral DGA; 7 Pencahue DGA; 8 Río Claro en Rauquén DGA; 9 Lo Aguirre DGA; 10 Río Maule en Armerillo DGA, 11 Río Melado en El Salto DGA; 12 Armerillo DGA; 13 Laguna de Torca DGA; 14 Curicó DGA; 15 Constitución DGA; 16 Río Cipreces en Desagüe Laguna La Invernada DGA; 17 Río Claro En San Carlos DGA y 18 Los Cóndores DGA. Fuente: Elaboración propia. 103

Gráfico 27: Distribución temporal de la variación de temperatura en las Regiones del Ñuble y Biobío, donde Primavera 1 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de primavera entre 1985 – 1989; Primavera 2 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de primavera entre 1990 – 1999; Primavera 3 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de primavera entre 2000 – 2009 y Primavera 4 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de primavera entre 2010 – 2020. Las estaciones corresponden a: 1 Caracol DGA; 2 Coihueco Embalse DGA; 3 Diguillin DGA; 4 Parque Nahuelbuta DGA; 5 Alto Mallines DGA; 6 Río Biobío En La Culebra DGA; 7 Río Huequecura Aguas Arriba Embalse Angostura DGA; 8 Quilaco DGA y 9 Contulmo DGA. Fuente: Elaboración propia. 108

Gráfico 29: Variación de las precipitaciones medias para el período comprendido entre mayo y septiembre en la Región de Valparaíso. Donde el color rojo corresponde al promedio de las

precipitaciones acumuladas entre 1985 – 1989; el color verde corresponde al promedio de las precipitaciones acumuladas entre 1990 – 1999; el color morado corresponde al promedio de las precipitaciones acumuladas entre 2000 – 2009 y el color celeste corresponde al promedio de las precipitaciones acumuladas entre 2010 – 2020. 115

Gráfico 30: Variación temporal de las precipitaciones medias acumuladas para el período comprendido entre mayo y septiembre entre los años 1985 y 2020 en la Región de Valparaíso. 115

Gráfico 31: Variación de las precipitaciones medias para el período comprendido entre mayo y septiembre en la Región del Maule. Donde el color rojo corresponde al promedio de las precipitaciones acumuladas entre 1985 – 1989; el color verde corresponde al promedio de las precipitaciones acumuladas entre 1990 – 1999; el color morado corresponde al promedio de las precipitaciones acumuladas entre 2000 – 2009 y el color celeste corresponde al promedio de las precipitaciones acumuladas entre 2010 – 2020. 117

Gráfico 32: Variación temporal de las precipitaciones medias acumuladas para el período comprendido entre mayo y septiembre entre los años 1985 y 2020 en la Región del Maule. 118

Gráfico 33: Variación de las precipitaciones medias para el período comprendido entre mayo y septiembre en la Región del Maule. Donde el color rojo corresponde al promedio de las precipitaciones acumuladas entre 1985 – 1989; el color verde corresponde al promedio de las precipitaciones acumuladas entre 1990 – 1999; el color morado corresponde al promedio de las precipitaciones acumuladas entre 2000 – 2009 y el color celeste corresponde al promedio de las precipitaciones acumuladas entre 2010 – 2020. 120

Gráfico 34: Variación temporal de las precipitaciones medias acumuladas para período comprendido entre mayo y septiembre entre los años 1985 y 2020 en las regiones de Ñuble y Biobío. 121

Gráfico 35: Promedio de variaciones de temperaturas máximas por región y estación del año. Se puede observar que la Región de Valparaíso es la que presenta los mayores aumentos en la temperatura, en las diferentes estaciones climáticas entre los años 1985 y 2020. Fuente: elaboración propia. 122

Gráfico 36: Promedio de variaciones de temperaturas mínimas por región y estación del año. Se puede observar que la Región de Valparaíso es la que presenta una disminución de sus temperaturas en las cuatro estaciones analizadas, mientras que la Región del Biobío muestra un aumento de las mismas. Fuente: elaboración propia. 122

Gráfico 37. Evolución de las temperaturas máximas anuales. En el cuadrante A corresponde a la Región de Valparaíso. En el cuadrante B la Región del Maule. En el cuadrante C la Región de Ñuble y el cuadrante D corresponde a la Región del Biobío. Fuente: Elaboración propia. 123

Gráfico 38. Evolución de las precipitaciones anuales. En el cuadrante A corresponde a la Región de Valparaíso. En el cuadrante B la Región del Maule. En el cuadrante C la Región de Ñuble y el cuadrante D corresponde a la Región del Biobío. 125

INTRODUCCIÓN

Desde la Revolución Industrial, ocurrida entre 1840 y 1970, el consumo de combustibles fósiles se incrementó de manera exponencial. La transformación de avances tecnológicos, particularmente por motores de combustión interna, fue de tal importancia en la producción de bienes, que trajo consigo una gran cantidad de problemas ambientales y de contaminación, que perduran hasta la actualidad. Así, uno de los efectos más críticos ha sido la gran cantidad de contaminantes, particularmente, aquellos que actúan con la atmósfera y potencian el efecto de invernadero. Entre ellos se puede mencionar el vapor de agua (H₂O), el dióxido de carbono (CO₂), el óxido nitroso (N₂O), el metano (CH₄) y el ozono (O₃). El incremento de la cantidad de estos gases ha ido en aumento sostenido, lo que ha traído como consecuencia, el alza exponencial de la temperatura global del planeta.

Muchos estudios científicos han determinado que la temperatura global ha aumentado en 0,87°C al comparar los años 2006-2019 con el período 1850-1900, lo que ha tenido efectos colaterales en la precipitación y la variabilidad climática. El Panel Intergubernamental de Biodiversidad y Servicios Ecosistémicos (IPBES) concluyó que el cambio climático, entendido como el aumento de temperatura, los cambios en la precipitación y la variabilidad del clima, es la tercera amenaza más relevante contra la biodiversidad después de cambios en el uso del suelo, del mar y la explotación de organismos (Guevara-Ochoa C. et al 2020). El mismo informe, además, predice que ocurrirán grandes cambios en la biodiversidad si se consideran la cantidad de especies que perderán su hábitat y la transformación de un ecosistema a otro, sobre todo, si la temperatura global aumenta por sobre 1,5 °C. El mismo informe establece que cambios en las temperaturas y precipitaciones, pueden alterar los procesos fisiológicos de las especies, el comportamiento de los organismos, las interacciones entre ellas, la estructura y funcionamiento de los ecosistemas, junto con la distribución de las especies. De esta forma, una serie de especies se verán fuertemente afectadas por el aumento global de la temperatura

bajo los dos escenarios que se manejan, siendo las los insectos y las plantas, los más afectados, con un 6% (18%) y 8% (16%).

En este sentido, Chile no es ajeno al cambio climático. El Ministerio de Medio Ambiente, ha planteado diferentes proyecciones para ver cómo afectaría este fenómeno al país. Se han invertido grandes sumas de recursos en investigaciones y se creó el Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR) que reúne a investigadores de distintas disciplinas de las ciencias naturales y sociales que estudian cómo el cambio climático impacta a los ecosistemas y a la sociedad chilena.

Pese a lo anterior, es poca la información que existe referente al impacto del cambio climático en la vegetación nativa. Si bien, la conciencia actual de la dependencia de la sociedad en su relación con los bosques, sustenta las recientes iniciativas internacionales para detener la deforestación y aumentar la restauración de los más de dos mil millones de hectáreas de bosques degradados en todo el mundo (Meli P., Holl KD. et al 2017; Sherwood SC. et al 2020), aún existe limitada investigación en Chile dedicada a la detección de los efectos en los ecosistemas y biodiversidad, debido, sobre todo, a una carencia de estudios de largo plazo y disponibilidad de bases de datos robustas por parte de los organismos e instituciones responsables de mantenerlas. Específicamente de la zona de estudio, es decir, entre las regiones de Valparaíso y Biobío, no existen investigaciones sobre los efectos del cambio climático en la productividad vegetal del bosque nativo.

La mayoría de los estudios que existen en Chile y el mundo, están más bien dirigidos hacia la investigación del papel que juegan las plantas como fuentes de emisión o secuestro de carbono, como un controlador del cambio climático, contrario a lo que se plantea en este estudio. Es por esto, que esta investigación busca analizar si existe una relación entre el cambio climático y la productividad vegetal nativa, radicada en la obtención de información valiosa que sirve como insumo para la construcción de planes de adaptación al cambio climático, de acuerdo a lo planteado en la reciente ley N°21.455, que establece un marco jurídico para hacer frente a los

desafíos que presenta el cambio climático, con la finalidad de alcanzar y mantener la neutralidad de emisiones de gases de efecto invernadero al año 2050 en Chile. Ante esta problemática, la presente investigación busca comprobar la siguiente hipótesis: el cambio climático, incide directamente en la alteración de las variables del clima, afectando a los recursos naturales que interactúan con él, como el suelo y la biósfera en su conjunto, con lo cual las diversas formaciones vegetacionales nativas del territorio, muestran signos de susceptibilidad diferenciada ante la presencia de sequías y alzas de temperaturas, lo que se traduce en una reducción de la productividad y vigorosidad vegetal nativa.

Para ello, se buscó guiar la indagación con los siguientes objetivos: primero se describió y geoespacializó la distribución de las formaciones vegetacionales nativas susceptibles al cambio climático a lo largo de una variación de latitud del territorio. Luego, se recopilaron antecedentes climáticos cuantitativos de temperatura y precipitaciones, en un régimen temporal de 35 años, con la finalidad de poder identificar los cambios en los valores de temperatura máxima y mínima y precipitaciones, junto con las variaciones en su distribución geográfica.

Una vez analizados los parámetros anteriores, se identificó y analizó la variación en la productividad de biomasa y vigorosidad de la vegetación nativa, integrando finalmente todas las variables, en busca de nuevos conocimientos acerca de los impactos del cambio climático en la vegetación nativa, y sobre aquellos procesos desencadenantes de éstos.

De esta manera, el trabajo se estructura en tres capítulos, el primero trata sobre “Cambio climático y vegetación nativa” donde se describen las condiciones climáticas de Chile y el Mundo; el segundo capítulo trata sobre la “Distribución de las formaciones vegetacionales nativas susceptibles al cambio climático”, donde se describen las formaciones vegetacionales nativas en el área de estudio y un último capítulo, que trata sobre “Clima de Chile central y comportamiento de la temperatura y precipitaciones en un régimen temporal de 35 años”, donde se analizan las variaciones que han registrado las temperaturas máximas y mínimas en cada

estación del año, junto con la variación de las precipitaciones. Para esto se realizó un análisis temporal, donde se consideraron series climáticas de 35 años, comprendidas en el período de 1985 al 2020, obtenidas desde las estaciones meteorológicas de Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas de Chile. Bajo procedimientos estadísticos y geomáticos, se analizó, además, la productividad de la vegetación nativa de la zona central y centro sur del país, para evaluar la posible relación existente entre ésta y las variables de temperatura y precipitaciones.

Los resultados de esta tesis doctoral buscan aportar a la toma de decisiones en materias de adaptación al cambio climático. Chile posee una variada geografía que hace que cada región, sea un área de estudio diferente a cualquier otra, reforzando la importancia de contar con trabajos de este tipo, que aminoren las estandarizaciones de las proyecciones a gran escala, y permitan ver el detalle de estas, llegando a ser, incluso, contrarios a las estimaciones nacionales.

CAPITULO I

CAMBIO CLIMÁTICO Y VEGETACIÓN NATIVA

1.1 Cambio Climático: concepto y tendencias observadas

El clima juega un rol esencial sobre la vida en la Tierra. Es determinante en varios de los factores que condicionan el bienestar del ser humano: la alimentación, la salud y el medio ambiente, entre otros. La temperatura del planeta está determinada básicamente por la radiación proveniente del Sol y las propiedades de la Tierra y su atmósfera. Actualmente la temperatura global promedio de la superficie es cercana a los 15°C (Pinto, 2019).

El problema del cambio climático es altamente complejo y se le ha catalogado incluso como la más seria amenaza que ha enfrentado la humanidad, puesto que está afectando el acceso, disponibilidad y calidad de los elementos básicos para la vida, tales como: agua, alimentos y tierra (Pinto, 2019).

El Panel Internacional sobre Cambio Climático – IPCC (2019), define clima en un sentido estrecho como las condiciones medias de la atmósfera, o más rigurosamente como las descripciones estadísticas en términos de la media de una componente y su variabilidad sobre un período de tiempo determinado, variando desde meses hasta miles o millones de años. El período clásico para promediar esta variabilidad climática es 30 años, como lo define la Organización Meteorológica Mundial (OMM). Las variables más importantes son frecuentemente parámetros superficiales como temperatura, precipitación y vientos. Clima en un sentido más amplio es el estado del sistema climático incluyendo una descripción estadística.

En cuanto a la definición de cambio climático existen diversas definiciones que buscan resolver el cuestionamiento sobre el origen de este fenómeno. Una de ellas es la que entrega la Convención Marco sobre el Cambio Climático (CMCC), la cual define “cambio climático como un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se

suma a la variabilidad natural del clima observado durante períodos de tiempo comparables”. Por otro lado, según el IPCC (2019) cambio climático es un cambio en el estado del clima, y que puede ser identificado como cambios en la media y/o la variabilidad de sus propiedades que persisten por un período extendido de tiempo, típicamente décadas o más. En esta última definición, no se establece la responsabilidad al ser humano, sino más bien, sólo se destaca la variabilidad de los factores climáticos de forma sostenida, durante un periodo de tiempo. Ahora bien, si se considera que el clima es dinámico, ya que presenta variaciones cíclicas anuales y de mayor periodicidad, las que pueden ser causadas por fenómenos naturales como la erupción de volcanes, como lo han evidenciados las diferentes eras geológicas (González, M., Jurado, E., González, S., Aguirre, O., Jiménez, C.J., Navar, J., 2003; Rodriguez et al 2015), podría considerarse entonces que el cambio climático no tiene su origen en la actividad humana necesariamente, sino más bien, es el calentamiento global, el que causa estos cambios. Para Rodriguez et al (2015) lo que está generando el cambio climático es el calentamiento global, producto del efecto invernadero que causan ciertos contaminantes.

Cabe precisar que la Tierra cuenta con un sistema de regulación de temperatura, dado por la atmósfera, la cual actúa como paraguas frente a la radiación solar, generando un efecto invernadero natural. Los gases más eficientes en absorber el calor se llaman gases de efecto invernadero o gases de invernadero, siendo entre ellos: Vapor de agua (H₂O), Dióxido de carbono (CO₂), Metano (CH₄), Óxidos de nitrógeno (NO_x) y Ozono (O₃) (Hernández, 2021). Si a este sistema natural, se le agregan gases contaminantes con el mismo efecto invernadero, provenientes de la quema de combustible fósiles y otras actividades antropogénicas, trae como consecuencia el aumento de la temperatura de la superficie de la Tierra de manera sostenida en las últimas décadas (Garreaud, 2011). El incremento de los Gases de Efecto Invernadero (GEI) en la atmósfera, especialmente el dióxido de carbono (CO₂), comenzó a ser importante y significativa a mediados del siglo XIX debido a la revolución industrial y el proceso de industrialización (Hernandez, 2020; Rodriguez y Mance, 2009) y el uso de combustibles fósiles, siendo ésta última, el

responsable de más del 50% de la contaminación que existe en la atmosfera. Las emisiones globales de GEI en 2017 (37 Gt CO₂) fueron casi veinte veces superiores a las de 1900 (2 Gt CO₂) (Pinto, 2019) (ver gráfico n°1 y 2).

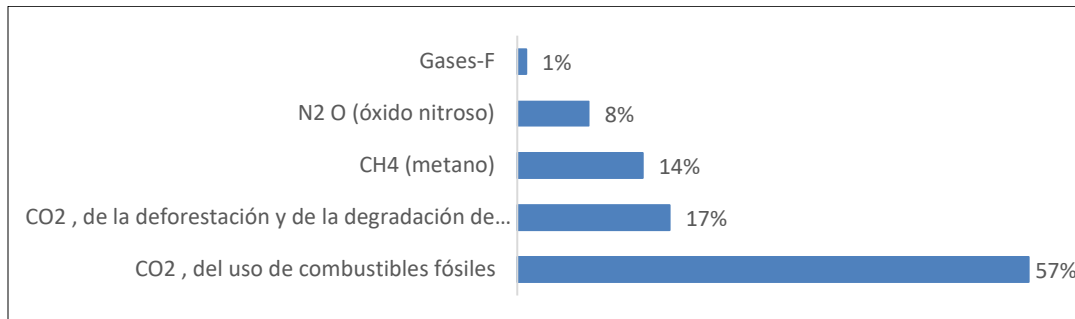


Gráfico 1: Parte proporcional que representan diferentes GEI antropogénicos. Fuente: elaboración propia con datos del IPCC 2021.

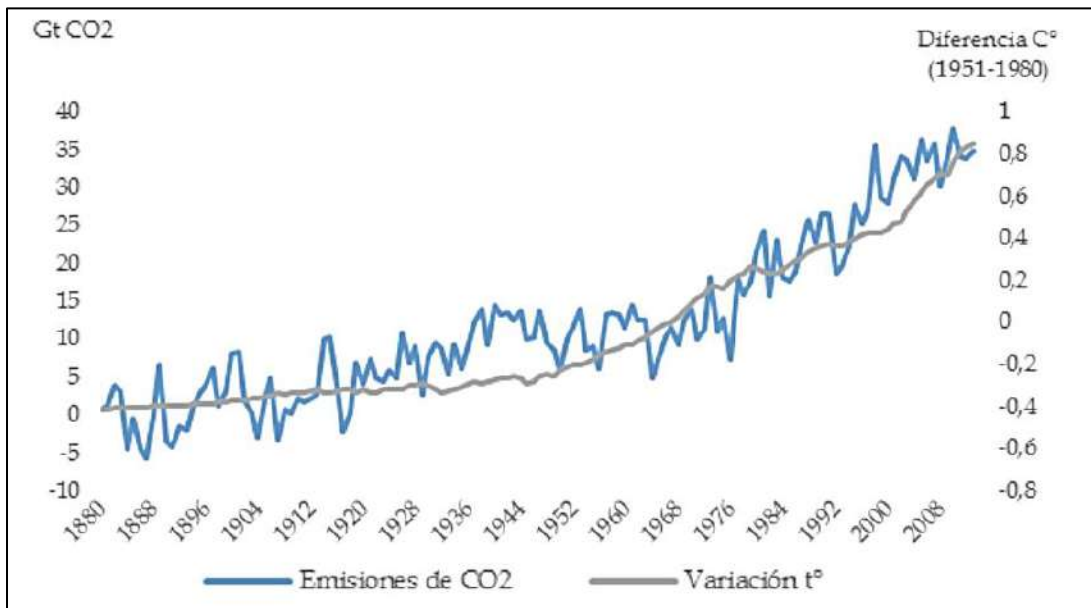


Gráfico 2: Emisiones de CO₂ y variación de la temperatura global. Fuente: Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC) y National Aeronautics and Space Administration (NASA), 2018.

Según Garreaud, 2011 “sobre la base del balance radiativo de la atmósfera, existen consideraciones robustas que indican que un aumento de la concentración del CO₂ genera un aumento en la temperatura superficial del planeta. Este aumento se ve incrementado por retroalimentaciones dentro del sistema terrestre”. El Informe especial del IPCC (2007) sobre escenarios proyecta un aumento de las emisiones

mundiales de los gases de efecto invernadero de entre 25% y 90% entre los años 2000 y 2030, suponiendo que los combustibles de origen fósil mantengan su posición dominante en el conjunto mundial de fuentes de energía hasta 2030 como mínimo (Hernandez, 2020).

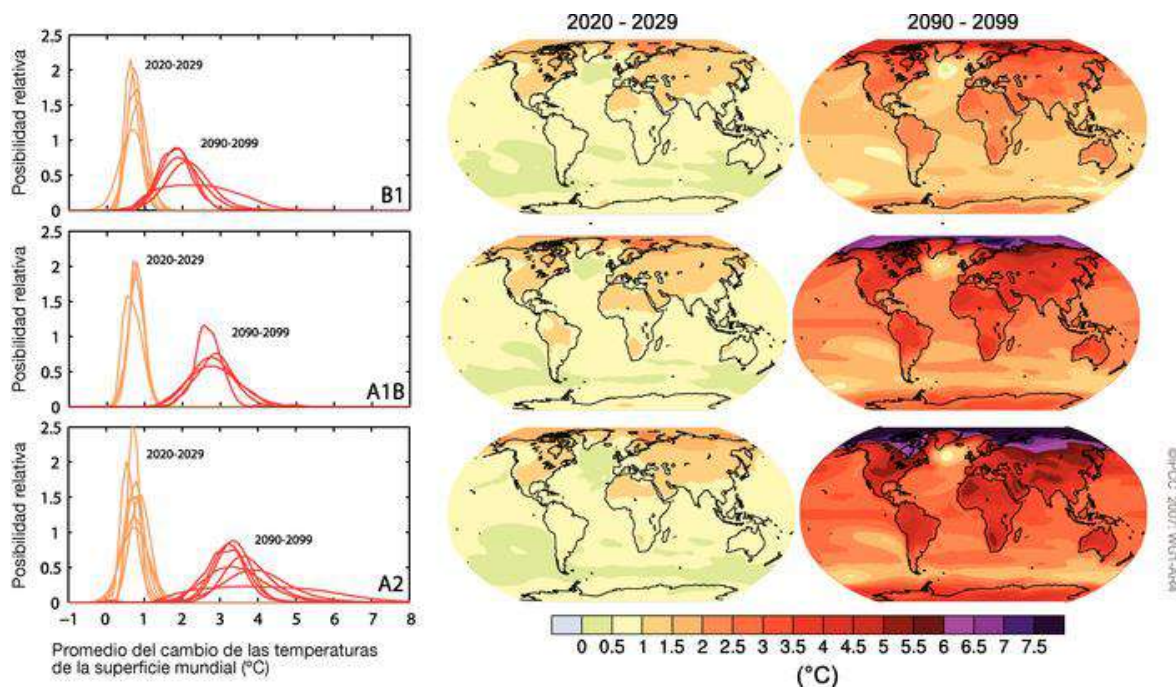
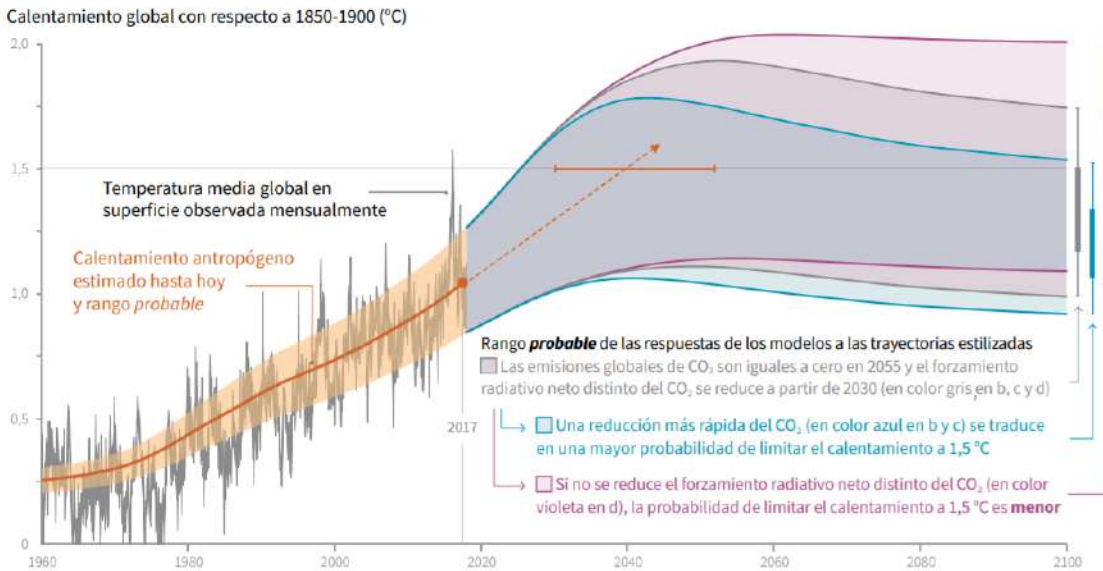
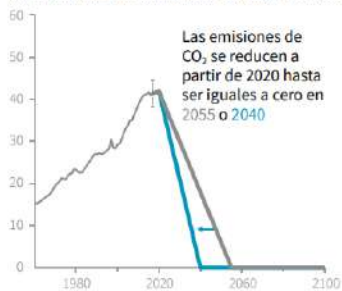


Figura 1: Cambios de temperatura proyectados para principios y finales del siglo XXI con respecto al periodo 1980–1999. Los paneles centrales y el derecho muestran el promedio de las proyecciones multimodelos MCGAO para los escenarios IE-EE I B1 (arriba), A1B (en el medio) y A2 (abajo) promediados en los decenios 2020–2029 (centro) y 2090–2099 (derecha). Los paneles a la izquierda muestran las incertidumbres correspondientes como probabilidades relativas del calentamiento medio mundial estimado en varios estudios de MCGAOs y del Modelo del Sistema Terrestre de Complejidad Intermedia para los mismos periodos. Algunos estudios solo presentan los resultados de un subconjunto de escenarios del IE-EE, o de varias versiones de los modelos. Por tanto, la diferencia en el número de curvas mostradas en los paneles de la izquierda sólo se debe a diferencias en la disponibilidad de los resultados. Fuente IPCC, 2019.

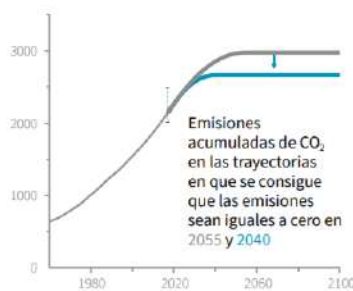
a) Cambio en la temperatura global observada y respuestas de los modelos a las trayectorias estilizadas de las emisiones antropógenas y del forzamiento



b) Trayectorias estilizadas de las emisiones globales netas de CO₂
Miles de millones de toneladas de CO₂ al año (GtCO₂/año)



c) Emisiones netas acumuladas de CO₂
Miles de millones de toneladas de CO₂ al año (GtCO₂/año)



d) Trayectorias del forzamiento radiativo distinto del CO₂
Wattios por metro cuadrado (W/m²)

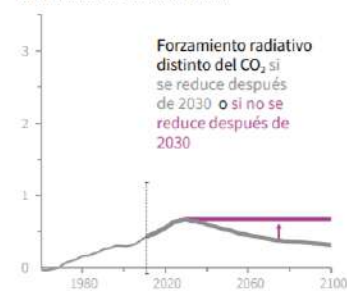


Gráfico 3: Cambio en la temperatura media global en superficie observada mensualmente. Fuente, IPCC 2019.

Como se ha mencionado con anterioridad, una de las consecuencias directas que general el calentamiento global, es el cambio climático, referido básicamente, en el aumento sostenido que han tenido las temperaturas (superficiales y oceánicas) en todo el planeta. La temperatura y la precipitación son los elementos climáticos más analizados ya que, como en el resto del planeta, cuentan con bases de datos más largas y fiables y, por tanto, en los que mejor pueden evaluarse los cambios o tendencias (Díaz-Pachejo, J. et al. 2018).

De acuerdo al informe *Global Climate Change Impacts in the United State* del Programa para el Cambio Climático de Naciones Unidas publicado el 2013 “cada una de las últimas tres décadas ha sido sucesivamente más cálida en la superficie de la Tierra que en cualquier década anterior desde 1850”, el decenio 2006-2015 fue 0,87 °C más alta que el anterior, y es que la Tierra se ha en un promedio de 0,85 °C por decenio, entre 1880 y 2012, pudiendo alcanzar un aumento de 1,5 para el año 2030 – 2050 según el IPCC (2019) (ver gráfico 3) (ver figura 1). Estudios a lo largo de la costa extra tropical de Sudamérica, realizados durante los años 90 mostraron que, a partir de los años ‘40 o ‘50, la temperatura media superficial mostró un régimen relativamente estacionario, con excepción de la región centro-sur, donde la temperatura media mostró un marcado descenso. Sin embargo, esta situación cambió en forma relativamente abrupta a contar de mediados de los años 70 (Ministerio de Agricultura – Ministerio de Medio Ambiente, 2012).

1.2 Cambio climático en Chile

Gran parte de la información disponible sobre el cambio climático en Chile ha sido recopilada por la Oficina de Cambio Climático del Ministerio de Medio Ambiente (MMA), con el fin de dar respuesta a la Secretaría de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC).

Si bien Chile no es un gran contribuyente a las emisiones de gases de efecto invernadero, sin embargo, es uno de los países más vulnerables a sus efectos, debido a su alta exposición geográfica y sus altos índices de contaminación atmosférica urbana, condición que se agudiza si se suma el hecho de que es una de las naciones más inequitativas del mundo en su distribución de ingresos. (Pinto, 2019).

De acuerdo al “Estudio de la variabilidad climática en Chile para el siglo XXI” desarrollado por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile el año 2006, la zona central de Chile existe un ciclo anual de precipitaciones bien definido, caracterizado por un máximo invernal y un período estival con un monto

significativamente menor que va aumentando hacia el sur. Sin embargo, de acuerdo al mismo estudio, entre los años 1930 y 2000 las precipitaciones en la misma zona, muestran una clara tendencia a la disminución hasta aproximadamente 1970, pero una mayor frecuencia de inviernos relativamente lluviosos en las décadas siguientes, lo que ha contribuido a revertir en parte la tendencia decreciente del período anterior.

El aumento de la aridez y la mega-sequía que afecta al país desde las regiones de Coquimbo a Biobío, en los últimos 10 años, han marcado la diferencia con las décadas anteriores, con un caso extremo en Talca, donde cada año hay más días de calor, por sobre el promedio a nivel mundial.

La estimación de las variaciones climáticas para Chile resulta compleja, debido a que la escasa información disponible representa una fuente de error importante (Fuenzalida et al, 1989), existen avances importantes en materia de disponibilidad de datos para la realización de modelos climatológicos y variabilidad climática. En este sentido, el Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2 ha permitido mejorar las predicciones relacionadas con cambio climático para Chile, creando en conjunto con el Ministerio de Medio Ambiente, el *Atlas de Riesgo Climático* en el año 2020. Así, de acuerdo a la información disponible, en las comunas de la zona central y centro sur, ha habido un fuerte aumento de la sequía¹ en los últimos 30 años. Para la realización del atlas, se calcularon índices para estimar la sequía. Mientras más cercano a 1,0 el valor, se considera más severo. Así, de acuerdo a los valores entregados, en la zona centro y centro sur se obtuvieron valores entre 0,8 y 1,00.

La zona centro-sur de Chile lleva una década con déficit de precipitaciones de entre 25% y 30%, lo que la convierte en la década más seca desde que existe registro. Trabajos científicos han demostrado que una parte de esta sequía meteorológica

¹ Calculada como una probabilidad de excedencia alta para los caudales medios anuales y el número de días promedio en los cuales la cuenca se encuentra en una condición de sequía, es decir, cuando escurre un caudal menor al histórico para un periodo del año determinado (promedio para todo el periodo histórico/futuro).

se debe a la acción humana por medio del cambio climático global. Esta sequía, sumada al aumento de las temperaturas, ha impactado con fuerza el régimen de caudales, cuyo déficit varía entre 70% en los ríos de las regiones de Coquimbo y Valparaíso, a valores cercanos al 25% hacia el sur durante el período 2010-2014 (Rojas M., P. Aldunce, L. Farías, H. González, P. Marquet, J. C. Muñoz, R. Palma-Behnke, A. Stehr y S. Vicuña, 2019).

A fines de la década de los 80', Fuenzalida et al, planteaban que para el año 2050 las temperaturas aumentarían entre 2 a 3°C en la región norte, 3°C para el centro del país, 4°C en el sur y 5°C en su extremo austral, indicando que el calentamiento máximo ocurriría a los 70 grados de latitud para luego disminuir hacia el Polo.

Estudios predictivos realizados por el Ministerio de Medio Ambiente, el año 2006, donde se encargó un estudio sobre los escenarios de Cambio Climático nacional, arrojó escenarios aumentos de temperatura en todas las regiones del territorio nacional, entre 2°C y 4°C, siendo más acentuado hacia las regiones andinas, y disminuyendo de norte a sur. Sólo en la Región Austral, habría sectores pequeños con calentamiento menor a 1°C. Estacionalmente, el calentamiento es mayor en verano, excediendo los 5°C en algunos sectores altos de la Cordillera de los Andes.

En cuanto a las precipitaciones, existe una gran influencia de la Cordillera de los Andes, que divide las tendencias en aumentos hacia Argentina, y disminuciones hacia Chile, particularmente en latitudes medias y en las estaciones de verano y otoño. En el altiplano se prevé un aumento de precipitaciones en primavera, mientras que en el norte Chico las precipitaciones aumentan entre los 20 y 33°S en otoño, pero en invierno esto sólo afecta la región andina. En la zona central de Chile tienden a producirse disminuciones que pueden llegar al 40% en las tierras bajas. En la región sur, la precipitación tiende a mantenerse en invierno y otoño, pero a disminuir cerca del 40% y 25% en verano y primavera respectivamente (Cifuentes y Meza, 2008).

El incremento de los GEI en la atmósfera en los últimos 200 años se debe a las actividades humanas, como combustión del carbón, petróleo y gas natural, el

aumento de metano y óxido nitroso debido a la agricultura y a los cambios de uso del suelo, el aumento de la concentración de ozono generado por los escapes de gases de los autos y otras fuentes, y de los gases industriales de larga vida. Estas variaciones están cambiando la forma en que la atmósfera absorbe la energía a una velocidad sin precedentes, provocando un incremento del efecto invernadero. Al haber mayor concentración de GEI, se retiene una mayor proporción de la radiación solar que la tierra reemite a la atmósfera, aumentando la temperatura sobre la superficie.

1.3 Biomasa y productividad primaria neta (NPP)

Los espacios naturales están conformados por ecosistemas, y estos a su vez por recursos naturales de tipo biótico y abiótico. La vegetación natural, entendida como aquella que no ha sido intervenida por el ser humano, se despliega sobre el territorio con características propias dependiente de factores botánicos, climáticos y edafológicos. De modo que, los impactos que pudiese tener el cambio climático sobre los recursos naturales, dependerán también de las características estructurales de la vegetación, su clasificación y tipología botánica y las relaciones ecológicas que las especies o biomas establecen con su entorno. Los ecosistemas naturales son fundamentales en el balance global, como depósitos de carbono atmosférico (Yepes, A., & Buckeridge, M. S., 2011).

Los cultivos y la vegetación natural crecen y se adaptan a sistemas con rápidas transformaciones en el tiempo. Así, la conveniencia en predecir la productividad primaria neta ha restablecido el interés en los estudios de la fotosíntesis, a fin de evaluar cambios en la asimilación fotosintética de CO₂ en los diferentes procesos vegetales (Yepes, A., & Buckeridge, M. S., 2011). El CO₂ es utilizado por las plantas para hacer fotosíntesis, que es el proceso por el cual las plantas producen compuestos orgánicos usados para su crecimiento y desarrollo.

De acuerdo a Buckeridge (2008) el 40% de la masa seca de las plantas consiste en carbono fijado mediante la fotosíntesis. Una vez que los productos de la fotosíntesis son convertidos en celulosa, se habla de secuestro de carbono. Es aquí que radica la importancia de estudiar la disminución de la biomasa por efecto del cambio climático. Por tanto, es fundamental identificar y caracterizar la vegetación natural y los biomas que conforman, identificando aquellas especies constitutivas de la formación, su localización y aspectos que las relacionan con el clima. Una variable propia del comportamiento fisiológico de una especie es su productividad primaria neta terrestre-NPP (Net Primary Productivity, por sus siglas en inglés), que se define como la biomasa acumulada en un intervalo de tiempo (Δt), junto a la acumulación de hojarasca medida en gramos de biomasa almacenada por unidad de superficie producida, en el lapso de un año ($\text{gr/m}^2/\text{año}^{-1}$), o bien en sus unidades equivalentes (ton/ha/año^{-1}).

En otras palabras, la productividad primaria neta es la tasa a la que la energía es almacenada como biomasa por las plantas y otros productores primarios, y que está a disposición de los consumidores del ecosistema (Hernández-García, M. Á.; Granados-Sánchez, D. y Sánchez-González, A. 2003).

Para el caso de Chile Central y Centro Sur, durante el periodo estival, la baja disponibilidad hídrica del suelo, en conjunto con las altas temperaturas y radiación solar de la estación, favorecen la aparición del estrés hídrico en los bosques nativos. Éste es uno de los factores más limitantes del crecimiento, composición y distribución de las especies vegetales, ya que afecta varios aspectos de su funcionamiento, desde el metabolismo celular (incluyendo la fotosíntesis), hasta el crecimiento vegetativo (Peña-Rojas, K.; Donoso, S.; Gangas, R.; Durán, S. e Ilabaca, D., 2018).

Según el estudio “Efectos de la sequía en las relaciones hídricas, crecimiento y distribución de biomasa en plantas de *peumus boldus molina* (monimiaceae) cultivadas en vivero” realizado por Peña-Rojas, K.; Donoso, S.; Gangas, R.; Durán, S. e Ilabaca, D. el año 2018, existe una disminución significativa del incremento de

las especies en diámetro, cuando las plantas fueron sometidas a restricción hídrica. Es decir, mientras menos disponibilidad de agua presente el suelo (período de estrés hídrico) la biomasa se ve disminuida, en particular, la capacidad de acumulación de biomasa aérea y radical, lo que implica que este tipo de vegetación nativa esclerófila se adapta a condiciones de sequía, concentrando su crecimiento en raíces profundas que le permitan alcanzar zonas más húmedas y frescas en el suelo, ayudándolas a sobrevivir a la falta de precipitación y aumento de temperatura.

De los ecosistemas terrestres, los bosques representan importantes reservorios de carbono, ya que les corresponde 80 % del total contenido en los ecosistemas terrestres; dentro de ellos se identifica a la vegetación y a los suelos como los depósitos más significativos de dicho elemento químico (Romero, 2016).

Por lo tanto, la productividad primaria neta es una variable ecológica fundamental que se relaciona directamente con los bienes y servicios proporcionados por los ecosistemas, tales como la producción de madera, la producción agrícola, el secuestro de carbono y la reducción del riesgo de desertificación, entre otros. Conocer la productividad primaria neta y su evolución futura también es esencial para ajustar los valores de explotación de los ecosistemas forestales y agrarios a niveles sostenibles. A lo largo del presente siglo se reducirá la capacidad potencial de los ecosistemas terrestres para producir biomasa, según el modelo climático ECHAM4 (Alvarez-Uría, P.; Prieto del Campo, F. y Ruiz, P.; De Zavala, M., 2007).

En conclusión, si bien la vegetación nativa se comporta como una fuente de absorción de CO₂, las perturbaciones (naturales o antrópicas) motivan con frecuencia que los bosques se conviertan en fuentes emisoras de CO₂ (Rosas, M. L., Arango, G., & Andrade, G., 2002). En este caso, el cambio climático está generando perturbaciones en las condiciones atmosféricas lo que está afectando el desarrollo de bosques nativos.

1.4 Herramientas de teledetección: sensores remotos de vegetación

Los sensores remotos de vegetación son instrumentos de medición a distancia, montados en satélites artificiales y lanzados al espacio para registrar la dinámica de la vegetación terrestre, en términos de incrementos de biomasa, vigor de la vegetación, condiciones de sequía y distribución espacial, mediante la captura de la reflectancia que emiten las plantas cuando son iluminadas por la luz solar. Esta estrategia permite capturar una gran cantidad de datos espaciales y temporales de alta resolución reduciendo los costos de captura de información. Incluso muchos satélites como LANDSAT, permiten el acceso sin ningún costo a datos del espectro visible y multiespectrales. Una variable importante de los satélites es la resolución de sus píxeles o unidades de medición, que capturan información espacial con resoluciones de 30m² para LANDSAT y 500 m² para sensores MODIS, todo muy relacionado con la escala de medición que se desee trabajar. Para condiciones de agricultura de precisión se están desarrollando sensores cada vez más específicos cuya resolución espacial puede ser hasta submétrica, como es el caso de los sensores instalados en drones o vehículos aéreos no tripulados, UAS (Unmanned Aerial Systems).

De igual manera, el período de la órbita está definido en cada satélite, algunos establecen registros diarios, mientras que otros establecen registros cada 15 días e incluso mensuales. Las bandas radiométricas típicas de los sensores son banda azul (450-510 nm), banda verde (510-580 nm), banda roja (630-690 nm) e infrarojo cercano (770-895 nm) (Xue, J., and Su, B., 2017). Para el caso de los sensores de vegetación específicos se requieren calidad de luz particulares dado que el tipo de especie y el contenido de agua de las hojas altera los patrones de emisividad radiométrica.

Uno del índice de mayor importancia para caracterizar el estatus de la vegetación es el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada-NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), modelado matemáticamente como una tasa o ratio entre las

bandas radiométricas del rojo y el infrarrojo cercano, utilizado para caracterizar directamente crecimiento o vigor de la canopia de una formación vegetal. Por lo tanto, gran parte de la información relacionada con las hojas de las plantas se interpreta como variaciones o alteraciones de las bandas espectrales de emisión, como consecuencia de los estrés o impactos que afectan a la vegetación. Para validar o calibrar estos registros se requieren datos de terreno que permitan confirmar la exactitud o precisión de la información capturada remotamente. Es posible entonces determinar en terreno a través de parcelas experimentales, índices de área foliar, coberturas vegetacionales, biomasa, crecimiento y vigor de la vegetación (Xue, J., and Su, B., 2017).

Los cambios climáticos afectan el estatus de la vegetación en dos sentidos: 1] en el largo plazo (>30 años) afectan la biomasa en pie y 2] en el corto plazo producen variaciones estacionales e interanuales de importancia (Xue, J., and Su, B., 2017).

Actualmente, se utilizan sensores remotos, montados en satélites de prospección espacial que realizan mediciones radiométricas avanzadas de alta resolución (AVHRR, Advanced Very High Resolution Radiometer), para estimar variables vegetacionales como el índice de vigor NDVI. Con ello, es posible construir modelos de simulación de la productividad primaria neta de la vegetación-NPP, a partir de píxeles nominales de 1x1 km², compatible con un nivel nacional de prospección y con las escalas a las cuales se generan los incendios forestales de gran envergadura (> 200 ha) (B.D., Amiro, J. M., Chen & J. Liu, 2000).

Hacia el Ecuador los valores de NPP son más altos, dado que se incrementa la biomasa, mientras que hacia los polos los valores son bajos por reducción de la capacidad fotosintética de las plantas debido a las bajas temperaturas. Por lo tanto, existe una relación directa entre la biomasa de la formación vegetal o bioma y el valor de NPP. De igual modo, a mayor densidad de plantas, mayor biomasa y por ende mayor NPP. La densidad de plantas a su vez dependerá de la cobertura vegetal, íntimamente ligada a los patrones de distribución de la vegetación, y éstos relacionados con la precipitación del área geográfica. A menor precipitación

menor NPP y viceversa (Boeken B., 2018). La tabla n°1 registra valores de NPP por unidad de superficie para distintos biomas terrestres a fin de hacer comparables los registros entre formaciones vegetacionales diferentes.

Tipo de Bioma	Valor de NPP aérea		Fuente
	(gr C m ⁻² año ⁻¹)		
	Máximo	Mínimo	
Bosque Boreal Siempreverde	439	120	Gower et al., (2001)
Bosque Boreal Caducifolio	635	169	Gower et al., (2001)
Templado Siempreverde	1.555	60	Gower et al., (1996)
Templado Caducifolio	555	230	Gower et al., (2001)
Templado Subalpino	190	36	Hansen et al., (2000)
Tropical Siempreverde	1.505	140	Clark, et al., (2001)
Tropical Subalpino	S/I	S/I	Gower et al., (2001)
Tropical Montano	956	390	Kitayama & Aiba, (2002)
Manglares	1.350	305	Sherman et al., (2003)

Tabla 1: Valores de NPP para biomas terrestres. Fuente: Kloeppel, B.D.; M.E. Harmon; T.J. Fahey. 2007.

CAPÍTULO II

DISTRIBUCIÓN DE LAS FORMACIONES VEGETACIONALES NATIVAS SUSCEPTIBLES AL CAMBIO CLIMÁTICO

2.1 Área de Estudio

El área de estudio comprende las regiones de Chile Central y Centro Sur, a partir de la Región de Valparaíso, excluyendo las Regiones Metropolitana de Santiago y Región de O'Higgins, e incorporando más al sur la Región del Maule, Región de Ñuble y Región del Biobío, ubicadas entre los paralelos 32' y 38' de latitud Sur y los meridianos 70' 14" y 74' 00" de longitud Oeste, (Figura 2).



Figura 2: Mapa de ubicación del área de estudio. Fuente: elaboración propia.

Dado que el objetivo de este estudio fue determinar los efectos del cambio climático en la dinámica de formaciones vegetacionales evaluando la productividad de una formación vegetacional y las variables de temperatura máxima y precipitación anual inducidos por el cambio climático en una variación de latitud del territorio; se definieron polígonos de vegetación donde ésta no hubiese sido afectada por incendios forestales o la acción antrópica, de modo de poder relacionar su variabilidad sólo con el cambio climático.

2.2 Clima de Chile Central y Zona Centro Sur

Por la gran extensión de norte a sur, Chile cruza casi todas las zonas climáticas de la Tierra, faltándole sólo una zona de clima tropical. La temperatura media anual desciende desde 18°C en promedio en el extremo norte hasta 6°C en el extremo sur (Hoffmann, A y Armesto, J. 2018). Las precipitaciones varían desde 0 mm en el norte, hasta un máximo de 6.000 mm en zonas como Chiloé. Según la clasificación climática de Köppen, Chile presenta cuatro grandes categorías de climas distribuidas de norte a sur: Clima Árido Subtropical, Clima Templado Cálido con Humedad Suficiente, Clima Templado Lluvioso y Clima de Hielo (Barrenechea, F. 2020).

En general, las variaciones y valores medios de los diferentes climas dependen de una serie de factores como la latitud, el relieve y las corrientes marinas. La temperatura y las precipitaciones se ven directamente influenciadas por estos factores, dándose en una misma región, variaciones tanto latitudinales como longitudinales, identificándose una serie de microclimas que muestran marcadas diferencias entre la zona cordillerana y la zona costera, dentro de una misma región (Barrenechea, F. 2020).

2.3 El bosque Esclerófilo y Nativo de Chile Central

El esclerófilo, obedece su nombre a la palabra proveniente del griego sklērós “duro” y phýllon que significa “hoja” (Gómez, E. G., 2022), se encuentra sólo en cinco lugares del mundo: Sudáfrica, California, Australia y la cuenca del Mediterráneo y Chile.

El bosque esclerófilo cuenta con especies de hojas duras y entrenudos cortos, lo que les permite adaptarse sin problemas a climas del tipo mediterráneo, que pueden crecer en lugares con inviernos lluviosos y veranos secos, en condiciones semiáridas; soportar prolongados períodos de sequía y fuertes diferencias de temperaturas entre el día y la noche (Gómez, E. G., 2022).

Así, estas especies están adaptadas para soportar períodos de estrés hídrico con hojas verdes todo el año. Sus raíces profundas permiten que capten agua de las napas subterráneas y así no depender solo de las precipitaciones (Gómez, E. G., 2022).

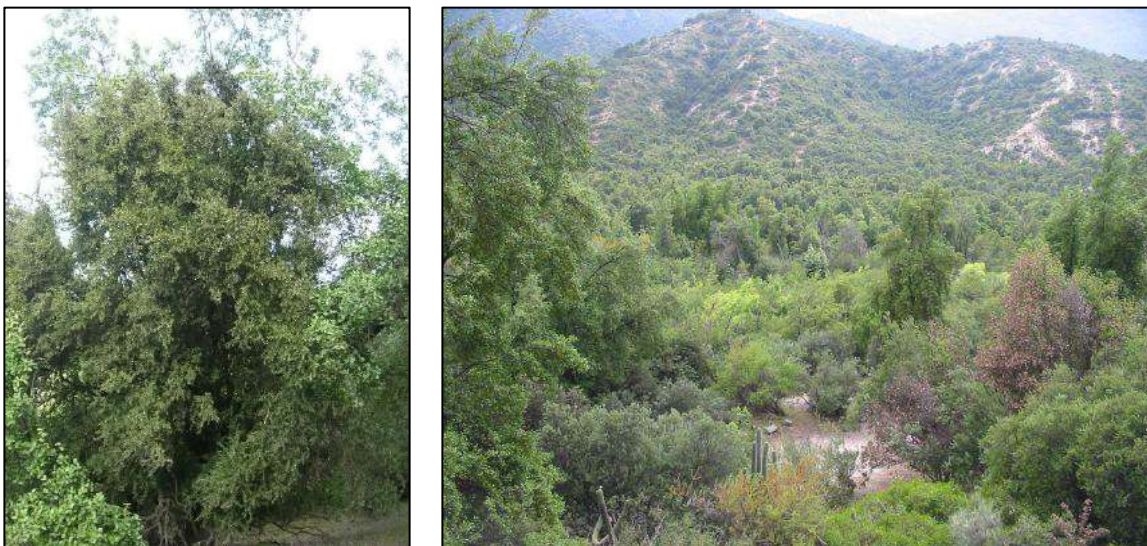


Figura 3 y 4: Especie de bosque esclerófilo. Fuente: elaboración propia, Fundación Terracam.

Este ecosistema se distribuye en Chile central desde aproximadamente los 31°S hasta los 37°S, dentro de una región dominada por un clima de tipo Mediterráneo, y es dominado por diversas formas de vida, desde arbustos espinosos hasta especies arbóreas esclerófilas y laurifolias (Becerra, P., Smith-Ramírez, C. y

Arellano, E., 2018) (ver tabla n°2). Estas regiones han sido reconocidas como hotspots de biodiversidad con prioridad de conservación ya que albergan aproximadamente el 20% de todas las plantas existentes en el planeta y presentan además altos índices de endemismo (Rodríguez, R. S/A). Más aún, los bosques esclerófilos de Chile son el tipo de ecosistema que más se ha reducido en superficie en el país (Luebert & Pliscoff 2005).

Zona Central			
Zona de Quebradas			
Formación	Nombre científico	Nombre vulgar	
Bosque Esclerófilo	<i>Persea lingue</i>	Lingue	
	<i>Cryptocaria alba</i>	Peumo	
	<i>Luma chequén</i>	Chequén	
	<i>Luma apiculata</i>	Arrayán	
	<i>Drymis winteri</i>	Canelo	
	<i>Beilshmiedi miersii</i>	Belloto	
	<i>Blepharocalyx cruckshanskii</i>	Temu	
	<i>Crinodendron patagua</i>	Patagua	
	Zona de umbría		
		<i>Quillaja saponaria</i>	Quillay
	<i>Lithraea caustica</i>	Litre	
	<i>Cryptocarya alba</i>	Peumo	
	<i>Escallonia pulverulenta</i>	Corontillo	
	<i>Schinus latifolius</i>	Molle	
	<i>Sophora macrocarpa</i>	Mayu	
	<i>Peumus boldus</i>	Boldo	
	<i>Azara petiolaris</i>	Maquicillo	
Zona de solana			
	<i>Puya berteroaana</i>	Chagual	
	<i>Echinopsis chiloensis</i>	Quisco	
	<i>Colletia spinosa</i>	Crucero	
	<i>Colliguaja odorífera</i>	Colliguay	
Topografía plana del valle central			
	<i>Porlieria chilensis</i>	Guayacán	
	<i>Prosopis chilensis</i>	Algarrobo	
	<i>Maytenus boaria</i>	Maitén	
	<i>Proustia cuneifolia</i>	Huañil	
	<i>Baccharis linearis</i>	Romerillo	
	<i>Peumus boldus</i>	Boldo	
	<i>Cryptocarya alba</i>	Peumo	
	<i>Schinus latifolius</i>	Molle	
Bosque Esclerófilo	Formaciones con Palma Chilena		
	<i>Jubaea chilensis</i>	Palma chilena	
	<i>Quillaja saponaria</i>	Quillay	
	<i>Lithraea caustica</i>	Litre	
	<i>Cryptocarya alba</i>	Peumo	
	<i>Acacia caven</i>	Espino	
	<i>Maytenus boaria</i>	Maitén	
Matorral	<i>Adesmia microphylla</i>	Palhuen	

	<i>Echinopsis chiloensis</i>	Quisco
	<i>Puya chilensis</i>	Chagual
	<i>Lithraea caustica</i>	Litre
	<i>Acacia caven</i>	Espino
Bosque caducifolio	Valle Central	
	<i>Nothofagus macrocarpa</i>	Roble de Santiago
	<i>Nothofagus glauca</i>	Hualo
	<i>Nothofagus obliqua</i>	Roble
	<i>Nothofagus alpina</i>	Raulí
	<i>Lithraea caustica</i>	Litre
	<i>Azara petiolaris</i>	Maquicillo
	<i>Quillaja saponaria</i>	Quillay
	<i>Cryptocarya alba</i>	Peumo
Plantación forestal	<i>Pinus radiata</i>	Pino insigne
	<i>Eucalyptus globulus</i>	Eucalipto
	<i>Eucalyptus nitens</i>	Eucalipto
Zona Centro Sur		
Formación	Pluviselva Valdiviana	
Bosque caducifolio	<i>Nothofagus alpina</i>	Raulí
	<i>Cryptocarya alba</i>	Peumo
	<i>Nothofagus nervosa</i>	Raulí
	<i>Nothofagus dombeyi</i>	Coihue
	<i>Nothofagus obliqua</i>	Roble
	<i>Persea lingue</i>	Lingue
	<i>Aextoxicon punctatum</i>	Olivillo
	<i>Laurelia sempervirens</i>	Laurel
	<i>Gevuina avellana</i>	Avellano
	<i>Luma apiculata</i>	Arrayán
	<i>Drymis winteri</i>	Canelo
	<i>Laureliopsis philippiana</i>	Tepa
	<i>Eucryphia cordifolia</i>	Ulmo
	<i>Weinmannia trichosperma</i>	Tineo
Bosque siempreverde	Cordillera de la Costa	
	<i>Aextoxicon punctatum</i>	Olivillo
	<i>Myrceugenia planipes</i>	Peta
	<i>Luma apiculata</i>	Arrayán
	<i>Hymenophyllum spp</i>	Helechos
	<i>Blechnum spp</i>	Helechos
	<i>Nothofagus dombeyi</i>	Coigue
	<i>Eucryphia cordifolia</i>	Ulmo
	<i>Laureliopsis philippiana</i>	Tepa
	<i>Lomatia hirsuta</i>	Radal
	<i>Saxegothaea conspicua</i>	Mañío

Tabla 2: formaciones vegetacionales zona central y sur. Fuente: SAG, (2014)., Prado, (2013).

Diversos estudios han demostrado que el cambio climático tiene un efecto en el desarrollo de los países y repercute en el medio ambiente de forma irreversible. Una consecuencia de éste es la modificación de la distribución estadística de los patrones atmosféricos. Esto es de suma gravedad dado que el aumento de las temperaturas y las fluctuaciones de las precipitaciones podrían afectar la producción

de cultivos (Alae-Carew, C., Nicoleau, S., Bird, F. A., Hawkins, P., Tuomisto, H. L., Haines, A., ... & Scheelbeek, P. F. (2020); Thornton PK, Ericksen PJ, Herrero M, Challinor AJ (2014)) y la disponibilidad de agua, afectando así en gran medida a la población mundial. Por otro lado, son muchos los investigadores y documentos científicos que señalan los efectos que está provocando el cambio climático sobre los bosques y formaciones vegetacionales del planeta, generan impactos que repercuten en la vegetación, el suelo, el agua, el propio clima y, en última instancia, en el ser humano y sus prácticas de uso y manejo de recursos naturales (Meli, P et al (2017); Jiménez-Muñoz, J. C. et al (2016); Alvarez-Maldini, C., et al (2020)). En el Reino Unido por ejemplo el incremento de temperaturas y el cambio de la estacionalidad de las lluvias ha generado modificaciones en las practicas silviculturales.

Tipos de Vegetación	Superficie según tipo de vegetación
	(ha)
Zona Bioclimática Norte	
(32°-36°) latitud Sur	
Bosque nativo esclerófilo	302.947
Bosque nativo deciduo	78.543
Bosque Mixto	36.127
Matorral	2.048.310
Plantación Forestal	616.970
Praderas y Cultivos anuales	795.437
Suelos agrícolas	1.311.260
Suelos no vegetados	415.363
Zona Bioclimática Sur	
(36°-40°) latitud Sur	
Bosque nativo esclerófilo	40.957
Bosque nativo deciduo	2.061.940
Bosque Mixto	114.885
Matorral	741.214
Plantación Forestal	1.768.159
Praderas y Cultivos anuales	1.634.792
Suelos agrícolas	111.000
Suelos no vegetados	636.633

Tabla 3. Formaciones vegetacionales de Chile Central y Centro Sur años 2001-2017. Fuente: Mc Wethy D.B., Pauchard, A., Garcia, R.A., Holz, A., Gonzalez, M.E., Veblen, T.T., et al. (2018).

El seguimiento de las funciones de los ecosistemas en los bosques es una prioridad en un escenario de cambio climático, ya que los eventos inducidos por el clima pueden alterar inicialmente las funciones más que los atributos de cambio lento, como la biomasa y las propiedades funcionales de los ecosistemas (Vaglio Laurin,

G., Vittucci, C., Tramontana, G., Ferrazzoli, P., Guerriero, L., & Papale, D. (2020)). Si a esto se suma que Chile Central y Centro Sur (32°- 43°S), sustenta la mayor proporción de población del país (cerca del 90%), con importantes remanentes de ecosistemas nativos con un endemismo extraordinariamente alto a nivel de especies y niveles taxonómicos superiores (Villagran, C., & F. Hinojosa, 1997) los impactos pueden ser devastadores, considerando que esta zona ha sufrido profundos cambios en el uso de la tierra en las últimas décadas, en relación a los bosques nativos y degradación del suelo, existiendo un reemplazo de las formaciones originales por extensas plantaciones de pino y eucalipto.

Según el IPCC (2018), con un aumento de 1,5 °C en la temperatura global, una porción de la vegetación mediterránea en Europa se convertiría en vegetación de desierto. Una trayectoria similar podría sufrir el bosque esclerófilo interior de Chile Central y la vegetación subandina en los Andes ubicada por sobre el límite arbóreo entre 2000-2700 msnm, donde la cantidad de agua en el suelo es normalmente baja en verano (Cavieres et al., 2006).

Desde el punto de vista climático, Chile se ubica en la transición entre condiciones oceánicas frías y condiciones continentales más cálidas y húmedas. Según la clasificación climática de Köppen, el territorio nacional cuenta con, al menos, siete de los grandes subtipos climáticos, el clima desértico en el norte, la tundra y glaciares en el sur, húmedo subtropical en Isla de Pascua, clima mediterráneo en Chile central, clima oceánico en el sur y el clima polar en el Territorio Chileno Antártico. Este carácter de transición también se verifica en los cambios climáticos observados en el siglo XX y proyectados al siglo XXI (Garreaud, R., 2011). Montenegro, Segura, Ginocchio, Keel & Gómez (2004), indican que este tipo de impactos son comunes y propios de países mediterráneos donde además existen ecosistemas de alto valor ecológico conviviendo con asentamientos humanos. Esta situación es grave en España, Portugal, Francia, Italia, Grecia y Chile, debido exclusivamente a la naturaleza másica del clima, con menos precipitaciones anuales, y baja humedad relativa.

La zona central de Chile se ha visto afectada por eventos de sequía durante los últimos 14 años y las temperaturas máximas han superado los registros históricos (Arroyo, M. T. et al 2020). Se estima que alrededor de un cuarto del déficit de precipitación durante la megasequía actual es atribuible al cambio climático (Lobos, F., & Araos, J. 2021). En muchos casos ya se habla de "mega-sequías" con efectos perjudiciales para el medio ambiente y la economía de la región. Ya se ha descrito que suelos de la zona central de Chile tradicionalmente considerados como ricos en nitrógeno, en comparación con otros ecosistemas, se han visto afectados como consecuencia de la mega-sequía reduciendo la fijación biológica de este elemento químico (Pérez, C. A., & Armesto, J. J., 2018).

En los últimos años se ha constatado la muerte paulatina del follaje de muchos árboles del bosque esclerófilo de la cuenca de Santiago (Espinoza, F. V. (2018). Situaciones similares de daño por sequía sobre el bosque esclerófilo han sido observadas en distintos lugares de Chile Central, según comentarios de testigos en congresos científicos nacionales (Arroyo, M. T. et al 2020).

Con el aumento sostenido de las temperaturas y la disminución de las precipitaciones, es probable que los efectos en los ecosistemas y en la vegetación, en Chile Central se amplificarán, con consecuencias graves, tal como está ocurriendo en otros ecosistemas esclerófilos del mundo (Chidiak, M., & Gutman, V.). Para dimensionar lo que podría ocurrir, existe un estudio reciente que mostró que especies de 67 géneros de plantas y animales distribuidas en 36% del área del continente australiano fueron afectadas (mortalidad, estrés extremo) en la época de las grandes sequías del período 1891-1903 (Godfree et al., 2019). Asimismo, este estudio mostró que el colapso de los ecosistemas australianos se produjo después de acumular un déficit de precipitación anual de entre 80% y 200% durante un período de sequía de dos a cuatro años (Arroyo, M. T. et al 2020).

Adicionalmente, se ha evaluado mediante imágenes satelitales el efecto del aumento de los incendios forestales como consecuencias del cambio climático, mostrando que el fuego ocurre "preferentemente" en bosques exóticos de

plantación, bosques mixtos nativos-exóticos, bosques esclerófilos nativos, pastizales y matorrales, tipos de vegetación que proveen abundante biomasa inflamable y conectada para la quema (McWethy, D. B et al, 2018). Pese a lo anteriormente expuesto, poco se sabe aún del impacto en el bosque nativo, área de investigación que recién está comenzando, pero lamentablemente no se cuenta con estudios de larga data, como es el caso del Catastro de Especies Nativas que elabora la Corporación Nacional Forestal (CONAF) de forma sistemáticamente a partir de los años 1994-1995, pero que no tiene actualizadas todas regiones, siendo la última actualización del año 2016 – 2017 para algunas regiones, habiendo otras más antiguas de año 2013.

Respecto a los efectos que el cambio climático tendrá sobre los ecosistemas forestales y de los cuales ya existen registros, destacan: estrés hídrico, mayor incidencia de plagas y enfermedades, disminución en la polinización, baja productividad. Además, de acuerdo a diferentes modelos utilizados en trabajos recientes, se vislumbra que el cambio climático propiciará desplazamientos de especies forestales hacia nuevas zonas de distribución; por lo que será necesario implementar estrategias de reordenación forestal que compensen los desfases de adaptación de las poblaciones, para mantener la productividad y la salud de los bosques (Romero, 2016).

Es así que, poder obtener datos que permitan hacer proyecciones del cambio climático en Chile, pueden ser de gran importancia a la hora de generar políticas de mitigación, adaptación y así evaluar posibles vulnerabilidades y riesgos relacionados con impactos específicos sobre los ecosistemas. La falta de datos es aún mayor cuando se habla del bosque nativo esclerófilo, del cual hay muy pocas investigaciones. Es por esto que el objetivo de este estudio es analizar los cambios en la vegetación nativa, causada por el cambio climático entre los años 1986 y 2019, en las Regiones de Valparaíso, Maule, Ñuble y Biobío, para poder aportar a la toma de decisiones a la hora de planificar los territorios en los diferentes instrumentos de ordenamiento territorial que existen en el país.

La distribución de la vegetación natural en el territorio de Chile Central se localiza fundamentalmente en los sectores de la Cordillera de la Costa y en la Precordillera de Los Andes. La Cordillera de la Costa es una de las cuatro macroformas de relieve principales de la geografía del país, que se desarrollan en sentido norte-sur (Biblioteca del Congreso Nacional, S/F). Se caracteriza por ser una formación geológica de las costas, principalmente del norte, centro y centro sur del territorio, desapareciendo en la zona austral.

2.4 Materiales y Métodos

Las formaciones vegetacionales en el área de estudio se identificaron del proyecto “Catastro y Evaluación de los Recursos Vegetacionales Nativos de Chile”, de la Corporación Nacional Forestal (CONAF), que corresponde a un catastro nacional de uso y subuso del suelo y formaciones vegetacionales asociadas al uso, especialmente aquellas relacionadas con bosques nativos, plantaciones forestales y matorrales, constituyendo la línea base de la información cartográfica. La información proporcionada por este catastro es periódicamente actualizada por CONAF, a través de proyectos de continuidad de alcance regional, cuyo objetivo ha sido monitorear los cambios de uso ocurridos entre períodos de medición e identificar sus causas. De esta forma el catastro y sus actualizaciones han permitido contar con información sobre la localización, distribución, tamaño, estructura y estado de las comunidades vegetales, especialmente las comunidades boscosas pertenecientes a los diferentes ecosistemas forestales de Chile.

La unidad mínima cartografiable es de 0.50 ha y 1.0 ha, para una escala de representación nacional de 1:10.000, que identifica la interfase urbano-rural y aledaña a las unidades del Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado (SNASPE). Para el análisis de la información se consideró el Catastro del año 2013, para la Región de Valparaíso; el año 2016 para la Región del Maule y el año 2015, para las Regiones de Ñuble y Biobío.

La base de datos del Catastro está compuesta por 50 campos de información de las cuales se utilizaron los campos relativos a Uso del Suelo y Subuso del Suelo, de acuerdo a la Tabla N° 9, dado que se descartaron aquellos usos que no se utilizaron para preferencia los usos de formaciones vegetacionales nativas, como Bosque Nativo y Matorrales, a fin de identificar tipo de formación vegetal, superficie involucrada, especies comprometidas y localización espacial del polígono que identifica a la formación vegetal.

2.5 Análisis de Resultados

En el caso de la Región de Valparaíso, según Börgel (1975) ésta se caracteriza por ser un territorio orográficamente difícil, donde las unidades morfológicas fundamentales se restringen a dos grandes grupos: las planicies litorales fluviales y marinas o ambas a la vez, en la costa; y, una región interior montañosa en la que, Cordillera de la Costa y Cordillera de los Andes se imbrican, desde el punto del relieve.

De acuerdo a lo indicado por el mismo autor, la zona comprendida entre las regiones del Maule y Biobío, se caracterizan por presentar una depresión intermedia con dos rasgos bien nítidos, la que se encuentra emplazada en el oeste por la Cordillera de la Costa y por el oeste, por la Cordillera de Los Andes. Esta situación favorece el desarrollo de pisos vegetacionales y variaciones climáticas longitudinales, como los que se describieron en el punto anterior (ver figura n°5).

Como se mencionó anteriormente, la diversidad en el relieve permite identificar diferentes pisos vegetacionales nativos. Así, de acuerdo a la clasificación de Pliscoff, P., Zanetta, N., Hepp, J., & Machuca, J. (2017), se puede observar una variación vegetal longitudinal de costa a cordillera. En el caso de la región de Valparaíso, se identifica en el secano costero gran presencia de bosque esclerófilo y matorral arborescente esclerófilo, seguido por bosque espinoso mediterráneo en la zona de valle interior. Hacia la zona precordillerana se evidencia una dominancia del matorral espinoso mediterráneo y una pequeña sección de bosque esclerófilo

que no suele superar los 1.000 – 1.500 m.s.n.m. A más altitud se encuentran los matorrales bajos y la zona desprovista de vegetación.

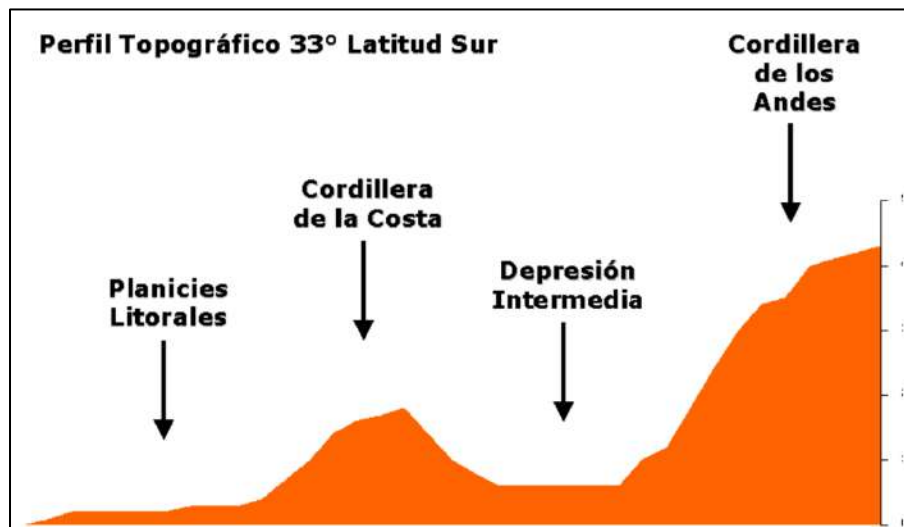


Figura 5: Perfil longitudinal zona central de Chile. Se pueden apreciar las cuatro principales unidades geomorfológicas: planicies litorales, donde se ubican los principales balnearios de la zona; Cordillera de la Costa, donde las altitudes pueden alcanzar casi los 3.000 m.s.n.m.; Depresión Intermedia generada por los depósitos aluviales y coluviales provenientes de ambas cordilleras; y la Cordillera de Los Andes, donde se superan los 5.000 m.s.n.m. Fuente: <https://fddocuments.ec/reader/full/perfiles-topograficos>

La región del Maule se caracteriza por presentar una costa donde predomina el bosque esclerófilo mediterráneo costero, seguido por un bosque caducifolio mediterráneo costero de *Nothofagus glauca* - *Persea lingue*, confinado en la Cordillera de la Costa que se presenta como lomajes bajos con altitudes que no superan los 700.m.s.n.m. Hacia el interior, en la depresión intermedia, se identifica una zona de bosque espinoso mediterráneo interior con especies como la *Acacia caven* - *Lithrea caustica*, el que se encuentra rodeado por el bosque esclerófilo mediterráneo interior de *Lithrea caustica* - *Peumus boldus*. La región del Maule se presenta como una zona de transición entre el bosque esclerófilo de características perennes y el bosque caducifolio mediterráneo interior con especies como el *Nothofagus obliqua* - *Cryptocarya alba*, que son las que predominan en la zona precordillerana de Los Andes solo se encuentra en las zonas más bajas por las características climáticas que estas presentan, más parecidas a las condiciones de

las regiones más al norte. Ya en las zonas más altas se encuentra el matorral bajo mediterráneo andino de *Laretia acaulis* - *Berberis empetrifolia*.

En las regiones de Ñuble y Biobío el bosque esclerófilo se encuentra confinado sólo a la parte norte de la depresión intermedia y una pequeña sección de la zona costera, dando paso a la dominancia del bosque caducifolio mediterráneo de *Nothofagus obliqua* - *Persea lingue*, siendo reemplazado sólo en las zonas más altas de Cordillera de Los Andes por matorral bajo templado andino, zonas donde la nieve se hace más presente y la altitud baja considerablemente (ver figura nº6).

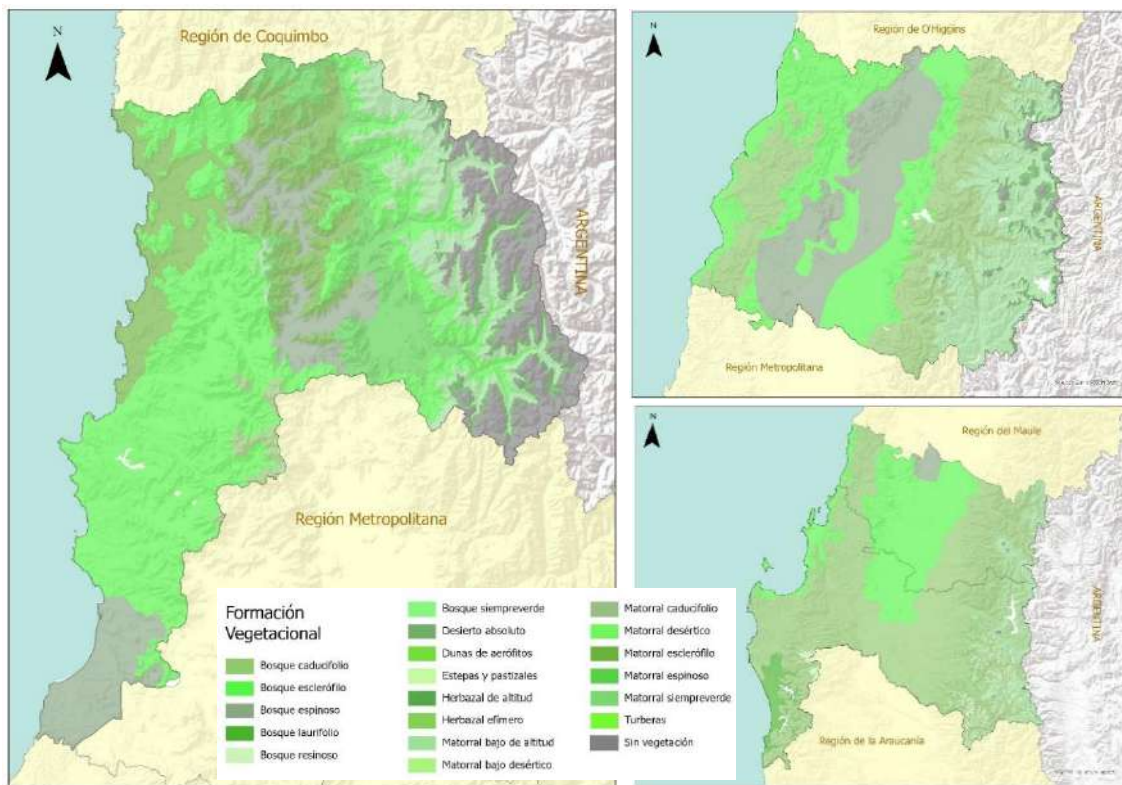


Figura 6: Pisos vegetacionales de Luebert y Plissock 2017. Elaboración propia con datos obtenidos en IDE Chile, www.ide.cl.

Por las condiciones geomorfológicas que existen en esta zona del país, se presentan, además, bosques relictos que se han preservado bajo condiciones extremas. Un ejemplo de esto, en la Cordillera de la Costa, lo constituye el Parque Nacional La Campana administrado por la Corporación Nacional Forestal



Figura 7: Bosque Esclerófilo del Parque Nacional La Campana, en la Cordillera de la Costa de la Región de Valparaíso, con especies como peumo (*Cryptocaria alba*), quillay (*Quillaja saponaria*) y litre (*Lithraea caustica*), sobre cordones del batolito costero formado por rocas volcanosedimentarias, con presencia de granito, dioritas y granodioritas.



Figura 8: Bosque Esclerófilo de la Reserva Nacional Ñuble, asociados a Bosques Templados Higromórficos, localizados en la precordillera y cordillera andina de la Región de Ñuble, con especies como el roble (*Nothofagus obliqua*), ciprés (*Austrocedrus chilensis*) y raulí (*Nothofagus alpina*), sobre cordones montañosos de rocas volcánicas y volcanoclásticas del Mioceno con presencia de andesitas, basaltos y dacitas. Fuente: CONAF, 1997.

en la Región de Valparaíso, formado principalmente por Palma Chilena (*Jubaea chilensis*) (ver figura n°7). Otro ejemplo, lo constituye la Reserva Nacional Ñuble administrada también por CONAF en la Región de Ñuble, formada por especies del bosque esclerófilo de transición y bosque templado higrórnico del sur, con varias especies del género *Nothofagus*. Estas formaciones vegetacionales cambian a través del gradiente latitudinal, norte-sur, sin embargo, todas ellas se localizan en ambas cordilleras: Cordillera de la Costa y Precordillera y Cordillera de los Andes (ver figura 8).

Por tanto, la tabla 4, muestra la superficie regional y la superficie de prospección con vegetación nativa, del área de estudio:

Región	Coordenadas UTM	Superficie Regional	Superficie de Prospección de Vegetación
	[UTM]	[ha]	[ha]
Valparaíso	6.338.625 253.574 19H	1.639.600	26.402
Maule	6.076.360 257.449 19H	3.029.610	50.405
Ñuble	5.943.598 236175 19H	1.317.850	16.267
Biobío	5.928.584 672.863 18H	2.389.020	29.581
Total		8.376.080	122.655

Tabla 4: Superficie regional y superficie de prospección con vegetación nativa Fuente: INE, (2006); GeoHack, (2020).

De acuerdo a la información obtenida desde el *Catastro de Bosque Nativo* levantado por CONAF los años 2015 – 2016, siendo éstas las últimas versiones, la región de Valparaíso se caracteriza por presentar especies del Bosque Esclerófilo, como especies dominantes, en la mayor parte de territorio, excluyendo la zona de la Cordillera de Los Andes. Destaca la zona del cordón montañoso Altos de Cantillana, donde se encuentran especies de Robles y Hualos, y la Palma Chilena que se mencionó anteriormente. En el caso de la región del Maule, el bosque esclerófilo retrocede ubicándose solamente en algunos sectores de la Cordillera de la Costa, apareciendo con mayor dominancia especies como Roble, Hualo, Raulí y Coihue en la zona de la precordillera de Los Andes. Misma situación es la que se da en las regiones de Ñuble y Biobío (ver figura 9).

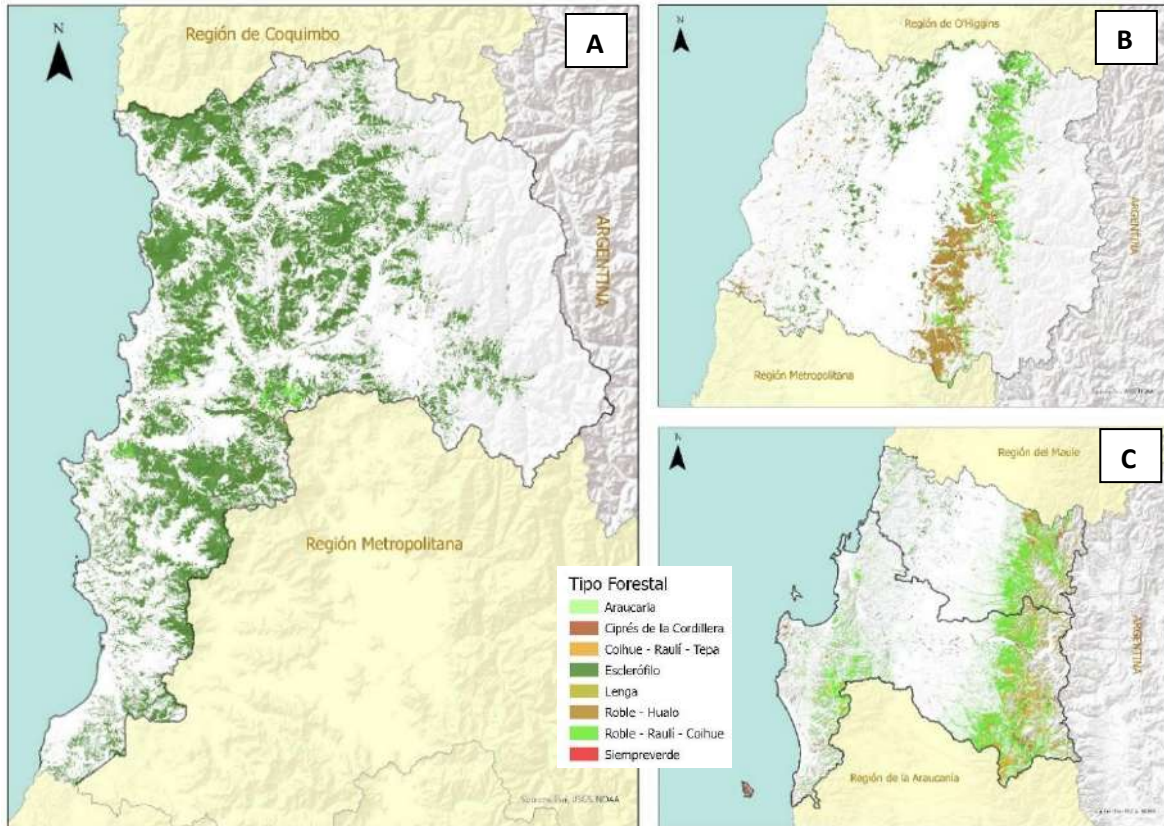


Figura 9: Tipos forestales de la zona centro y centro-sur de Chile. A: Región de Valparaíso, se puede observar que predomina el bosque de tipo esclerófilo. B: Región del Maule, se observa una predominancia de Roble, Hualo, Raulí y Coihue. C: Regiones de Ñuble y Biobío, se observa la misma predominancia que en la región del Maule. Fuente: elaboración propia con datos de CONAF años 2015 – 2017.

CAPITULO III

CLIMA DE CHILE CENTRAL Y COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA Y PRECIPITACIONES EN UN RÉGIMEN TEMPORAL DE 35 AÑOS

3.1 Clasificación climática de Chile Central

En el área de estudio, se identifican, en su mayoría, los climas Mediterráneo y Templado con lluvias invernales y periodos estivales secos. Esto significa que la vegetación y biodiversidad en general, se encuentra sometida a largos periodos de estrés hídrico entre los meses de octubre a marzo (seis meses, al menos) (ver figura 10).

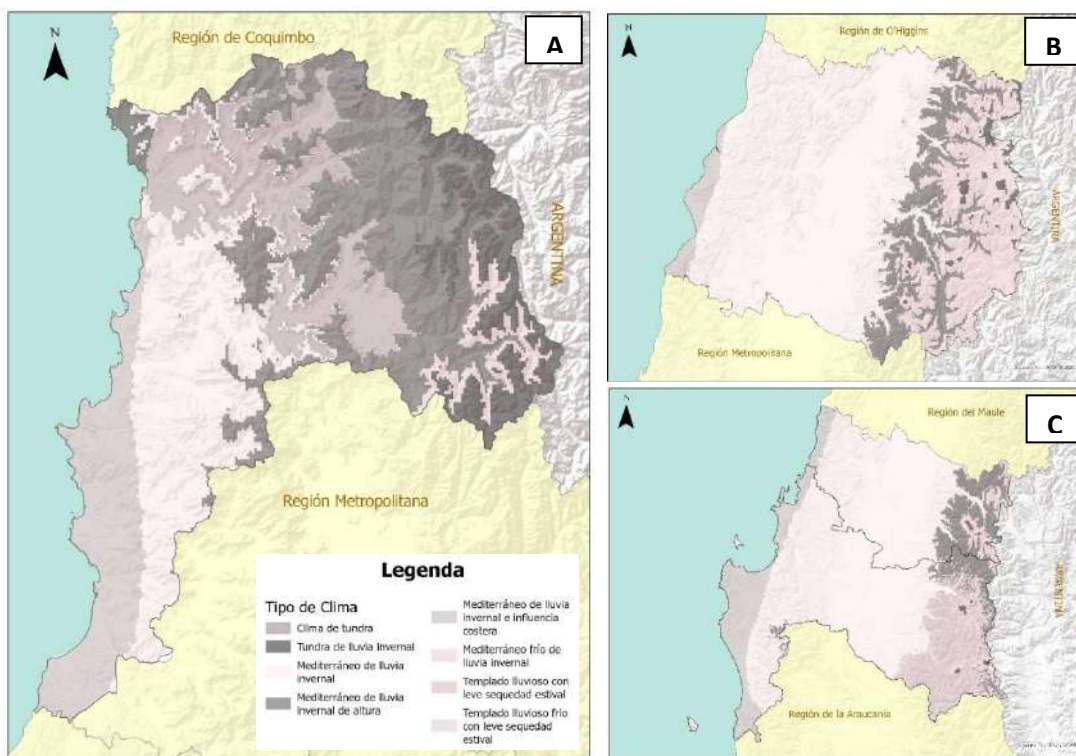


Figura 10: Mapas climáticos del área de estudio. A, Región de Valparaíso, se destaca el clima de tundra de lluvia invernal en la zona cordillerana y el clima mediterráneo de lluvia invernal en la zona de secano costero, B, región del Maule donde predomina el clima mediterráneo y templado de lluvia invernal en valles y cordillera; C, regiones de Nuble y Biobío, donde predominan los mismo tipos de clima y se suma en la región del Biobío el clima templado lluvia con leve sequedad estival, siendo esta zona la que presenta mayor abundancia en las precipitaciones. Fuente: elaboración propia con datos de IDE Chile, www.ide.cl.

Tal como se aprecia en la figura 10, existe una diferenciación longitudinal de la distribución del clima en cada región. Así, en toda la zona central y centro sur del país, se identifica en la costa el clima mediterráneo de lluvia invernal e influencia costera, donde las variaciones de temperaturas son menores por la influencia del océano, siendo más uniformes durante el año, con un promedio anual de 14° C, la humedad relativa es alta con un 75 % y las precipitaciones son más abundantes alcanzando a unos 450 mm. Avanzando más hacia el interior, se encuentra el clima mediterráneo de lluvia invernal, el cual se ubica en el sector del secano costero en la Región de Valparaíso y en la zona de la depresión intermedia en las regiones de Maule, Ñuble y Biobío.

A excepción del resto de las regiones, en la Región de Valparaíso se identifica el Clima semiárido de lluvia invernal donde el período seco se reduce a 7 u 8 meses y el déficit hídrico anual se mantiene entre 800 y 1000 mm. El período húmedo varía entre 2 y 4 meses (Ministerio de Medio Ambiente, 2015).

Llegando a la zona precordillerana, se identifica en toda la zona central y centro sur de Chile el clima mediterráneo de lluvia invernal de altura, donde, según la clasificación de Köppen corresponde a un clima tipo “Csb” el que se caracteriza por presentar una temperatura media del mes más cálido inferior a los 22°C y, al menos, cuatro meses, con temperaturas medias que superan los 10°C; y donde la precipitación del mes más seco en verano es inferior a un tercio de la del mes más lluvioso de invierno, con alrededor de 1.000 a 1.500 mm al año.

Desde la región del Maule al sur se logra identificar, en la zona cordillerana de Los Andes, el clima mediterráneo frío de lluvia invernal, con características muy similares al anterior, pero con una estación estival más fría, es decir, presenta menos de cuatro meses al año con temperatura media superior a 10°C. las precipitaciones en esta zona suelen alcanzar los 2.000 mm al año.

Sólo en la región del Biobío se presenta el clima templado lluvioso con leve sequedad estival “Cfb”, el que presenta una mayor humedad y un período seco leve.

Es decir, se presentan precipitaciones durante todo el año superando los 2.000 mm al año.

3.2 Materiales y Métodos

Se analizaron datos de temperaturas máximas y mínimas, y precipitaciones promedio acumuladas para todas las regiones en estudio. Los datos fueron obtenidos desde la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) y la Dirección general de Aguas del Ministerio de Obras Públicas (DGA). Resulta importante mencionar que Chile no cuenta con una base de datos continua para todas las estaciones, sean meteorológicas o pluviométricas, por lo que, la obtención de los datos, relacionados con la continuidad del funcionamiento de las estaciones resultó compleja y tuvo que seleccionarse aquellas estaciones que registraran, al menos, 20 años de datos de manera continua, lo que significó una disminución importante en la cantidad de estaciones analizadas, particularmente, en las regiones de Ñuble y Biobío.

Sumado a lo anterior, se elaboraron gráficas de precipitación media anual v/s año y temperaturas máximas v/s año, a fin de estimar la tendencia de ambas variables en el período considerado, mediante un análisis de regresión simple, identificando la curva del modelo y su respectivo coeficiente de determinación, como medida de la bondad del ajuste (Ecuación N°1):

$$Y = m(X) + b ; R^2 = K0 \quad \text{Ecuación N°1}$$

Luego se correlacionó la precipitación media anual y la temperatura máxima anual con el gradiente latitudinal a través de las coordenadas geográficas (o su equivalente), como variable independiente, de un modelo de regresión simple.

Para la obtención de la cartografía, se utilizó el método de interpolación IDW, por medio del software ArcGis Pro. Este método resulta bastante eficiente para interpolar datos meteorológicos, ya que, utiliza la autocorrelación espacial en sus

matemáticas. Así, los valores más cercanos tienen más efecto, mientras que los más lejanos tienen menos efecto.

3.3 Temperatura y precipitaciones

3.3.1 Variación temporal de las temperaturas

Para efectos de esta investigación se analizaron datos de temperaturas máximas de 35 años, comprendidos entre 1985 y 2020 (ver tabla 6). Se consideró así el promedio de temperaturas máximas por estación de verano, otoño, invierno y primavera para cada región en estudio.

NOMBRE	LAT	LONG	REGIÓN
RIO JUNCAL EN JUNCAL DGA	32° 52' 12"	70° 08' 49"	VALPARAÍSO
RIO ACONCAGUA EN RIO BLANCO DGA	32° 54' 36"	70° 18' 26"	VALPARAÍSO
CANAL COLORADO EN BOCATOMA DGA	32° 50' 18"	70° 21' 19"	VALPARAÍSO
ALICAHUE(DGA)	32° 20' 27"	70° 45' 06"	VALPARAÍSO
VILCUYA DGA	32° 51' 37"	70° 28' 18"	VALPARAÍSO
QUILLOTA DGA	32° 53' 46"	71° 12' 23"	VALPARAÍSO
LOS AROMOS DGA	32° 57' 28"	71° 20' 42"	VALPARAÍSO
LAGO PEUELAS DGA	33° 08' 42"	71° 33' 22"	VALPARAÍSO
LLIU-LLIU EMBALSE DGA	33° 05' 54"	71° 12' 52"	VALPARAÍSO
RIO ACONCAGUA EN CHACABUQUITO DGA	32° 51' 01"	70° 30' 33"	VALPARAÍSO
PORTILLO DGA	32° 50' 40"	70° 06' 39"	VALPARAÍSO
POTRERO GRANDE DGA	35° 10' 60"	71° 05' 52"	MAULE
TALCA UC DGA	35° 26' 09"	71° 37' 10"	MAULE
COLORADO DGA	35° 38' 27"	71° 15' 38"	MAULE
ANCOA EMBALSE DGA	35° 54' 38"	71° 17' 45"	MAULE
DIGUA EMBALSE DGA	36° 15' 24"	71° 32' 54"	MAULE
PARRAL DGA	36° 11' 36"	71° 49' 44"	MAULE
PENCAHUE DGA	35° 22' 35"	71° 50' 09"	MAULE
RIO CLARO EN RAUQUEN DGA	35° 27' 04"	71° 43' 59"	MAULE
LO AGUIRRE DGA	35° 58' 13"	70° 34' 19"	MAULE
RIIO MAULE EN ARMERILLO DGA	35° 42' 23"	71° 07' 02"	MAULE
RIO MELADO EN EL SALTO DGA	35° 53' 45"	71° 00' 53"	MAULE
ARMERILLO DGA	35° 42' 14"	71° 04' 46"	MAULE
LAGUNA DE TORCA DGA	34° 46' 05"	72° 03' 53"	MAULE
CURICO DGA	34° 58' 30"	71° 14' 59"	MAULE
CONSTITUCION DGA	35° 20' 30"	72° 25' 21"	MAULE

RIO CIPRECES EN DESAGUE LAGUNA LA INVERNADA DGA	35° 44' 11"	70° 46' 34"	MAULE
RIO CLARO EN SAN CARLOS DGA	35° 41' 56"	71° 03' 41"	MAULE
LOS CONDORES DGA	36° 00' 35"	70° 32' 52"	MAULE
CARACOL DGA	36° 39' 03"	71° 23' 42"	ÑUBLE
COIHUECO EMBALSE DGA	36° 38' 27"	71° 47' 57"	ÑUBLE
DIGUILLIN DGA	36° 52' 14"	71° 38' 33"	ÑUBLE
PARQUE NAHUEL BUTA DGA	37° 49' 24"	72° 57' 38"	ÑUBLE
ALTO MALLINES	37° 09' 32"	71° 14' 33"	BIOBIO
RIO BIOBIO EN LA CULEBRA DGA	37° 47' 44"	71° 41' 55"	BIOBIO
RIO HUEQUECURA AGUAS ARRIBA EMBALSE ANGOSTURA DGA	37° 42' 16"	71° 46' 05"	BIOBIO
QUILACO DGA	37° 41' 07"	72° 00' 24"	BIOBIO
CONTULMO DGA	38° 01' 06"	73° 13' 49"	BIOBIO

Tabla 6: Estaciones meteorológicas consultadas por región. Fuente: elaboración propia en base a la información de la Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas de Chile.

Resulta importante mencionar la dificultad en la obtención de información, dado que Chile no cuenta con una red robusta de estaciones meteorológicas, sumado a que no todas se encuentran activas desde el año 1985, presentando varias de ellas, intermitencia en el registro de datos.

3.3.1.1 Estación de Verano

En la estación de verano, la Región de Valparaíso presenta un comportamiento normal a lo previsto por el cambio climático, al presentar variaciones de acuerdo a la ubicación de cada estación meteorológica. Se observa así en la estación de verano, un aumento de las temperaturas máximas en las estaciones ubicadas en la zona interior pertenecientes a la cuenca transicional semiárida y parte oriental de la Cordillera de la Costa, donde se ubican las estaciones de Quillota DGA, Los Aromos DGA, Lliu-Lliu Embalse y Vilcuya DGA, las que alcanzaron aumentos que van desde 1,1°C a 2,0°C, así como en la zona norte de la región, también se presentó un aumento de temperaturas máximas, evidenciadas por la estación Alicahue de 1,0°C.

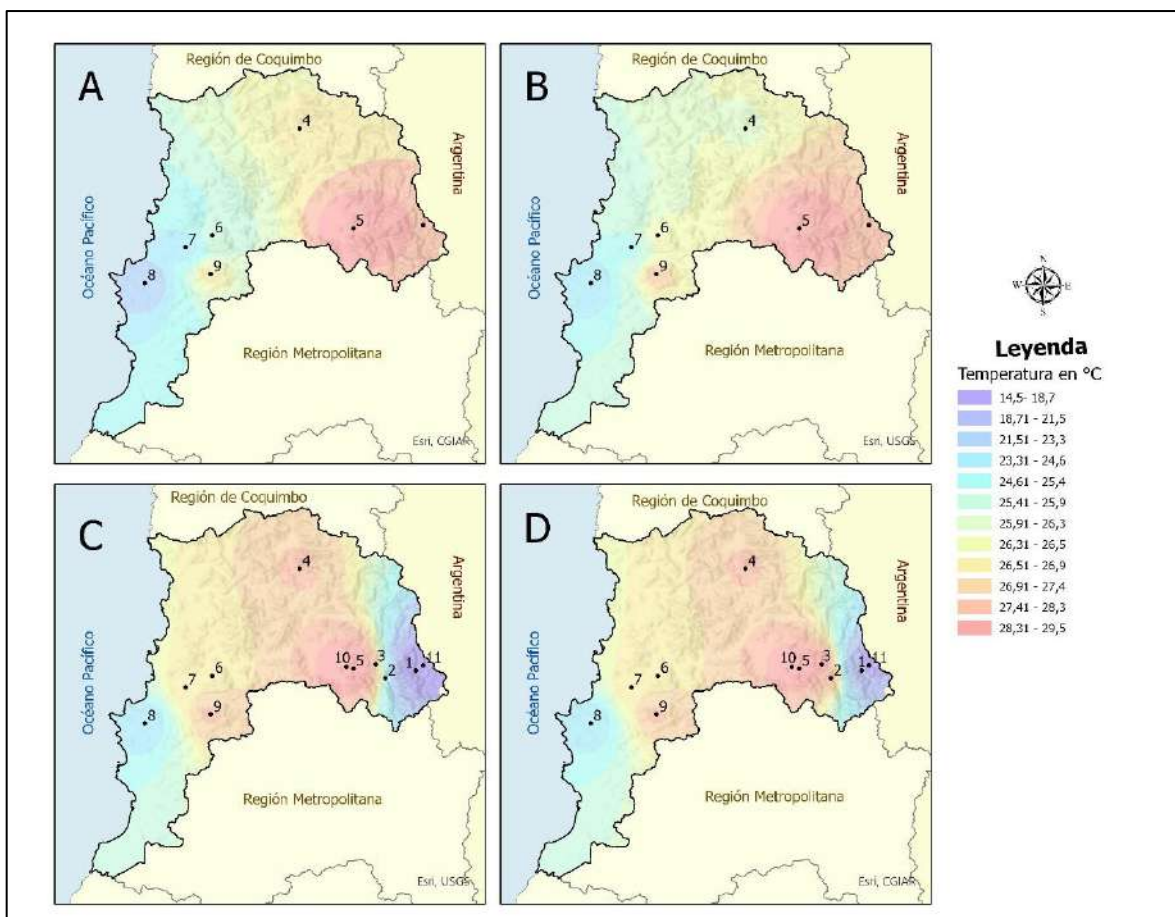


Figura 11: Distribución espacial de la variación de temperatura máxima en la Región de Valparaíso, donde A corresponde al promedio de las temperaturas máximas de verano entre 1985 – 1989; B corresponde al promedio de las temperaturas máximas de verano entre 1990 – 1999; C corresponde al promedio de las temperaturas máximas de verano entre 2000 – 2009 y D corresponde al promedio de las temperaturas máximas de verano entre 2010 – 2020. Las estaciones corresponden a: 1 Río Juncal en Juncal Dga; 2 Canal Colorado en Bocatoma Dga; 3 Alicahue (DGA); 4 Vilcuya DGA; 5 Quillota DGA; 6 Los Aromos DGA; 7 Lago Peñuelas DGA; 8 Lliu-Lliu Embalse DGA; 9 Río Aconcagua en Chacabuquito DGA y, 10 Portillo DGA. Fuente: Elaboración propia.

Si se considera que un aumento de 1,5°C en la temperatura promedio del planeta ha generado la pérdida de 28 billones de toneladas de hielo entre 1994 y 2017, de acuerdo a un estudio del 2021, publicado en la revista científica *The Cryosphere*, es evidente que el aumento reflejado en Chile generará impactos medioambientales importantes. Lamentablemente, aún no existen estudios científicos acabados que evalúen estos temas en Chile, con las diferencias regionales que corresponden. Por su parte, la estación Lago Peñuelas ubicada en la zona sur costera de la región fue la única que presentó una disminución de -0,7°C (ver figura 11).

Por su parte, las estaciones ubicadas en la zona de la Cordillera de Los Andes se mantuvieron más estables con aumentos de 0,1°C a 0,3°C (ver gráfico n°4).

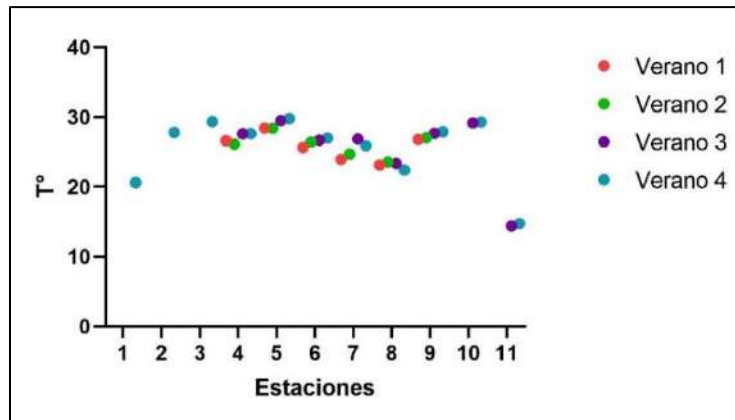


Gráfico 4: Variación de la temperatura máxima en la Región de Valparaíso, donde Verano 1 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de verano entre 1985 – 1989; Verano 2 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de verano entre 1990 – 1999; Verano 3 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de verano entre 2000 – 2009 y Verano 4 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de verano entre 2010 – 2020. En las estaciones, 1 Río Juncal en Juncal Dga; 2 Canal Colorado en Bocatoma Dga; 3 Alicahue (DGA); 4 Vilcuya DGA; 5 Quillota DGA; 6 Los Aromos DGA; 7 Lago Peñuelas DGA; 8 Lliu-Lliu Embalse DGA; 9 Río Aconcagua en Chacabuquito DGA y, 10 Portillo DGA. Fuente: Elaboración propia.

Las temperaturas mínimas presentan un comportamiento diferente a las temperaturas máximas, ya que, por el contrario, estas han disminuido en todas las estaciones que presentan registros desde 1985, con la excepción de la Estación Los Aromos DGA la que registró un aumento de 1,0°C (ver figura 12).

Si bien, se agregaron estaciones nuevas que pueden haber influido en la disminución de las temperaturas en esta parte de la región, éstas registraron 20 años con datos, donde la disminución de los valores en las temperaturas mínimas no deja de ser importante (ver gráfico 5).

Llama la atención que la estación Los Aromos DGA y la estación Portillos DGA presentaran un aumento de 1,0°C y 0,3°C respectivamente, siendo las únicas dos que presentaron aumentos de temperaturas mínimas, a diferencia del resto de las estaciones. Un aumento de un grado es un valor importante, particularmente, en la zona de la Cordillera de la Costa, que es donde se emplaza la estación Los Aromos

DGA, por la cantidad de biodiversidad que esta alberga y el bosque esclerófilo que se encuentra en ella.

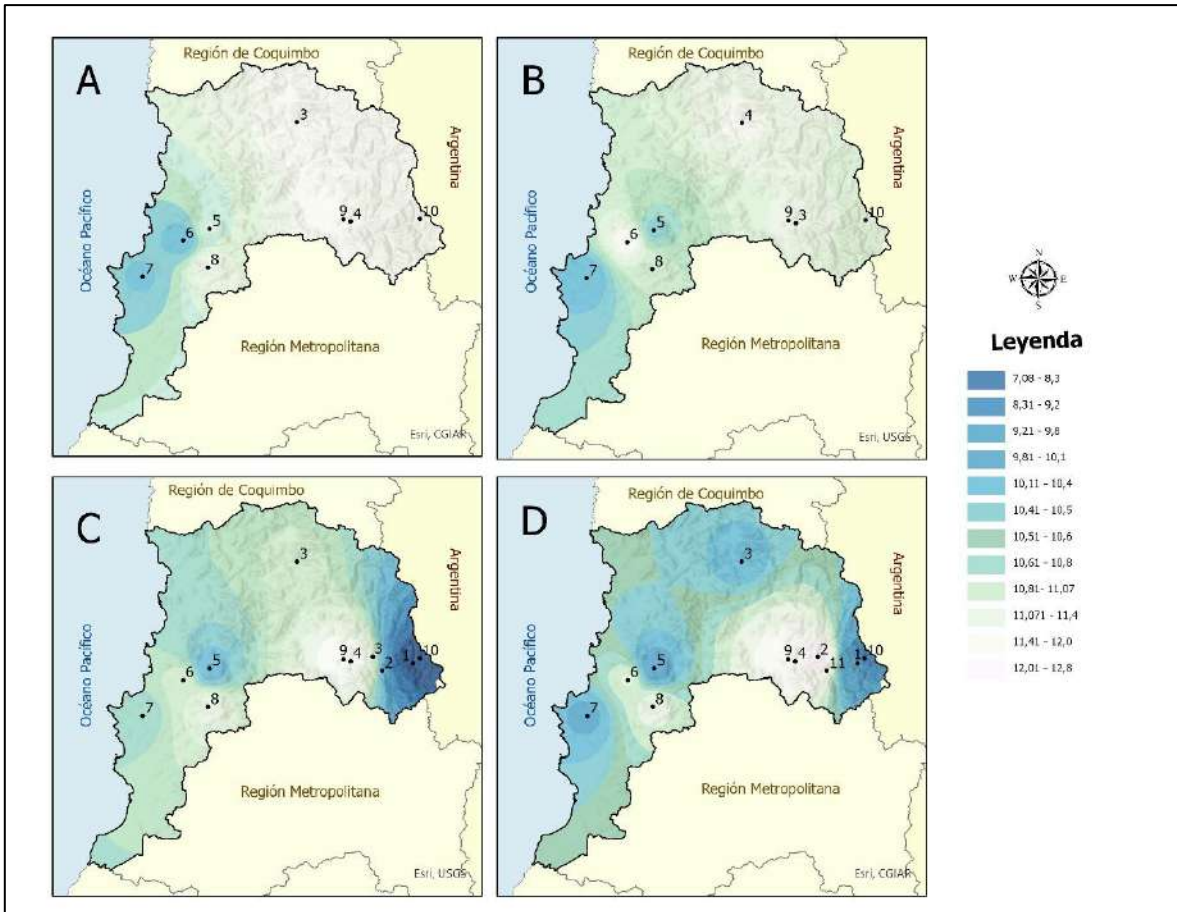


Figura 12: Distribución espacial de la variación de temperatura mínima en la Región de Valparaíso, donde A corresponde al promedio de las temperaturas mínima de verano entre 1985 – 1989; B corresponde al promedio de las temperaturas mínima de verano entre 1990 – 1999; C corresponde al promedio de las temperaturas mínima de verano entre 2000 – 2009 y D corresponde al promedio de las temperaturas mínima de verano entre 2010 – 2020. Las estaciones corresponden a: 1 Río Juncal en Juncal Dga; 2 Canal Colorado en Bocatoma Dga; 3 Alicahue (DGA); 4 Vilcuya DGA; 5 Quillota DGA; 6 Los Aromos DGA; 7 Lago Peñuelas DGA; 8 Lliu-Lliu Embalse DGA; 9 Río Aconcagua en Chacabuquito DGA y, 10 Portillo DGA. Fuente: Elaboración propia.

Así, seis de las ocho estaciones que registran datos continuos, al menos, en los últimos 30 años, presentan disminución de las temperaturas entre 0,7°C y 1,7°C, siendo la última década (verano 4, que comprende entre los años 2010 y 2020) la que presenta la mayor baja en los valores.

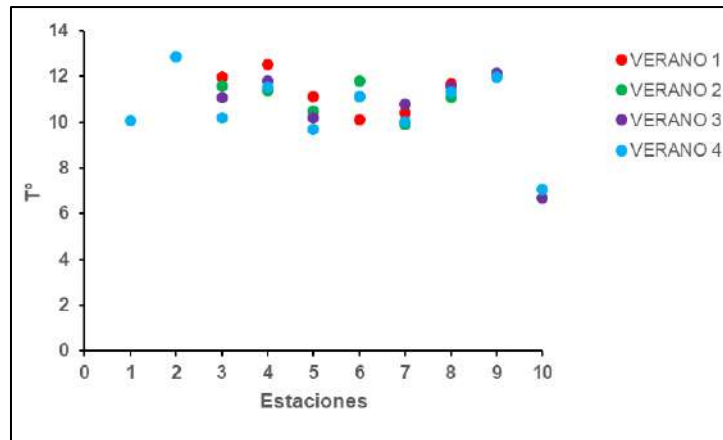


Gráfico 5: Variación de la temperatura mínima en la Región de Valparaíso, donde Verano 1 corresponde al promedio de las temperaturas mínima de verano entre 1985 – 1989; Verano 2 corresponde al promedio de las temperaturas mínima de verano entre 1990 – 1999; Verano 3 corresponde al promedio de las temperaturas mínima de verano entre 2000 – 2009 y Verano 4 corresponde al promedio de las temperaturas mínima de verano entre 2010 – 2020. En las estaciones, 1 Río Juncal en Juncal Dga; 2 Canal Colorado en Bocatoma Dga; 3 Alicahue (DGA); 4 Vilcuya DGA; 5 Quillota DGA; 6 Los Aromos DGA; 7 Lago Peñuelas DGA; 8 Lliu-Lliu Embalse DGA; 9 Río Aconcagua en Chacabuquito DGA y, 10 Portillo DGA. Fuente: Elaboración propia.

En el caso de la Región del Maule, similar a lo ocurre en la Región de Valparaíso, las temperaturas máximas presentaron un comportamiento variado en las diferentes estaciones, donde estas no aumentaron, se mantuvieron o presentaron aumento en sus valores. Es importante mencionar que, en el último periodo analizado, comprendido entre los años 2011 al 2020, se sumaron 7 estaciones que permitieron obtener información más precisa de la temperatura. Así, como se observa en la figura n°13, la distribución de las temperaturas máximas cambió con el tiempo, produciéndose un enfriamiento en la zona costera y en la zona central del valle, particularmente en la estación Ancoa Embalse DGA, ubicada en los faldeos de la Cordillera de Los Andes, donde se produjo una disminución de 2,1°C en el promedio de temperaturas máximas en verano. Algo similar ocurrió en las estaciones Colorado DGA, Digua Embalse DGA y Pencahue Dga, donde se presentaron disminuciones de 0,7°C a 0,8°C.

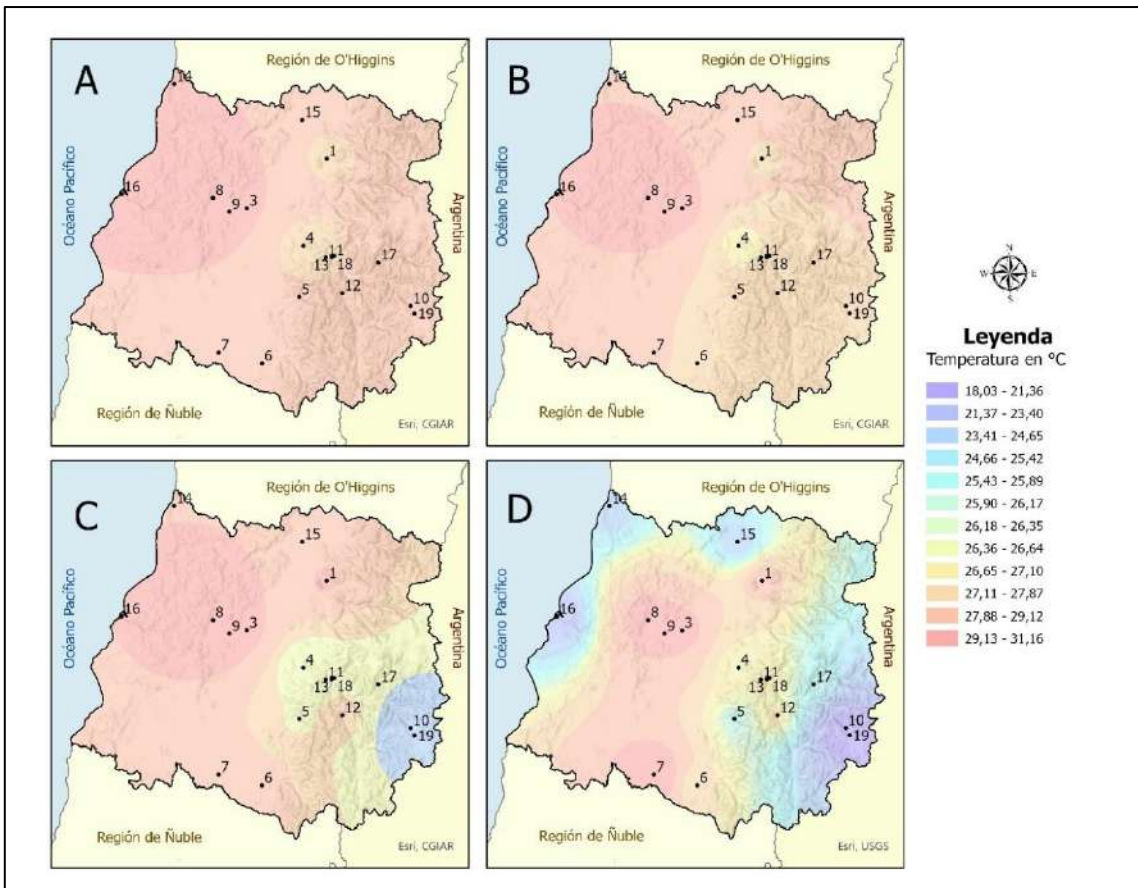


Figura 13: Distribución espacial de la variación de temperatura en la Región del Maule, donde A corresponde al promedio de las temperaturas máximas de verano entre 1985 – 1989; B corresponde al promedio de las temperaturas máximas de verano entre 1990 – 1999; C corresponde al promedio de las temperaturas máximas de verano entre 2000 – 2009 y D corresponde al promedio de las temperaturas máximas de verano entre 2010 – 2020. Las estaciones corresponden a: 1 Potrero Grande DGA; 2 Talca UC DGA; 3 Colorado DGA; 4 Ancoa Embalse DGA; 5 Digua Embalse DGA; 6 Parral DGA; 7 Penciahue DGA; 8 Río Claro en Rauquén DGA; 9 Lo Aguirre DGA; 10 Río Maule en Armerillo DGA, 11 Río Melado en El Salto DGA; 12 Armerillo DGA; 13 Laguna de Torca DGA; 14 Curico DGA; 15 Constitución DGA; 16 Río Cipreces en Desagüe Laguna La Invernada DGA; 17 Río Claro En San Carlos DGA y 18 Los Condores DGA. Fuente: Elaboración propia.

El resto de las estaciones meteorológicas presentaron aumentos entre 1,0° a 1,6°C, siendo la estación Lo Aguirre DGA, ubicada en el sector oriente de la Cordillera de la Costa, la que presentó el mayor aumento. Si bien, desde el año 2000 se incorporan nuevas estaciones meteorológicas a la red, lo que podría incidir en la distribución de las temperaturas máximas, las estaciones Colorado DGA, Digua Embalse DGA, Penciahue DGA y Ancoa DGA presentan registros desde el año 1985, por lo que la disminución de sus valores no podría ser atribuible a este factor (ver gráfico 6).

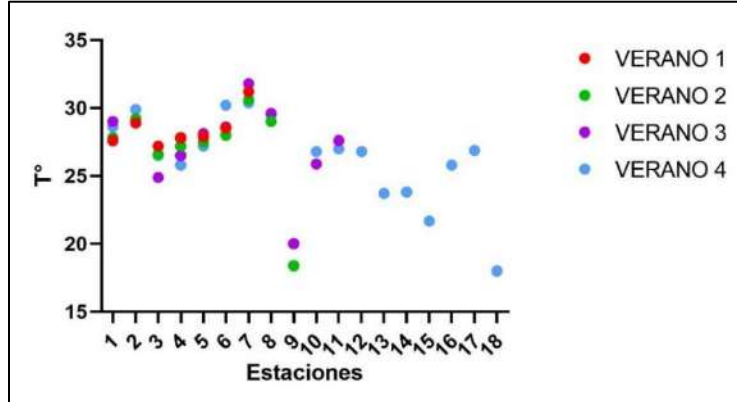


Gráfico 6: Variación de la temperatura máxima en la Región del Maule, donde Verano 1 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de verano entre 1985 – 1989; Verano 2 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de verano entre 1990 – 1999; Verano 3 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de verano entre 2000 – 2009 y Verano 4 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de verano entre 2010 – 2020. En las estaciones, 1 Potrero Grande DGA; 2 Talca UC DGA; 3 Colorado DGA; 4 Ancoa Embalse DGA; 5 Digua Embalse DGA; 6 Parral DGA; 7 Penciahue DGA; 8 Río Claro en Rauquén DGA; 9 Lo Aguirre DGA; 10 Río Maule en Armerillo DGA, 11 Río Melado en El Salto DGA; 12 Armerillo DGA; 13 Laguna de Torca DGA; 14 Curicó DGA; 15 Constitución DGA; 16 Río Cipreces en Desagüe Laguna La Invernada DGA; 17 Río Claro En San Carlos DGA y 18 Los Condores DGA. Fuente: Elaboración propia.

La estación Río Melado en El Salto DGA, ubicada en la precordillera de Los Andes, registró una disminución de 0,6°C en los 20 años de datos que se lograron obtener.

En relación a las temperaturas mínimas de verano, la Región del Maule evidencia una redistribución de las mismas, con un aumento de las temperaturas mínimas en la zona del valle central, que se extiende de la zona costera hasta la zona próxima a la ciudad de Talca y la zona cordillerana de la región. Así, las estaciones Potrero Grane DGA, Talca DGA, Ancoa DGA y Lo Aguirre DGA registraron aumentos de 1,1°C, 1,3°C y 1,6°C respectivamente. Otras estaciones que también presentaron aumentos, pero en menor grado son Río Claro en Rauquén DGA, Río Maule en Armerillo DGA y Río Melado en el Salto DGA, con 0,7°C, 0,1°C y 0,6°C respectivamente (ver figura 14).

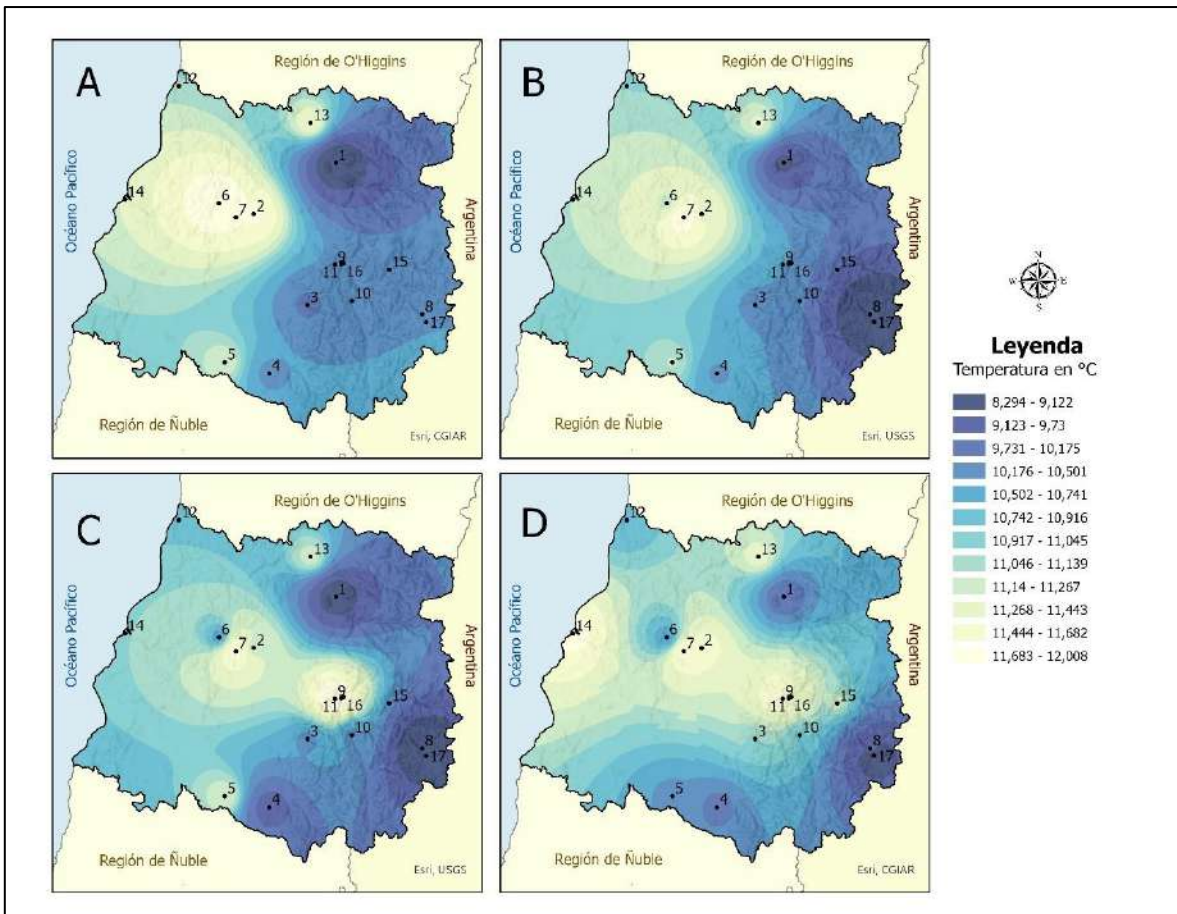


Figura 14: Distribución espacial de la variación de temperatura mínima en la Región del Maule, donde A corresponde al promedio de las temperaturas mínima de verano entre 1985 – 1989; B corresponde al promedio de las temperaturas mínima de verano entre 1990 – 1999; C corresponde al promedio de las temperaturas mínima de verano entre 2000 – 2009 y D corresponde al promedio de las temperaturas mínima de verano entre 2010 – 2020. Las estaciones corresponden a: 1 Potrero Grande DGA; 2 Talca UC DGA; 3 Colorado DGA; 4 Ancoa Embalse DGA; 5 Digua Embalse DGA; 6 Parral DGA; 7 Pencahue DGA; 8 Río Claro en Rauquén DGA; 9 Lo Aguirre DGA; 10 Río Maule en Armerillo DGA; 11 Río Melado en El Salto DGA; 12 Armerillo DGA; 13 Laguna de Torca DGA; 14 Curico DGA; 15 Constitución DGA; 16 Río Cipreces en Desagüe Laguna La Invernada DGA; 17 Río Claro En San Carlos DGA y 18 Los Condores DGA. Fuente: Elaboración propia.

Llama la atención el comportamiento de las estaciones Digua Embalse DGA, Parral DGA y Pencahue DGA, ya que registraron disminuciones importantes en las temperaturas mínimas, con bajas de 1,1°C cada una de ellas. Esto explicaría la disminución en la parte temperatura en la zona de la Cordillera de la Costa, y la marcada disminución en la zona sureste de Los Andes. Se puede observar también un enfriamiento de la zona centro sur de la región, por la disminución de la temperatura mínima en las mismas estaciones.

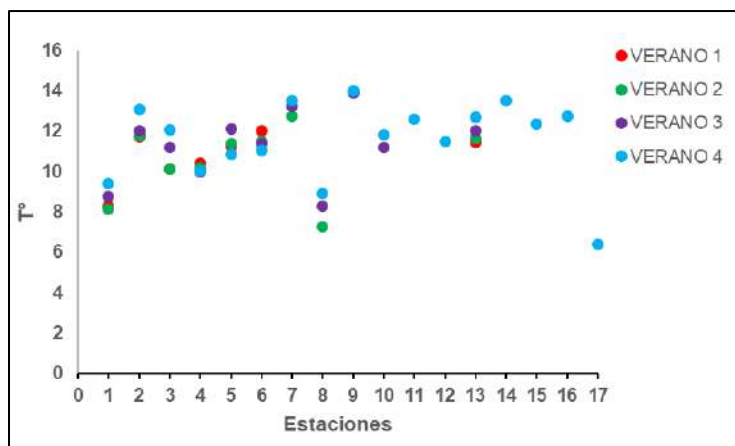


Gráfico 7: Variación de la temperatura mínimas en la Región del Maule, donde Verano 1 corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de verano entre 1985 – 1989; Verano 2 corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de verano entre 1990 – 1999; Verano 3 corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de verano entre 2000 – 2009 y Verano 4 corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de verano entre 2010 – 2020. En las estaciones, 1 Potrero Grande DGA; 2 Talca UC DGA; 3 Colorado DGA; 4 Ancoa Embalse DGA; 5 Digua Embalse DGA; 6 Parral DGA; 7 Penciahue DGA; 8 Río Claro en Rauquén DGA; 9 Lo Aguirre DGA; 10 Río Maule en Armerillo DGA, 11 Río Melado en El Salto DGA; 12 Armerillo DGA; 13 Laguna de Torca DGA; 14 Curicó DGA; 15 Constitución DGA; 16 Río Cipreces en Desagüe Laguna La Invernada DGA; 17 Río Claro En San Carlos DGA y 18 Los Condores DGA. Fuente: Elaboración propia.

A diferencia de las temperaturas máximas en la Región del Maule, las mínimas tendieron más al aumento, presentando crecimiento en sus valores durante el período de tiempo analizado, ocho de las once estaciones que presentan valores continuos durante las cuatro décadas. A su vez, sólo tres estaciones presentan disminución de las temperaturas mínimas (ver gráfico 7).

En el caso de las regiones de Ñuble y Biobío, la situación es diferente a las regiones anteriores por la escasez de datos que existe. En la Región de Ñuble, sólo existen tres estaciones meteorológicas, una ubicada en la zona norte del valle central y las otras dos en la zona norcordillerana, por lo que, no existen datos de la zona costera. Sin embargo, las tres estaciones cuentan con datos desde el año 1985 al año 2020.

Por su parte la Región del Biobío cuenta con seis estaciones meteorológicas, con una distribución concentrada en la zona surcordillerana, teniendo solo las estaciones de Quilaco DGA y Diguillín DGA datos desde 1985 a 2020.

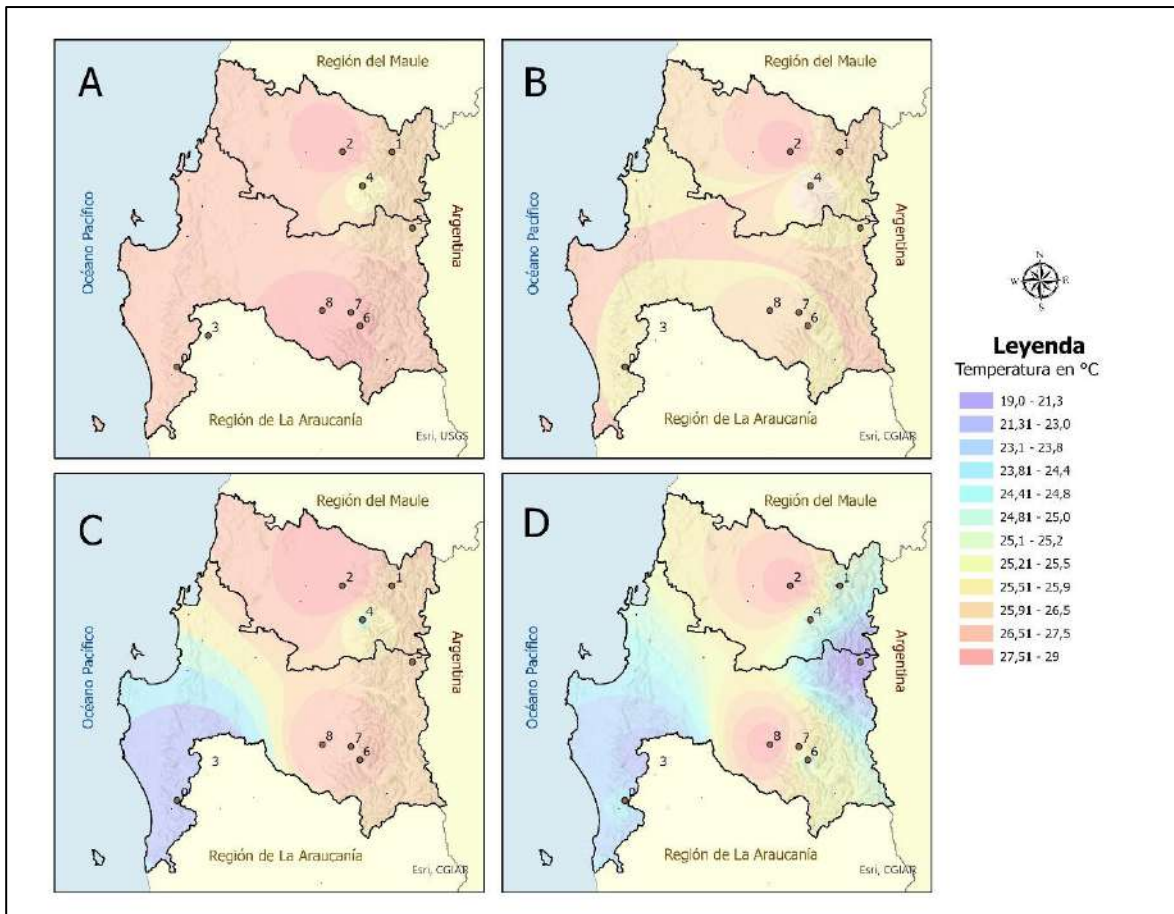


Figura 15: Distribución espacial de la variación de temperatura en las Regiones del Ñuble y Biobío, donde A corresponde al promedio de las temperaturas máximas de verano entre 1985 – 1989; B corresponde al promedio de las temperaturas máximas de verano entre 1990 – 1999; C corresponde al promedio de las temperaturas máximas de verano entre 2000 – 2009 y D corresponde al promedio de las temperaturas máximas de verano entre 2010 – 2020. Las estaciones corresponden a: 1 Caracol DGA; 2 Coihueco Embalse DGA; 3 Parque Nahuelbuta DGA; 4 Diguillín DGA; 5 Alto Mallines DGA; 6 Río Biobío En La Culebra DGA; 7 Río Huequecura Aguas Arriba Embalse Angostura DGA; 8 Quilaco DGA y 9 Contulmo DGA. Fuente: Elaboración propia.

El resto de las estaciones sólo registra datos desde 2011 al 2020. Dado lo anterior, se trabajó con ambas regiones en conjunto para poder interpolar de manera más adecuada los datos (ver figura 15).

Así, la Región de Ñuble, se presenta estable en sus temperaturas máximas, con variaciones que van entre 0,1°C a 0,4°C, no evidenciándose una disminución o aumento importante de la temperatura máxima en verano. La estación Caracol DGA registro una disminución de 0,4°C, evidenciando un pequeño enfriamiento en la zona cordillerana; mientras que la estación Coihueco Embalse DGA registro un aumento de 0,71°C.

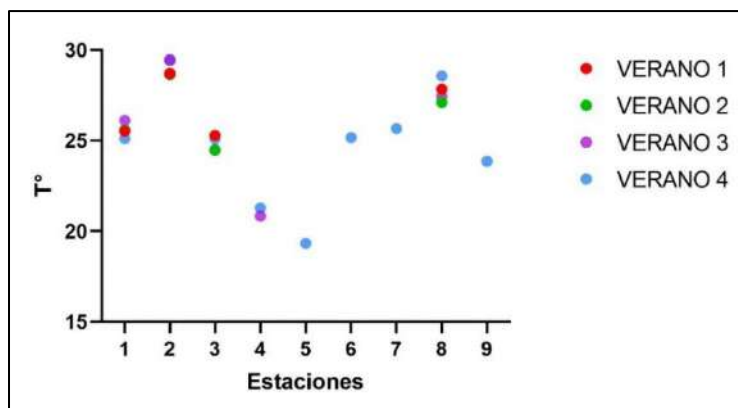


Gráfico 8: Variación de temperatura en las Regiones del Ñuble y Biobío, donde Verano 1 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de verano entre 1985 – 1989; Verano 2 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de verano entre 1990 – 1999; Verano 3 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de verano entre 2000 – 2009 y Verano 4 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de verano entre 2010 – 2020. Las estaciones corresponden a: 1 Caracol DGA; 2 Coihueco Embalse DGA; 3 Parque Nahuelbuta DGA; 4 Diguillín DGA; 5 Alto Mallines DGA; 6 Río Biobío En La Culebra DGA; 7 Río Huequecura Aguas Arriba Embalse Angostura DGA; 8 Quilaco DGA y 9 Contulmo DGA. Fuente: Elaboración propia.

Por su parte, en la Región del Biobío, la estación Quilaco DGA de la es la única estación que presenta continuidad de los registros meteorológicos desde 1985, y se puede evidenciar una variación en sus datos con un aumento de 0,74°C. El resto de las estaciones no permiten analizar el comportamiento de las temperaturas, ya que, como se mencionó, sólo cuentan con datos del último decenio (ver gráfico 8).

En relación a las temperaturas mínimas, tanto la Región de Ñuble como la de Biobío registran un aumento a lo largo del tiempo, donde se puede observar en la figura 16 el cambio en la temperatura mínima en la zona del valle, primeramente, en la década de 1990 al 2000, para luego evidenciar un aumento general en ambas regiones, particularmente en las estaciones de Coihueco Embalse DGA y Diguillín DGA con aumentos de 1,6°C y 1,5°C respectivamente, ambas de la región de Ñuble.

En el caso de la Región del Biobío, la estación que registro un mayor aumento en sus temperaturas mínimas fue la estación de Quilaco con un aumento de 3,17°C, siendo el mayor aumento registrado en el área de estudio. Le sigue la estación de Contulmo con 1,5°C. El resto experimento aumentos entre 0,25°C y 1,0°C.

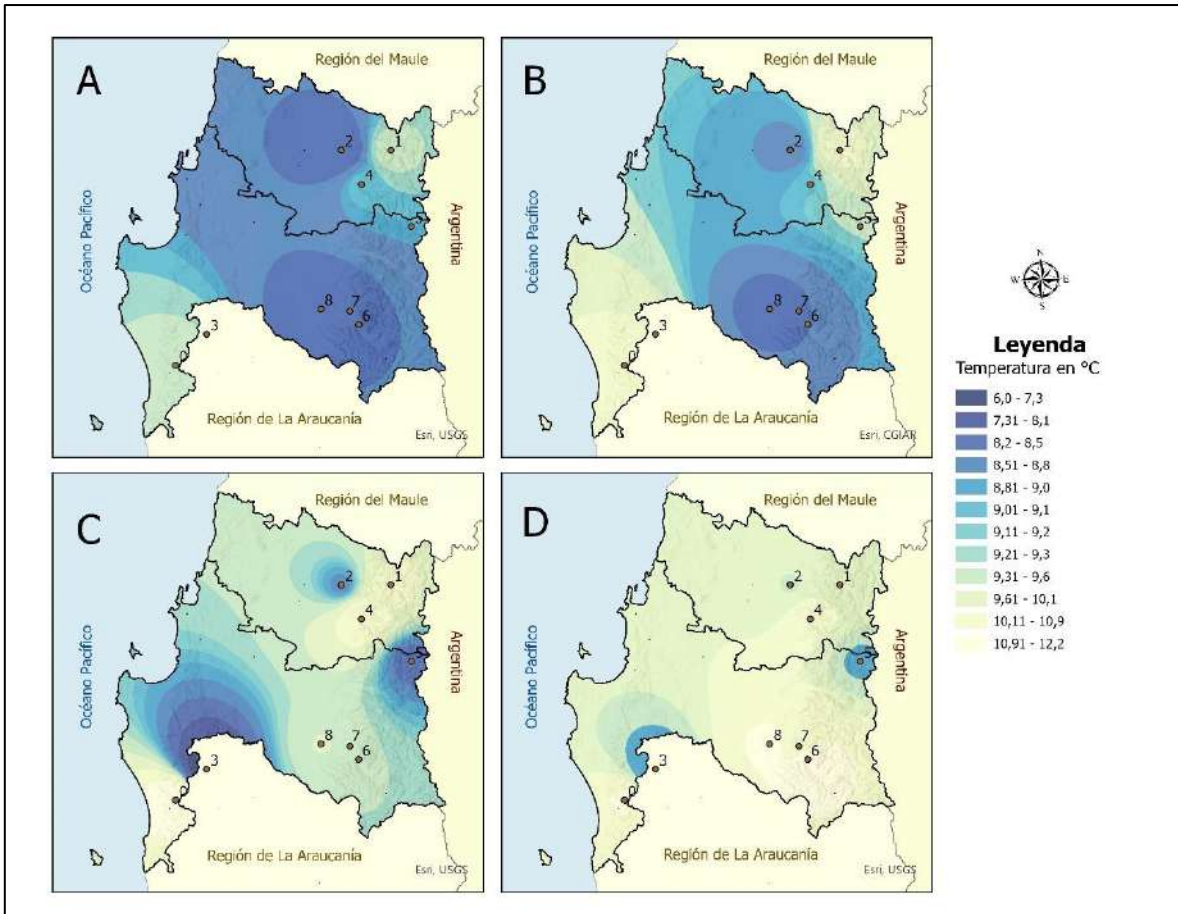


Figura 16: Distribución espacial de la variación de temperatura en las Regiones del Ñuble y Biobío, donde A corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de verano entre 1985 – 1989; B corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de verano entre 1990 – 1999; C corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de verano entre 2000 – 2009 y D corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de verano entre 2010 – 2020. Las estaciones corresponden a: 1 Caracol DGA; 2 Coihueco Embalse DGA; 3 Parque Nahuelbuta DGA; 4 Diguillín DGA; 5 Alto Mallines DGA; 6 Río Biobío En La Culebra DGA; 7 Río Huequecura Aguas Arriba Embalse Angostura DGA; 8 Quilaco DGA y 9 Contulmo DGA. Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a las cartografías de la figura 16, pareciera que se produce una disminución de las temperaturas mínimas en la zona cercana a la estación Parque Nahuelbuta, pero esto puede deberse a la incorporación de los datos de esta estación desde el año 2000 en adelante, no habiendo registros en las décadas anteriores analizadas. Este problema se hace recurrente en el análisis de la variación de la temperatura en la Región del Biobío. Pese a lo anterior, en las dos últimas décadas analizadas, es decir desde el año 2000 en adelante, se produce un aumento de las temperaturas mínimas en la zona.

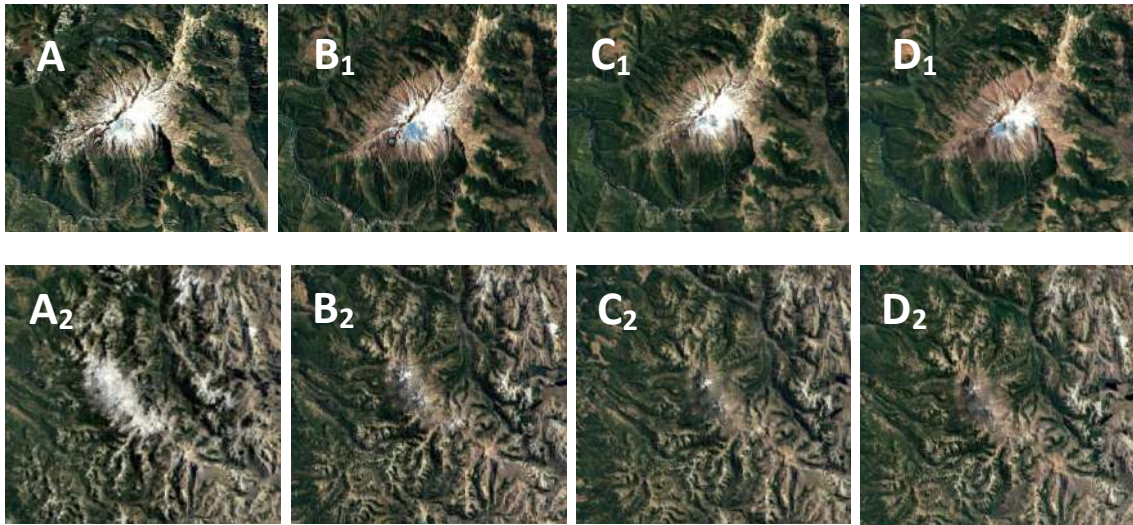


Figura 17: Disminución del volumen de nieve zona Cordillera de Los Andes Regiones del Biobío y Ñuble, imágenes satelitales obtenidas desde Google Earth Pro donde 1 corresponde al Volcán Callaqui Región del Biobío y 2 corresponde al Complejo Volcánico Nevados de Chillán de la Región de Ñuble; A corresponde a verano del año 1990, B corresponde a verano de año 2000, C corresponde a verano del año 2010 y D corresponde a verano del año 2020.

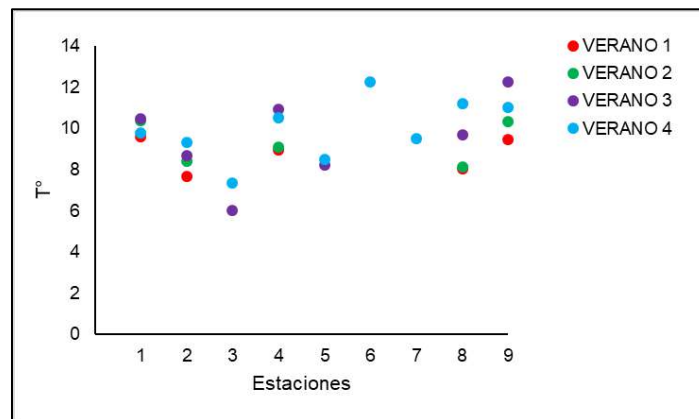


Gráfico 9: Variación de temperatura en las Regiones del Ñuble y Biobío, donde A corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de verano entre 1985 – 1989; B corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de verano entre 1990 – 1999; C corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de verano entre 2000 – 2009 y D corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de verano entre 2010 – 2020. Las estaciones corresponden a: 1 Caracol DGA; 2 Coihueco Embalse DGA; 3 Parque Nahuelbuta DGA; 4 Diguillin DGA; 5 Alto Mallines DGA; 6 Río Biobío En La Culebra DGA; 7 Río Huequecura Aguas Arriba Embalse Angostura DGA; 8 Quilaco DGA y 9 Contulmo DGA. Fuente: Elaboración propia.

Este importante aumento en la estación de Quilaco, habría hecho aumentar de manera importante las temperaturas mínimas de todo el valle central de la región del Biobío, destacando el aumento de la zona de la Cordillera de la los Andes donde el déficit de nieve de un 12% según la Dirección Meteorológica de Chile (ver figura 17). Este mismo hecho, se puede observar en el gráfico 9, donde se observa el

aumento sostenido a través del tiempo. De acuerdo a los datos analizados, en todos los decenios se producen aumentos de temperaturas mínimas, siendo las estaciones de Contulmo y Quilaco, tal como se mencionó, las que registra los mayores aumentos en el tiempo analizado.

3.3.1.2 Estación de Otoño

Para la estación de otoño, en la Región de Valparaíso se registraron datos de manera continua, desde el año 1985 al 2020, ocho de las once estaciones meteorológicas que existen en la región.

Esto permitió observar una variación importante de las temperaturas tanto en número como en distribución espacial. Así, en la tanto en la zona costera como en la zona central de la región se aprecia una importante alza en las temperaturas máximas, siendo la estación Alicahue DGA, ubicada en la zona norte centro, la que experimentó un aumento de 3,4°C, la que, en conjunto con las estaciones ubicadas en esta zona, registraron un aumento sostenido de las temperaturas hasta el año 2009, en donde experimentan un pequeño descenso, pero siendo más altas que las temperaturas registradas en el año 1985. La estación Los Aromos, ubicada en la Cordillera de la Costa, experimentó un aumento de 2,7°C, produciendo que las temperaturas de la zona costera de la región se elevarán, particularmente, desde el año 2000 hasta el 2020, desde 17,9°C a 21,2°, en la provincia de San Antonio, ubicada en la parte suroeste de la región.

Una tercera estación que registro aumentos importantes en sus temperaturas máximas de otoño, fue Vilcuya DGA, ubicada en la parte oriental de la Cordillera de Los Andes, donde se registró un aumento de 2,2°C. Estos aumentos son muy significativos, si se considera que el informe de *Calentamiento global de 1,5°C del IPCC (2019)* estimaba “que las actividades humanas han causado un calentamiento global de aproximadamente 1,0°C con respecto a los niveles preindustriales, con un rango probable de 0,8°C a 1,2°C, destacando además que es probable que el calentamiento global llegue a 1,5°C entre 2030 y 2052”.

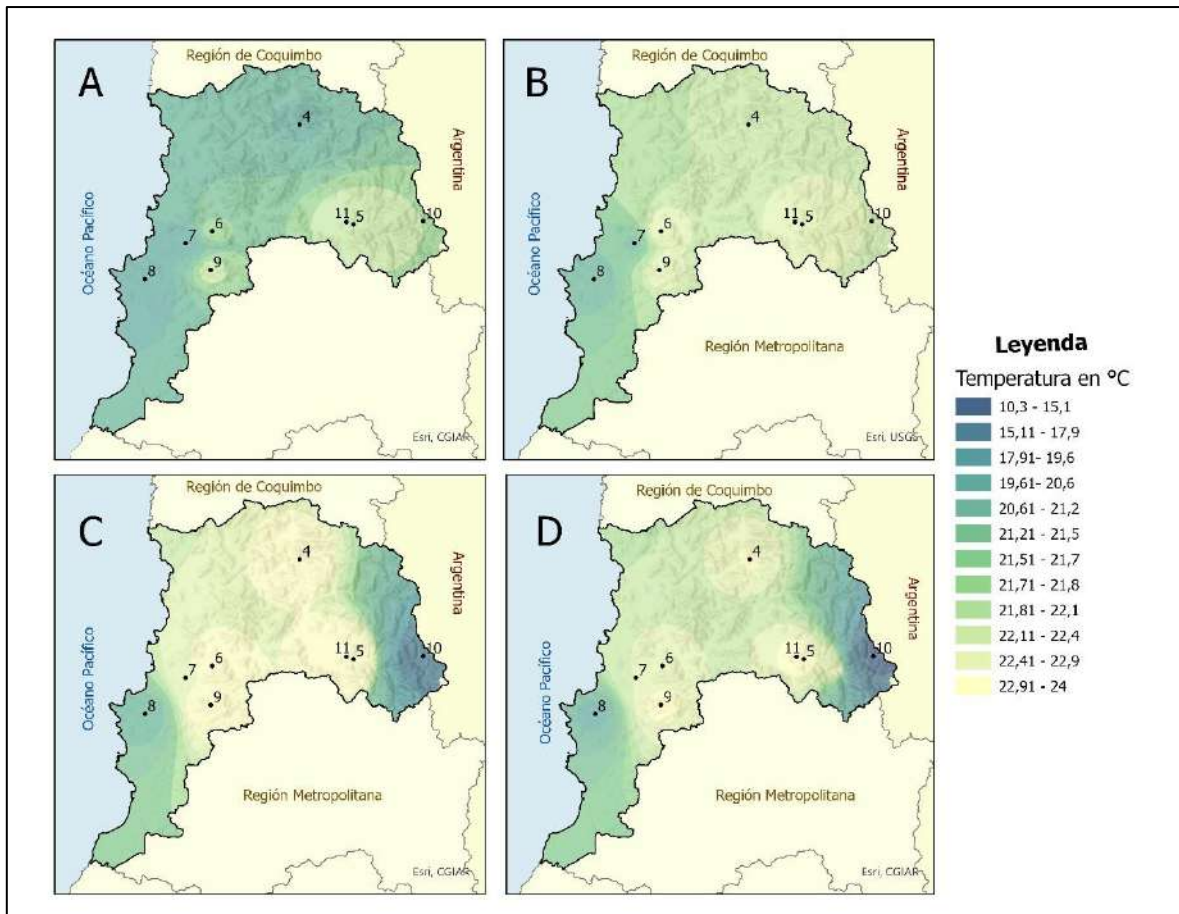


Figura 18: Distribución espacial de la variación de temperatura en la Valparaíso, donde A corresponde al promedio de las temperaturas máximas de otoño entre 1985 – 1989; B corresponde al promedio de las temperaturas máximas de otoño entre 1990 – 1999; C corresponde al promedio de las temperaturas máximas de otoño entre 2000 – 2009 y D corresponde al promedio de las temperaturas máximas de otoño entre 2010 – 2020. Las estaciones corresponden a: 1 Río Juncal en Juncal Dga; 2 Canal Colorado en Bocatoma Dga; 3 Alicahue (DGA); 4 Vilcuya DGA; 5 Quillota DGA; 6 Los Aromos DGA; 7 Lago Peñuelas DGA; 8 Lliu-Lliu Embalse DGA; 9 Río Aconcagua en Chacabuquito DGA y, 10 Portillo DGA. Fuente: Elaboración propia.

Considerando los aumentos de temperaturas máximas de otoño que se han alcanzado, es evidente que el calentamiento global se comporta de manera más acentuada en esta región.

Si bien la figura n°18 se muestra una disminución de las temperaturas en la parte de la Cordillera de Los Andes, se debe especificar que las estaciones Río Aconcagua En Chacabuquito DGA y Portillo DGA sólo registran datos desde el año 2000, por lo que esta disminución puede estar sesgada por la falta de datos, en

comparación al resto de las estaciones. Considerando lo anterior, se registra una disminución de $0,3^{\circ}\text{C}$ y $0,1^{\circ}\text{C}$ respectivamente.

Como se observa en el gráfico n°10, casi la totalidad de las estaciones registran un alza de las temperaturas máximas en otoño, salvo la estación Lago Peñuelas DGA, que, si bien presenta un aumento en su línea de tendencia, el último decenio analizado, muestra una baja de $0,5^{\circ}\text{C}$.

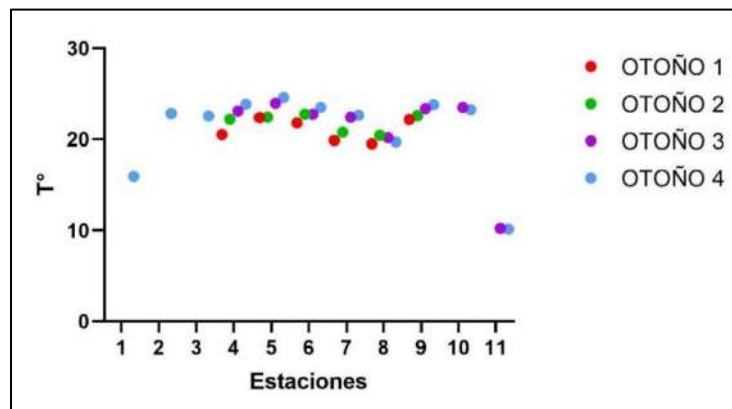


Gráfico 10: Variación de temperatura en la Valparaíso, donde Otoño 1 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de otoño entre 1985 – 1989; Otoño 2 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de otoño entre 1990 – 1999; Otoño 3 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de otoño entre 2000 – 2009 y Otoño 4 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de otoño entre 2010 – 2020. Las estaciones corresponden a: 1 Río Juncal en Juncal Dga; 2 Canal Colorado en Bocatoma Dga; 3 Alicahue (DGA); 4 Vilcuya DGA; 5 Quillota DGA; 6 Los Aromos DGA; 7 Lago Peñuelas DGA; 8 Lliu-Lliu Embalse DGA; 9 Río Aconcagua en Chacabuquito DGA y, 10 Portillo DGA. Fuente: Elaboración propia.

En relación a las temperaturas mínimas de la Región de Valparaíso, en términos de su distribución espacial, a diferencia de las máximas, éstas tendieron a disminuir sus valores. Si bien, de las diez estaciones presentes en la región, sólo seis registran valores durante todo el período de estudio, se puede observar una disminución de las temperaturas mínimas en la zona de la Cordillera de Los Andes, donde se ubican la estación meteorológica que registró una importante disminución: Vilcuya DGA con $1,0^{\circ}\text{C}$; y en el valle central, particularmente, en la zona norte de la región, donde se ubica la otra estación llamada Alicahue que registra la mayor baja con una disminución $1,6^{\circ}\text{C}$. La tercera estación que registra disminución importante en los valores de temperaturas mínimas es Quillota con $0,98^{\circ}\text{C}$, ubicada en la Cordillera de la Costa (ver figura 19).

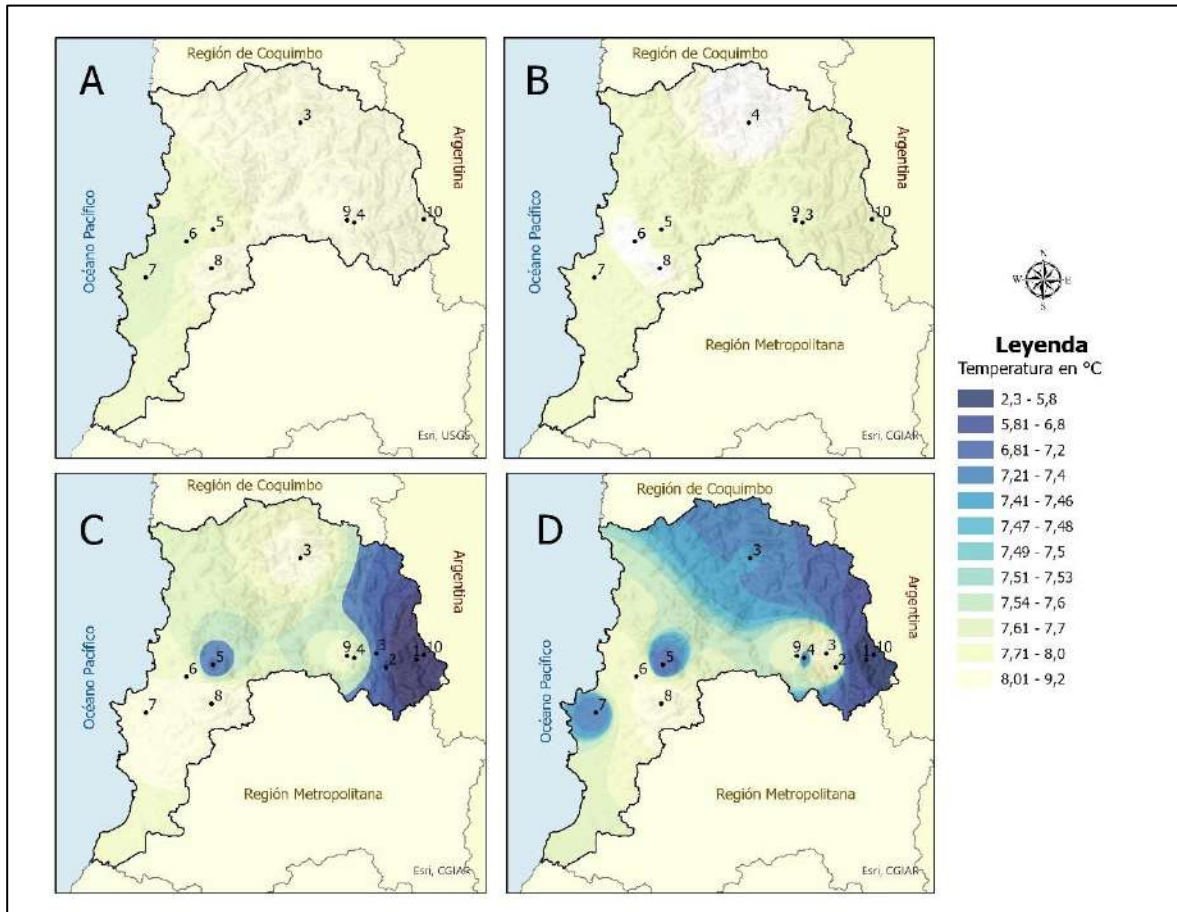


Figura 19 Distribución espacial de la variación de temperatura en la Valparaíso, donde A corresponde al promedio de las temperaturas mínima de otoño entre 1985 – 1989; B corresponde al promedio de las temperaturas mínima de otoño entre 1990 – 1999; C corresponde al promedio de las temperaturas mínima de otoño entre 2000 – 2009 y D corresponde al promedio de las temperaturas mínima de otoño entre 2010 – 2020. Las estaciones corresponden a: 1 Río Juncal en Juncal Dga; 2 Canal Colorado en Bocatoma Dga; 3 Alicahue (DGA); 4 Vilcuya DGA; 5 Quillota DGA; 6 Los Aromos DGA; 7 Lago Peñuelas DGA; 8 Lliu-Lliu Embalse DGA; 9 Río Aconcagua en Chacabuquito DGA y, 10 Portillo DGA. Fuente: Elaboración propia.

Por su parte, las estaciones de Los Aromos DGA, Lago Peñuelas DGA y Lliu-Lliu DGA registran aumentos leves entre 0,02°C y 0,7°C, lo que genera un aumento de las temperaturas en la provincia de San Antonio, ubicada en la parte suroeste de la región.

La distribución temporal de las temperaturas mínimas en la Región de Valparaíso muestra una tendencia a la disminución de sus valores desde el año 2000 en adelante. Como se explicó anteriormente, los registros de la mayoría de las estaciones en todo el país, se concentra en las dos últimas décadas, por lo que esto puede tender a la mala interpretación de los datos.

Si bien existen estaciones que han logrado registrar de manera continua desde el año 1985, la mayoría se concentra en la zona central y costera de la región, incorporándose nuevas estaciones con registros desde el año 2000, en la zona de la Cordillera de Los Andes. Pese a lo anterior, es posible determinar una disminución de las temperaturas en esta zona, dado que se cuenta con registros de los últimos 20 años, período razonable para este tipo de análisis (ver gráfico n°11).

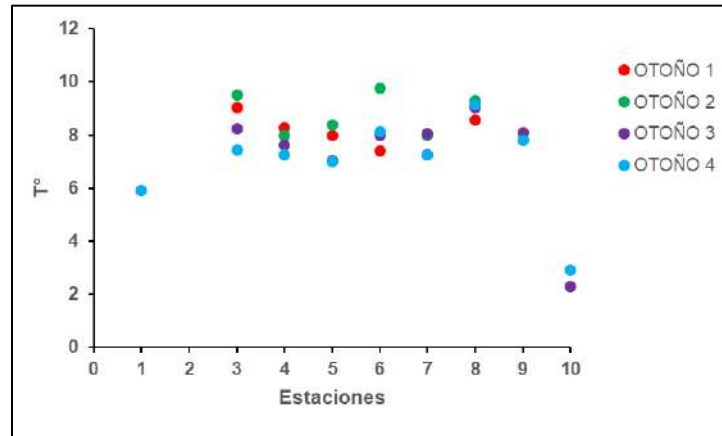


Gráfico 11: Variación de temperatura en la Valparaíso, donde Otoño 1 corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de otoño entre 1985 – 1989; Otoño 2 corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de otoño entre 1990 – 1999; Otoño 3 corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de otoño entre 2000 – 2009 y Otoño 4 corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de otoño entre 2010 – 2020. Las estaciones corresponden a: 1 Río Juncal en Juncal Dga; 2 Canal Colorado en Bocatoma Dga; 3 Alicahue (DGA); 4 Vilcuya DGA; 5 Quillota DGA; 6 Los Aromos DGA; 7 Lago Peñuelas DGA; 8 Lliu-Lliu Embalse DGA; 9 Río Aconcagua en Chacabuquito DGA y, 10 Portillo DGA.

En el caso de la Región del Maule, tal como se explicó anteriormente, existe una mayor cantidad de estaciones meteorológicas que permiten un análisis más preciso en cuanto a variaciones de temperaturas. En este sentido, la región cuenta con 18 estaciones, de las cuales, 8 presentan registros desde el año 1985 y 9 desde el año 1990, sumándose el resto de las estaciones en el año 2000.

Si bien no se aprecian grandes aumentos de temperaturas máximas en otoño, se destaca la estación Colorado DGA, siendo la única que registro un aumento sostenido de las temperaturas, alcanzando una diferencia entre los años 1985 y 2020 de 1,8°C.

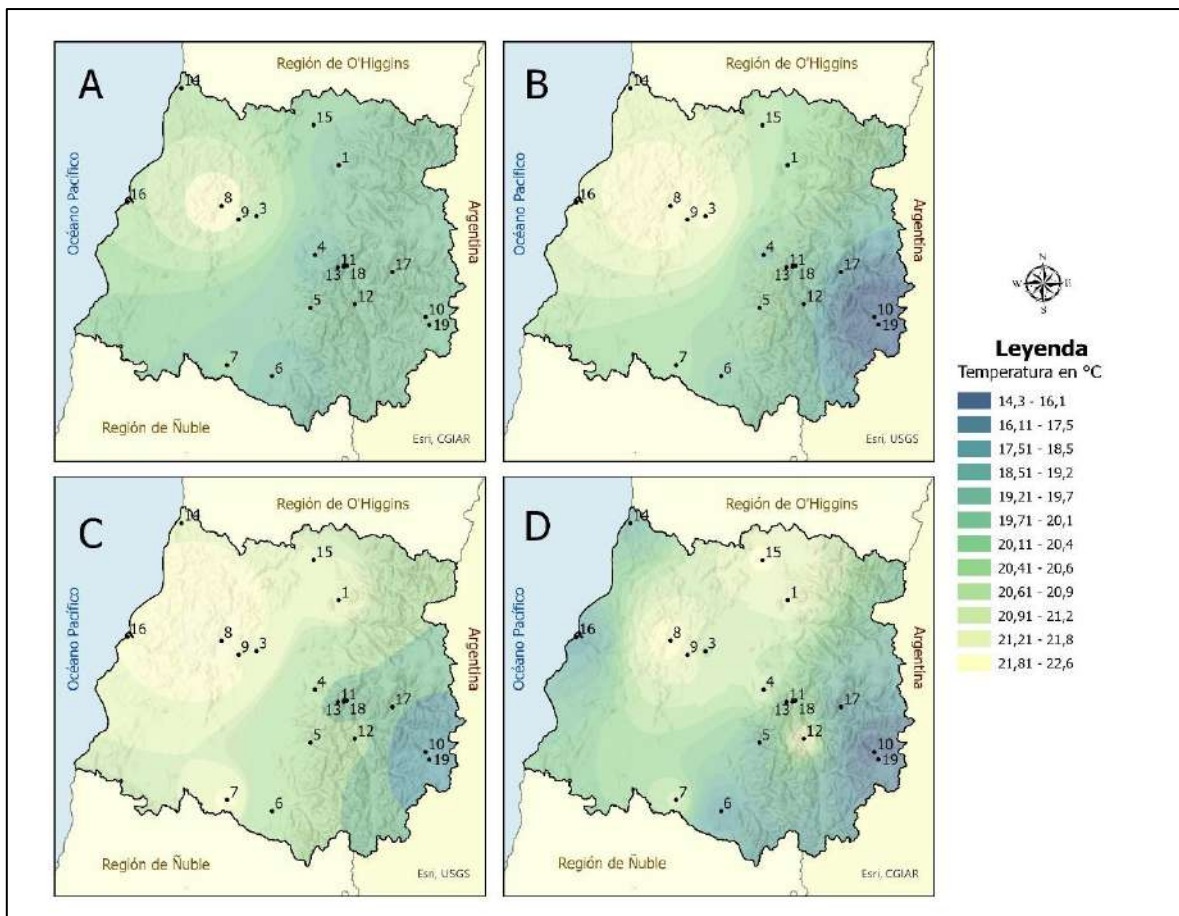


Figura 20: Distribución espacial de la variación de temperatura máxima en la Región del Maule, donde A corresponde al promedio de las temperaturas máxima de otoño entre 1985 – 1989; B corresponde al promedio de las temperaturas máxima de otoño entre 1990 – 1999; C corresponde al promedio de las temperaturas máxima de otoño entre 2000 – 2009 y D corresponde al promedio de las temperaturas máxima de otoño entre 2010 – 2020. Las estaciones corresponden a: 1 Potrero Grande DGA; 2 Talca UC DGA; 3 Colorado DGA; 4 Ancoa Embalse DGA; 5 Digua Embalse DGA; 6 Parral DGA; 7 Pencahue DGA; 8 Rio Claro en Rauquén DGA; 9 Lo Aguirre DGA; 10 Rio Maule en Armerillo DGA; 11 Rio Melado en El Salto DGA; 12 Armerillo DGA; 13 Laguna de Torca DGA; 14 Curico DGA; 15 Constitucion DGA; 16 Rio Cipreces en Desagüe Laguna La Invernada DGA; 17 Rio Claro En San Carlos DGA y 18 Los Condores DGA. Fuente: Elaboración propia.

Al estar ubicada en la vertiente oriental de la Cordillera de la Costa, se puede observar una distribución de las temperaturas con tendencia al aumento en la zona del valle central de la región. Sin embargo, en los últimos decenios analizados se muestra una disminución de las temperaturas en la misma zona, provocado por la disminución de las temperaturas registradas por las otras estaciones meteorológicas aledañas.

Al observar la figura 20, se puede ver que existe una tendencia al aumento de las temperaturas y su distribución geoespacial en la región, particularmente, en la zona centro y costera de la región, para luego identificarse una disminución de las temperaturas en el último decenio, especialmente, en la zona costera y sur de la región.

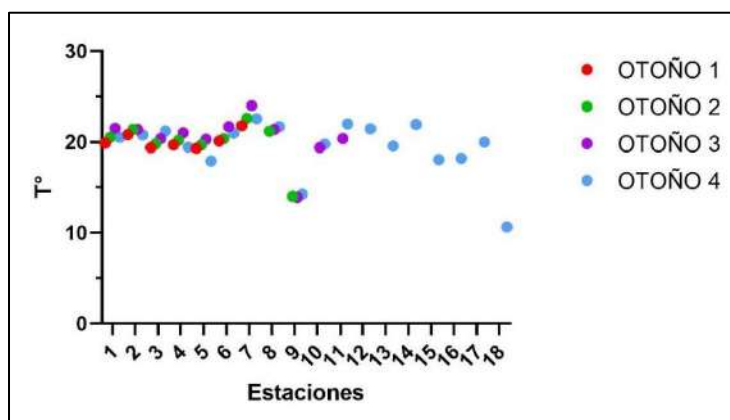


Gráfico 12 Variación temporal de la temperatura máxima en la Región del Maule, donde Otoño 1 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de otoño entre 1985 – 1989; Otoño 2 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de otoño entre 1990 – 1999; Otoño 3 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de otoño entre 2000 – 2009 y Otoño 4 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de otoño entre 2010 – 2020. En las estaciones, 1 Potrero Grande DGA; 2 Talca UC DGA; 3 Colorado DGA; 4 Ancoa Embalse DGA; 5 Digua Embalse DGA; 6 Parral DGA; 7 Penciahue DGA; 8 Río Claro en Rauquén DGA; 9 Lo Aguirre DGA; 10 Río Maule en Armerillo DGA, 11 Río Melado en El Salto DGA; 12 Armerillo DGA; 13 Laguna de Torca DGA; 14 Curicó DGA; 15 Constitución DGA; 16 Río Cipreces en Desagüe Laguna La Invernada DGA; 17 Río Claro En San Carlos DGA y 18 Los Cóndores DGA. Fuente: Elaboración propia.

Ahora, dado las estaciones que se suman en el año 2000, las que se distribuyen por toda la región, se aprecia una disminución de las temperaturas en la zona costera y del al Cordillera de Los Andes de la región del Maule, sin embargo, esta aparente baja en la distribución geoespacial de las temperaturas está influenciada por la incorporación de datos que no se tenían en los años anteriores.

Situación similar se presenta en las estaciones de Parral DGA y Penciahue DGA ubicadas en la zona centro sur de la región, donde se presenta un aumento de 1,6°C y 2,2°C entre los años 1985 y 2010, para luego disminuir sus temperaturas en el último decenio analizado de 0,7°C y 1,4°C respectivamente.

Las temperaturas mínimas de otoño de la Región del Maule se comporta de manera diferente a las temperaturas máximas en cuanto a su distribución espacial, dado que se puede observar un aumento importante en la zona del borde costero y la zona cordillerana central, donde la estación Río Maule en Armerillo DGA presenta un aumento de las temperaturas mínimas de 2,0°C, seguida por la Estación Ancoa Embalse DGA con un aumento de 1,7°C, ambas estaciones cercanas entre sí ubicadas en la parte occidental de la Cordillera de Los Andes (ver figura 21).

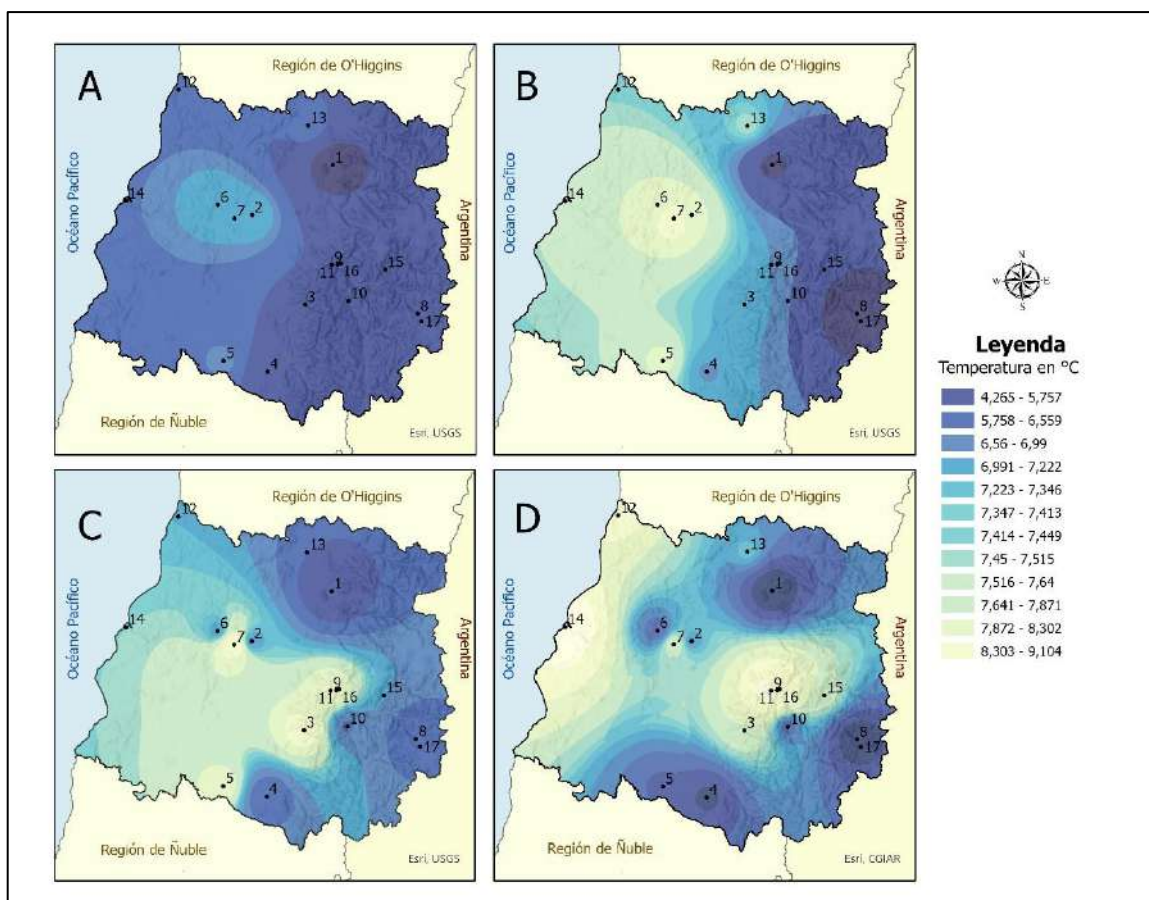


Figura 21: Distribución espacial de la variación de temperatura máxima en la Región del Maule, donde A corresponde al promedio de las temperaturas mínima de otoño entre 1985 – 1989; B corresponde al promedio de las temperaturas mínima de otoño entre 1990 – 1999; C corresponde al promedio de las temperaturas mínima de otoño entre 2000 – 2009 y D corresponde al promedio de las temperaturas mínima de otoño entre 2010 – 2020. Las estaciones corresponden a: 1 Potrero Grande DGA; 2 Talca UC DGA; 3 Colorado DGA; 4 Ancoa Embalse DGA; 5 Digua Embalse DGA; 6 Parral DGA; 7 Pencahue DGA; 8 Río Claro en Rauquén DGA; 9 Lo Aguirre DGA; 10 Río Maule en Armerillo DGA, 11 Río Melado en El Salto DGA; 12 Armerillo DGA; 13 Laguna de Torca DGA; 14 Curico DGA; 15 Constitución DGA; 16 Río Cipreces en Desagüe Laguna La Invernada DGA; 17 Río Claro En San Carlos DGA y 18 Los Condores DGA. Fuente: Elaboración propia.

En la parte sur de la región, se aprecia un leve enfriamiento, con una disminución de las temperaturas mínimas en las estaciones de Digua Embalse DGA y Parral DGA con 0,46°C y 0,54°C respectivamente. La estación de Pencahue, ubicada en la Cordillera de la Costa, también registra una disminución en sus valores de 0,64°C.

En cuanto a la variación de la distribución temporal de las temperaturas mínimas en la Región del Maule, si se analizan las estaciones meteorológicas que presentan registros de manera continua en al menos, las tres últimas décadas estudiadas (las cuales incluye las estaciones de la 1 a la 8, más la número 13), se puede observar que todas ellas registraron un aumento de las temperaturas mínimas entre los años 1990 al 1999, manteniendo la tendencia al aumento en los años siguientes comprendidos entre el 2000 y 2009, las estaciones de Parral DGA, Río Claro en Rauquén DGA y lo Aguirre DGA, alcanzando esta última un alza de 1,73°C. Sin embargo, las estaciones de Potrero Grande DGA, Talca UC DGA, Digua Embalse DGA, Pencahue DGA mostraron una disminución de los valores entre 0,7°C y 0,98°C. Destaca la estación Ancoa Embalse DGA la cual registró un aumento sostenido de las temperaturas mínimas durante todo el período analizado (ver gráfico 13).

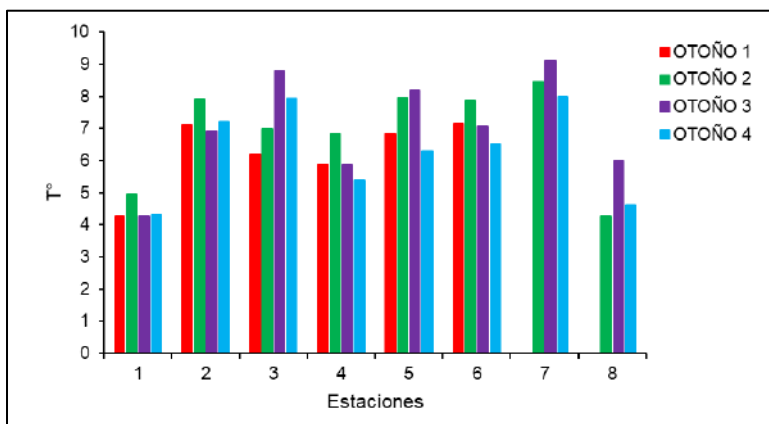


Gráfico 13: Variación temporal de la temperatura mínimas en la Región del Maule, donde Otoño 1 corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de otoño entre 1985 – 1989; Otoño 2 corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de otoño entre 1990 – 1999; Otoño 3 corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de otoño entre 2000 – 2009 y Otoño 4 corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de otoño entre 2010 – 2020. En las estaciones, 1 Potrero Grande DGA; 2 Talca UC DGA; 3 Colorado DGA; 4 Ancoa Embalse DGA; 5 Digua Embalse DGA; 6 Parral DGA; 7 Pencahue DGA; 8 Río Claro en Rauquén DGA; Fuente: Elaboración propia.

Como se puede ver en el gráfico 14, acorde a lo explicado en el gráfico anterior, se puede observar que, en varias estaciones, el punto de color celeste, correspondiente a la década analizada entre los años 2010 y 2020, se ubica debajo de los puntos de verdes y morados, correspondientes a los períodos de 1990 al 1999 y 2000 al 2009 respectivamente, lo que evidencia la disminución de las temperaturas mínimas en la región.

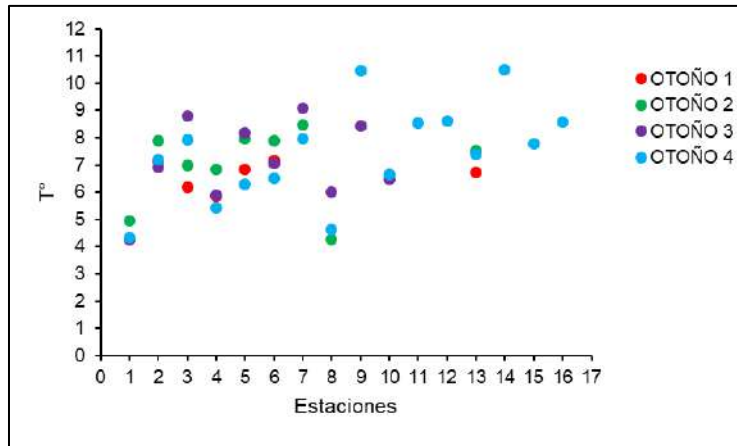


Gráfico 14: Variación temporal de la temperatura mínimas en la Región del Maule, donde Otoño 1 corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de otoño entre 1985 – 1989; Otoño 2 corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de otoño entre 1990 – 1999; Otoño 3 corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de otoño entre 2000 – 2009 y Otoño 4 corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de otoño entre 2010 – 2020. En las estaciones, 1 Potrero Grande DGA; 2 Talca UC DGA; 3 Colorado DGA; 4 Ancoa Embalse DGA; 5 Digua Embalse DGA; 6 Parral DGA; 7 Pencahue DGA; 8 Rio Claro en Rauquén DGA; 9 Lo Aguirre DGA; 10 Rio Maule en Armerillo DGA, 11 Rio Melado en El Salto DGA; 12 Armerillo DGA; 13 Laguna de Torca DGA; 14 Curicó DGA; 15 Constitución DGA; 16 Rio Cipreces en Desagüe Laguna La Invernada DGA; 17 Rio Claro En San Carlos DGA y 18 Los Cóndores DGA. Fuente: Elaboración propia.

La Región de Ñuble en otoño, a diferencia de la estación de verano, presentó un aumento en tres estaciones meteorológicas, entre 0,78°C y 0,95°C, siendo sólo la estación Parque Nahuelbuta la que registró una disminución de 0,8°C. Dado que estas tres estaciones registraron datos desde el año 1985, es confiable indicar que se evidencia un aumento de las temperaturas máximas de otoño en la zona nororiente de la región, siendo mayor en el último decenio (D) donde solo en 10 años, las temperaturas máximas de otoño aumentaron, en promedio, entre 0,5°C y 0,8°C (ver figura 22).

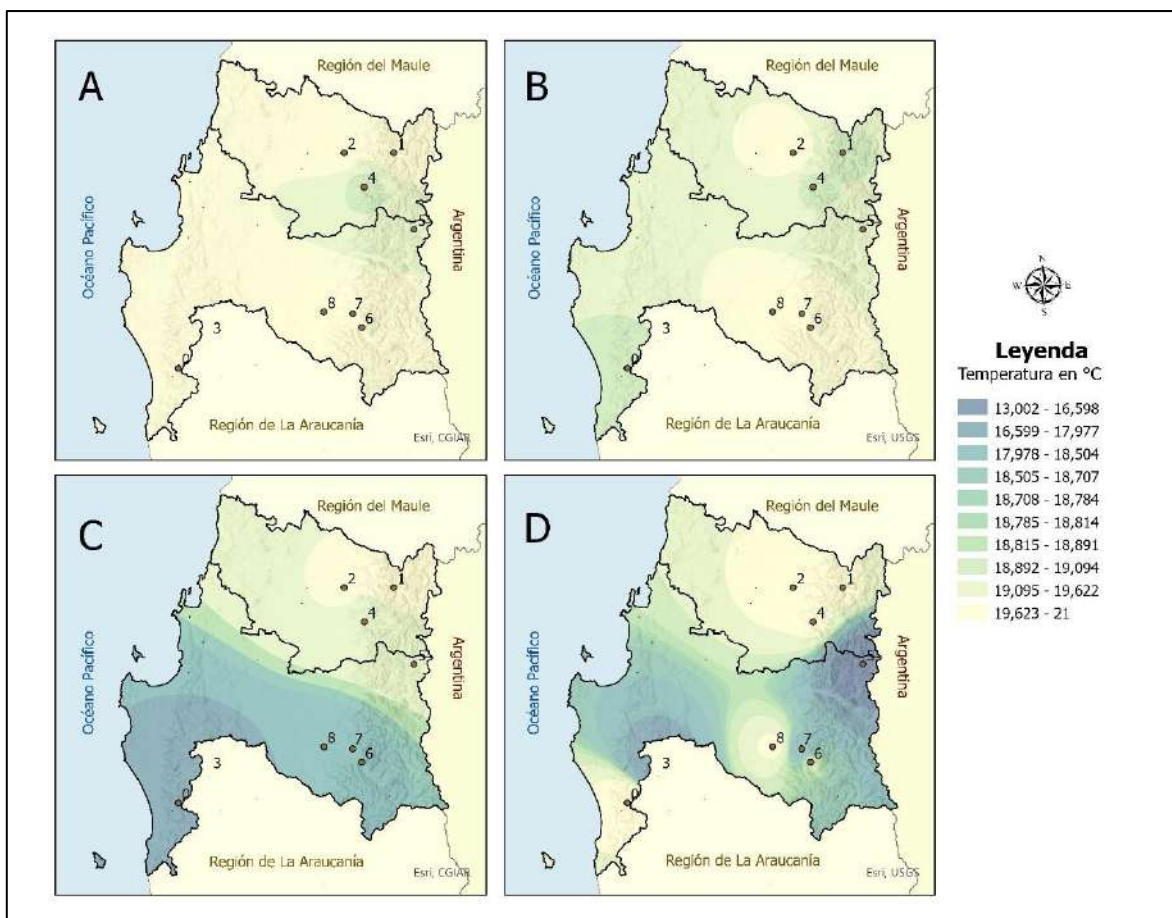


Figura 22: Distribución espacial de la variación de temperatura en las Regiones del Ñuble y Biobío, donde A corresponde al promedio de las temperaturas máximas de otoño entre 1985 – 1989; B corresponde al promedio de las temperaturas máximas de otoño entre 1990 – 1999; C corresponde al promedio de las temperaturas máximas de otoño entre 2000 – 2009 y D corresponde al promedio de las temperaturas máximas de otoño entre 2010 – 2020. Las estaciones corresponden a: 1 Caracol DGA; 2 Coihueco Embalse DGA; 3 Parque Nahuelbuta DGA; 4 Diguillin DGA; 5 Alto Mallines DGA; 6 Río Biobío En La Culebra DGA; 7 Río Huequecura Aguas Arriba Embalse Angostura DGA; 8 Quilaco DGA y 9 Contulmo DGA. Fuente: Elaboración propia.

En el caso de la Región del Biobío, los datos registrados en esta estación no permiten realizar mayor análisis, ya que, de las cinco estaciones, solo la estación Quilaco DGA registran información desde el año 1985 para otoño, el resto de las estaciones presentan datos sólo desde el año 2010.

En cuanto a la temperatura mínima de las regiones de Ñuble y Biobío, la distribución espacial similar a las temperaturas mínimas donde se observa una baja de los valores en la Región del Ñuble, particularmente en la parte de la Cordillera de Los Andes, y la zona centro sur de la Región del Biobío. Como se ha mencionado

anteriormente, las estaciones meteorológicas de estas regiones son muy escasas en comparación a las otras regiones estudiadas.

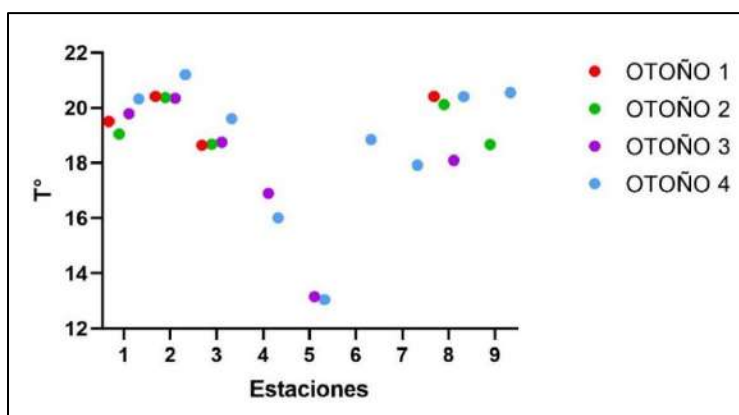


Gráfico 15: Variación temporal de temperatura en las Regiones del Ñuble y Biobío, donde Otoño 1 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de otoño entre 1985 – 1989; Otoño 2 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de otoño entre 1990 – 1999; Otoño 3 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de otoño entre 2000 – 2009 y Otoño 4 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de otoño entre 2010 – 2020. Las estaciones corresponden a: 1 Caracol DGA; 2 Coihueco Embalse DGA; 3 Parque Nahuelbuta DGA; 4 Diguillín DGA; 5 Alto Mallines DGA; 6 Río Biobío En La Culebra DGA; 7 Río Huequecura Aguas Arriba Embalse Angostura DGA; 8 Quilaco DGA y 9 Contulmo DGA. Fuente: Elaboración propia.

Pese a lo anterior, puede observarse un aumento de las temperaturas mínimas en la Región del Biobío en su parte sur, dada por los valores registrados en la Estación Quilaco DGA, la que cuenta con registros desde el año 1985, con un aumento importante de 3,6°C. Así, de las 7 estaciones que cuentan con datos desde el año 1985 en ambas regiones, sólo tres de ellas registran aumentos, Quilaco DGA, Contulmo DGA y Parque Nahuelbuta DGA con aumentos de 3,6°C, 1,0°C y 1,2°C respectivamente (todas ubicadas en la Región del Biobío) (ver figura 23).

El resto de las estaciones marcan disminuciones en sus valores. Las estaciones Alto Mallines, Diguillín, Coihueco Embalse y Caracol DGA presentan disminuciones de 0,1°C, 0,6°C, 2,0°C y 2,2°C respectivamente.

Como se puede apreciar en el gráfico 16, son pocas las estaciones que registran datos desde el año 1985 (otoño 1), sin embargo, pese a lo anterior, se puede observar una baja de las temperaturas mínimas, particularmente, en los dos últimos decenios.

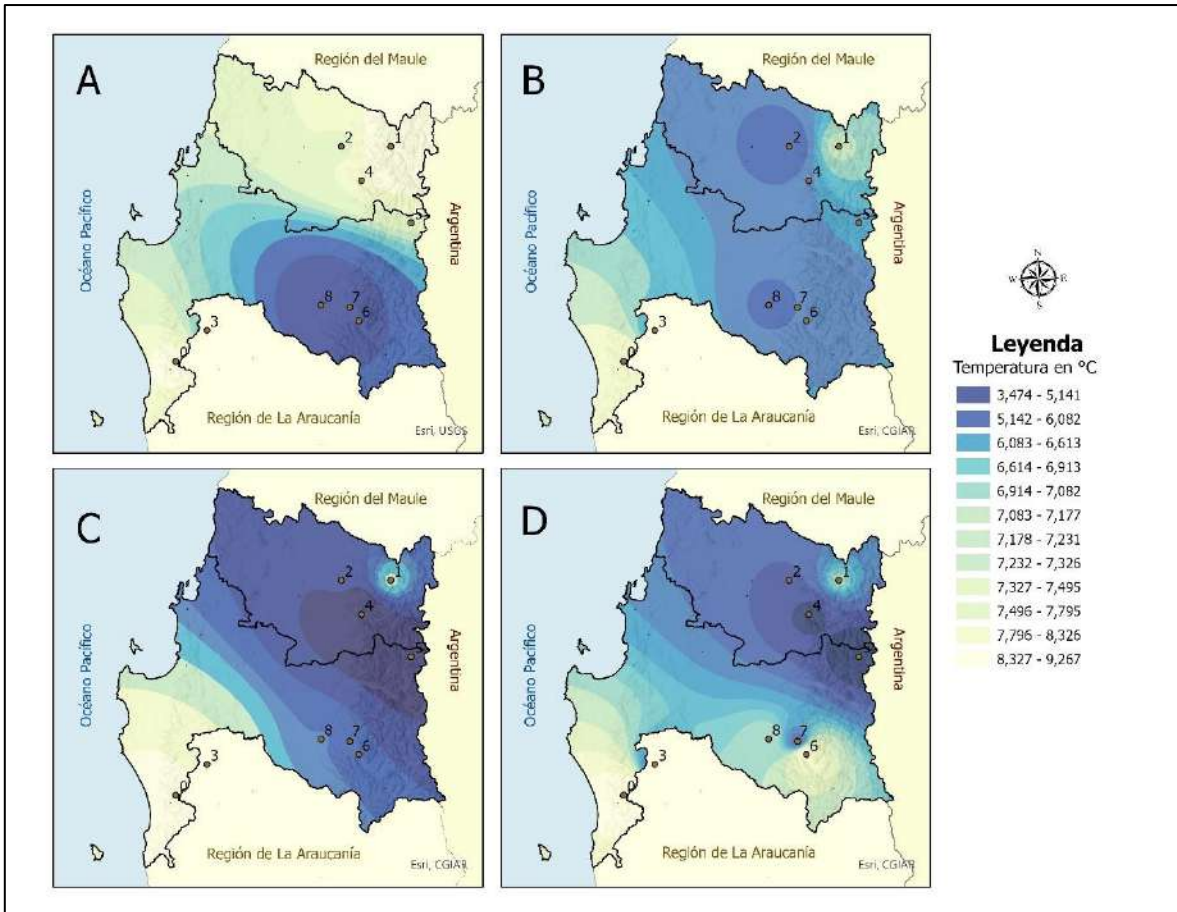


Figura 23: Distribución espacial de la variación de temperatura en las Regiones del Ñuble y Biobío, donde A corresponde al promedio de las temperaturas mínima de otoño entre 1985 – 1989; B corresponde al promedio de las temperaturas mínima de otoño entre 1990 – 1999; C corresponde al promedio de las temperaturas mínima de otoño entre 2000 – 2009 y D corresponde al promedio de las temperaturas mínima de otoño entre 2010 – 2020. Las estaciones corresponden a: 1 Caracol DGA; 2 Coihueco Embalse DGA; 3 Parque Nahuelbuta DGA; 4 Diguillin DGA; 5 Alto Mallines DGA; 6 Rio Biobío En La Culebra DGA; 7 Rio Huequecura Aguas Arriba Embalse Angostura DGA; 8 Quilaco DGA y 9 Contulmo DGA. Fuente: Elaboración propia.

A diferencia de la Región del Maule, no se logran identificar períodos de tiempo en los cuales haya habido un aumento o disminución importante de temperaturas, sino que, al contrario, se observan disminuciones o aumentos permanentes en las estaciones, de acuerdo a lo descrito anteriormente.

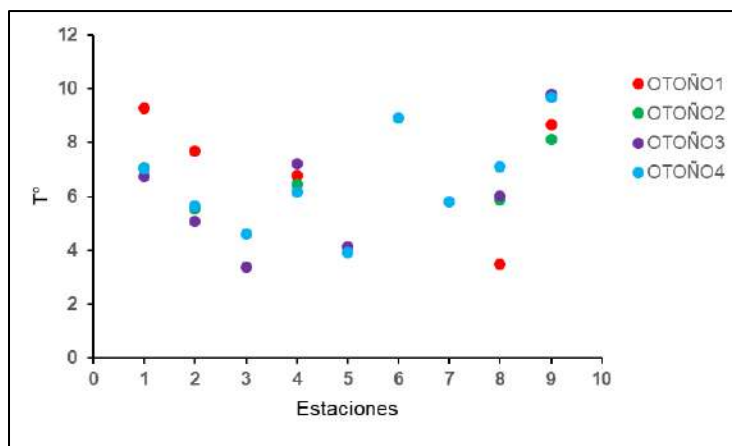


Gráfico 16: Variación temporal de temperatura en las Regiones del Ñuble y Biobío, donde Otoño 1 corresponde al promedio de las temperaturas mínima de otoño entre 1985 – 1989; Otoño 2 corresponde al promedio de las temperaturas mínima de otoño entre 1990 – 1999; Otoño 3 corresponde al promedio de las temperaturas mínima de otoño entre 2000 – 2009 y Otoño 4 corresponde al promedio de las temperaturas mínima de otoño entre 2010 – 2020. Las estaciones corresponden a: 1 Caracol DGA; 2 Coihueco Embalse DGA; 3 Parque Nahuelbuta DGA; 4 Diguillin DGA; 5 Alto Mallines DGA; 6 Río Biobío En La Culebra DGA; 7 Río Huequecura Aguas Arriba Embalse Angostura DGA; 8 Quilaco DGA y 9 Contulmo DGA. Fuente: Elaboración propia.

4.3.1.3 Estación de Invierno

En la estación de invierno, la Región de Valparaíso, al igual que en las estaciones de verano y otoño, presentó aumento en los valores de temperaturas máximas de invierno, alcanzando un alza de 1,1°C en la estación Los Aromos. Esta estación ha sido la que mayores aumentos de temperatura ha alcanzado en todas las estaciones climáticas. Si bien el resto de las estaciones también presentan aumento que van desde 0,6°C a 0,9°C. Al presentar la región estaciones meteorológicas con datos desde el año 1985 al 2020, distribuidas de manera uniforme, se logra realizar un análisis más acorde a la realidad climática, a diferencia de otras regiones, donde los datos se concentran en sólo en sectores de la región, no logrando una visión completa de la región. En este caso, de acuerdo a la distribución geoespacial de las estaciones meteorológicas, se puede identificar un aumento de las temperaturas en la zona del valle central.

El enfriamiento que se ve en la zona de la Cordillera de Los Andes se da dado que en el año 2000 se incorporan las estaciones de Portillo DGA y Río Aconcagua en

Chacabuquito DGA, sumando las temperaturas reales del lugar y no las obtenidas por medio de interpolación de datos (ver figura 24).

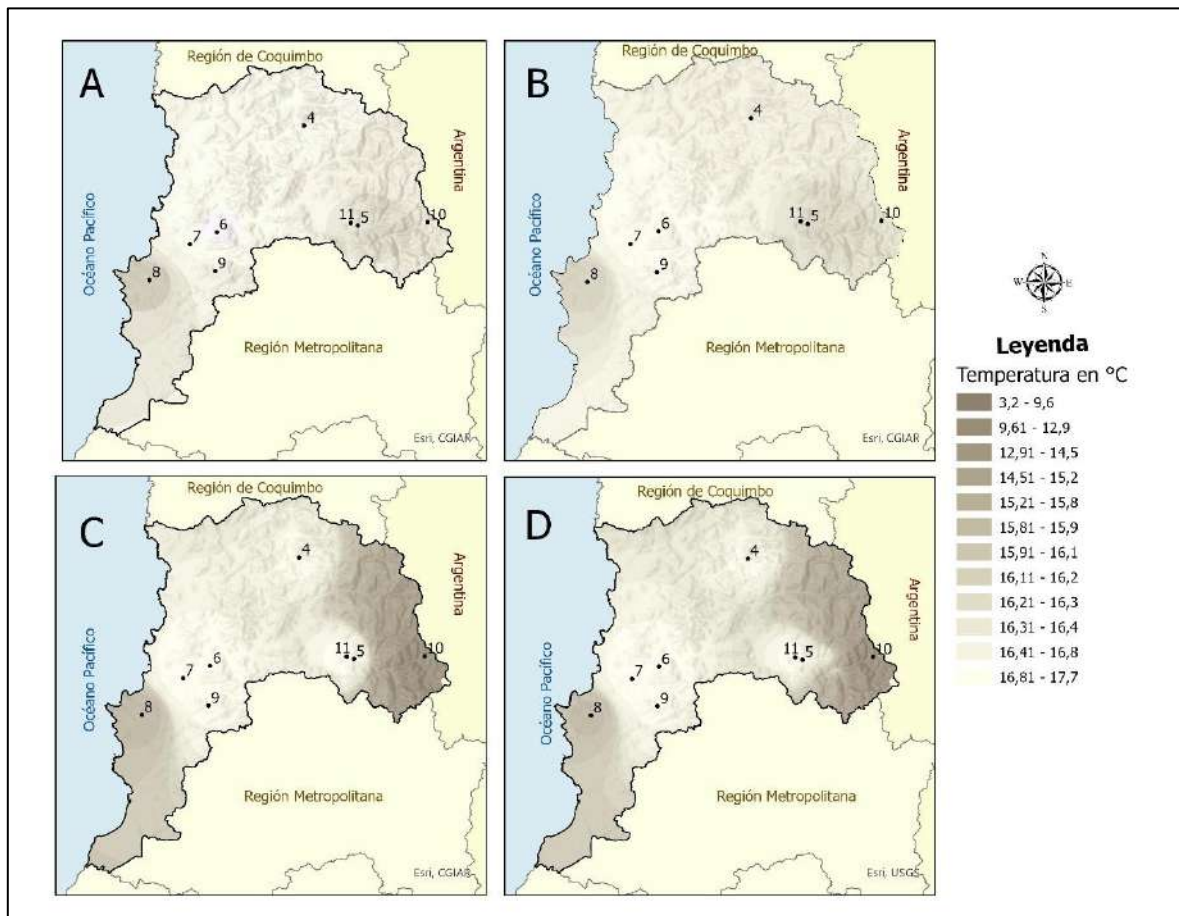


Figura 24: Distribución espacial de la variación de temperatura en la Valparaíso, donde A corresponde al promedio de las temperaturas máximas de invierno entre 1985 – 1989; B corresponde al promedio de las temperaturas máximas de invierno entre 1990 – 1999; C corresponde al promedio de las temperaturas máximas de invierno entre 2000 – 2009 y D corresponde al promedio de las temperaturas máximas de invierno entre 2010 – 2020. Las estaciones corresponden a 1 Río Juncal en Juncal Dga; 2 Canal Colorado en Bocatoma Dga; 3 Alicahue (DGA); 4 Vilcuya DGA; 5 Quillota DGA; 6 Los Aromos DGA; 7 Lago Peñuelas DGA; 8 Lliu-Lliu Embalse DGA; 9 Rio Aconcagua en Chacabuquito DGA y, 10 Portillo DGA. Fuente: Elaboración propia.

La estación Lago Peñuelas, al igual que en la estación climática de otoño, es la única que presenta una disminución en su temperatura en 0,3°C, lo que indicaría que la zona surponiente de la región (provincia de San Antonio) no registra mayores variaciones en el clima por efecto del cambio climático, sino más bien, se ha mantenido estable o incluso ha disminuido sus valores (ver gráfico 17).

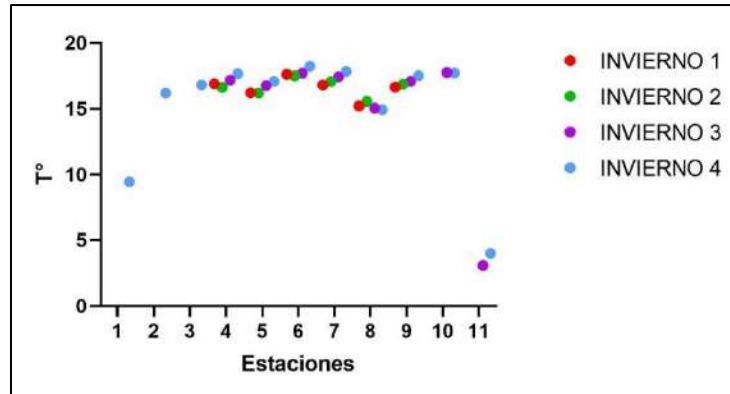


Gráfico 17: Variación temporal de temperatura en la Valparaíso, donde A corresponde al promedio de las temperaturas máximas de invierno entre 1985 – 1989; B corresponde al promedio de las temperaturas máximas de invierno entre 1990 – 1999; C corresponde al promedio de las temperaturas máximas de invierno entre 2000 – 2009 y D corresponde al promedio de las temperaturas máximas de invierno entre 2010 – 2020. Las estaciones corresponden a: 1 Río Juncal en Juncal Dga; 2 Canal Colorado en Bocatoma Dga; 3 Alicahue (DGA); 4 Vilcuya DGA; 5 Quillota DGA; 6 Los Aromos DGA; 7 Lago Peñuelas DGA; 8 Lliu-Lliu Embalse DGA; 9 Rio Aconcagua en Chacabuquito DGA y, 10 Portillo DGA. Fuente: Elaboración propia.

Las temperaturas mínimas en invierno de la Región de Valparaíso, a diferencia de otras regiones y de otras estaciones, sufrieron una disminución de sus valores en el 90% de las estaciones meteorológicas, presentando un leve aumento, sólo en la estación Portillo DGA, donde aumento en 0,6°C. Es por esto que la distribución de la variación espacial de las temperaturas muestra una tendencia a la baja en los valores promedios de temperaturas mínimas, especialmente, en la zona cordillerana. Se debe considerar que la estación de Portillo DGA comienza a registrar datos de temperatura en la década del 2000, por lo que influye en la apreciación de enfriamiento que se observa en la Cordillera de Los Andes (ver figura 25).

No obstante, descontando esta estación, como se mencionó, se evidencia una disminución en los valores, contrario a lo indicado en términos genérico por estudios a nivel nacional, donde se indica que el Cambio Climático está generando aumentos de temperatura en todo el país, dejando en evidencia la necesidad de contar con estudios zonificados con la finalidad de identificar particularidades como las que han aparecido en esta investigación.

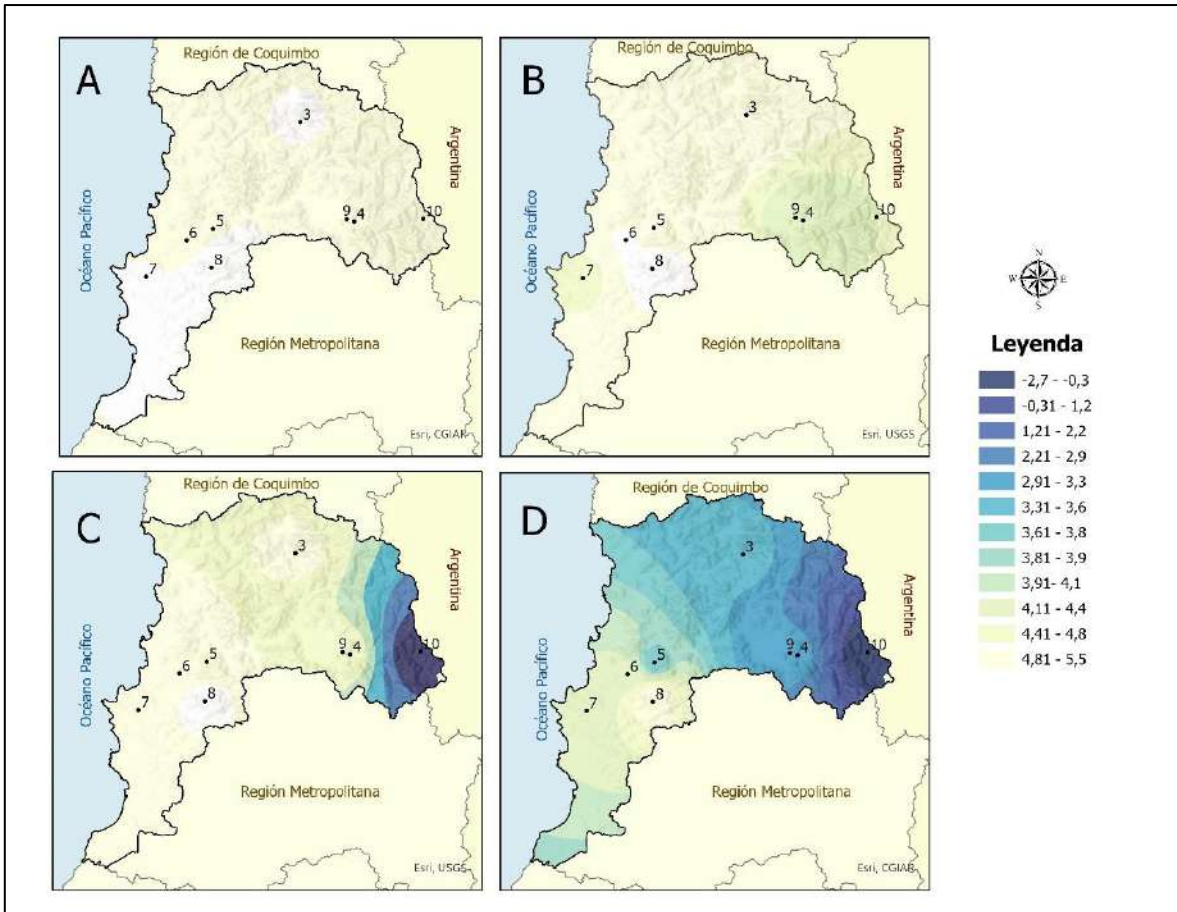


Figura 25: Distribución espacial de la variación de temperatura en la Valparaíso, donde A corresponde al promedio de las temperaturas mínima de invierno entre 1985 – 1989; B corresponde al promedio de las temperaturas mínima de invierno entre 1990 – 1999; C corresponde al promedio de las temperaturas mínima de invierno entre 2000 – 2009 y D corresponde al promedio de las temperaturas mínima de invierno entre 2010 – 2020. Las estaciones corresponden a 1 Río Juncal en Juncal Dga; 2 Canal Colorado en Bocatoma Dga; 3 Alicahue (DGA); 4 Vilcuya DGA; 5 Quillota DGA; 6 Los Aromos DGA; 7 Lago Peñuelas DGA; 8 Lliu-Lliu Embalse DGA; 9 Río Aconcagua en Chacabuquito DGA y, 10 Portillo DGA. Fuente: Elaboración propia.

Lo anterior se reafirma al observar el gráfico 18, donde se puede observar que el punto de color celeste, correspondiente a la temperatura mínima promedio de invierno entre los años 2010 y 2020, se ubica bajo el resto, mostrando que las temperaturas disminuyeron de manera permanente en la mayoría de las estaciones.

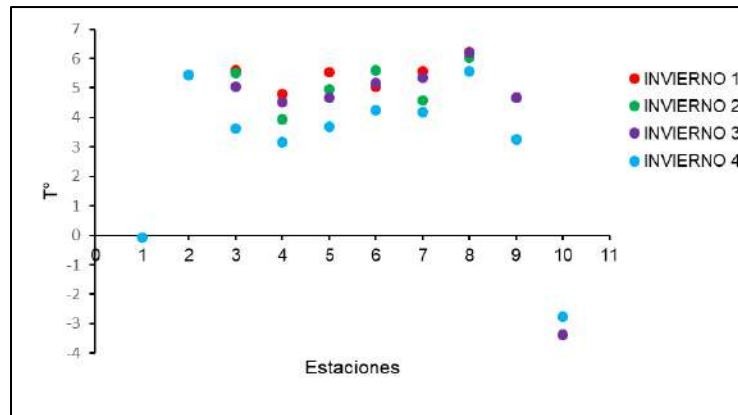


Gráfico 18: Variación temporal de temperatura en la Valparaíso, donde A corresponde al promedio de las temperaturas mínima de invierno entre 1985 – 1989; B corresponde al promedio de las temperaturas mínima de invierno entre 1990 – 1999; C corresponde al promedio de las temperaturas mínima de invierno entre 2000 – 2009 y D corresponde al promedio de las temperaturas mínima de invierno entre 2010 – 2020. Las estaciones corresponden a: 1 Río Juncal en Juncal Dga; 2 Canal Colorado en Bocatoma Dga; 3 Alicahue (DGA); 4 Vilcuya DGA; 5 Quillota DGA; 6 Los Aromos DGA; 7 Lago Peñuelas DGA; 8 Lliu-Lliu Embalse DGA; 9 Rio Aconcagua en Chacabuquito DGA y, 10 Portillo DGA. Fuente: Elaboración propia.

Como se ha mencionado anteriormente, la Región del Maule cuenta con estaciones suficientes para poder determinar cambios reales de temperatura producto del cambio climático. En el caso de la estación climática de invierno, la región presenta una tendencia a la disminución de las temperaturas máximas de invierno, con aumentos en sólo en tres estaciones meteorológicas que presentan registros continuos desde el año 1985 al 2020. En el caso de la estación Lo Aguirre DGA donde se observa un aumento de 1,6°C, se debe considerar que esta estación solo registra datos entre los años 1990 y 2009, por lo que no se cuenta con información del último decenio en invierno, para poder establecer si la temperatura ha seguido aumentando o no.

De todas formas, se puede apreciar un aumento de la temperatura en la zona centro norte de la región, por los datos obtenidos desde las estaciones Colorado DGA, Río Claro En Rauquén DGA y Lo Aguirre DGA (ver figura 26).

En el resto de la región se observa una tendencia a la disminución de las temperaturas en el decenio comprendido entre los años 1990 y 2009, volviendo a aumentar los valores en el último decenio comprendido entre los años 2010 y 2020 (ver gráfico 19).

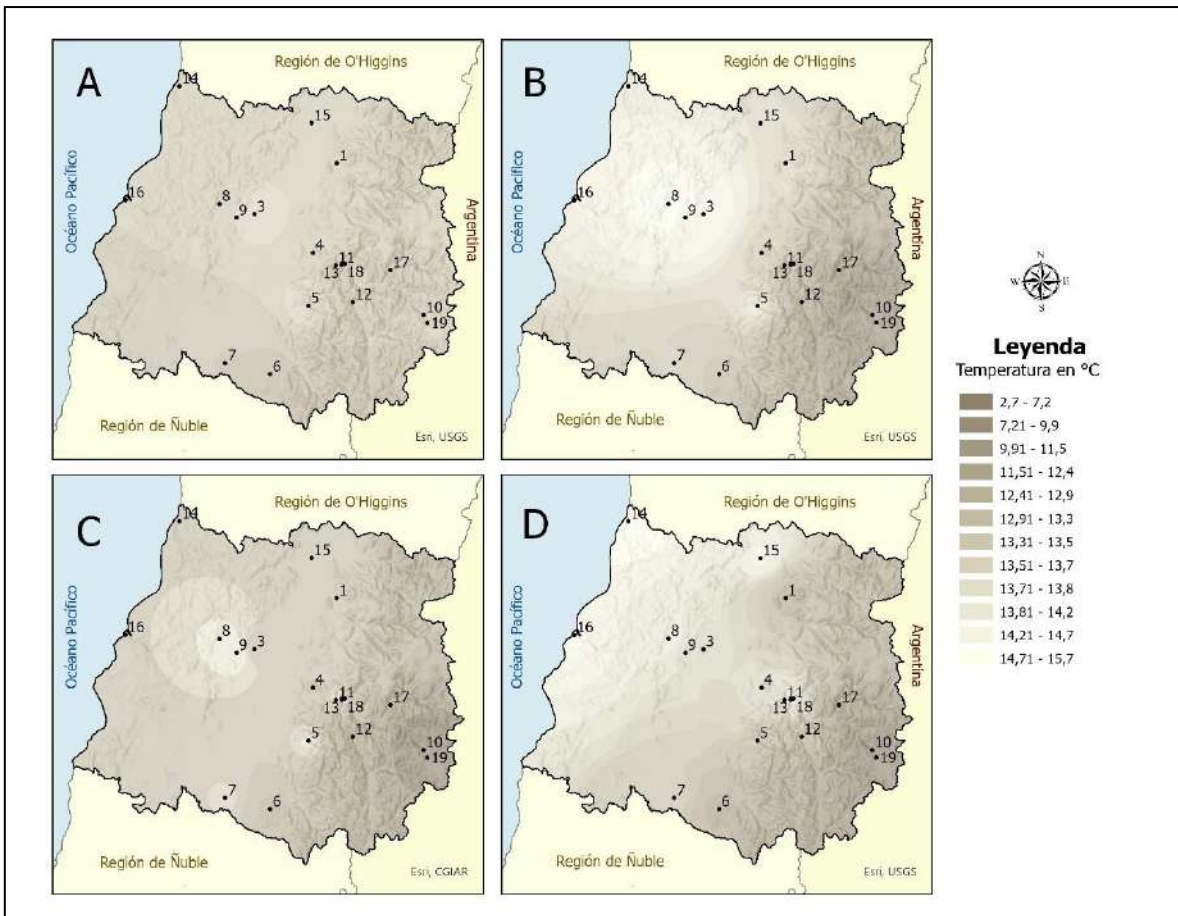


Figura 26: Distribución espacial de la variación de temperatura en la Región del Maule, donde A corresponde al promedio de las temperaturas máximas de invierno entre 1985 – 1989; B corresponde al promedio de las temperaturas máximas de invierno entre 1990 – 1999; C corresponde al promedio de las temperaturas máximas de invierno entre 2000 – 2009 y D corresponde al promedio de las temperaturas máximas de invierno entre 2010 – 2020. Las estaciones corresponden a: 1 Potrero Grande DGA; 2 Talca UC DGA; 3 Colorado DGA; 4 Ancoa Embalse DGA; 5 Digua Embalse DGA; 6 Parral DGA; 7 Pencahue DGA; 8 Rio Claro en Rauquén DGA; 9 Lo Aguirre DGA; 10 Rio Maule en Armerillo DGA; 11 Rio Melado en El Salto DGA; 12 Armerillo DGA; 13 Laguna de Torca DGA; 14 Curicó DGA; 15 Constitución DGA; 16 Rio Cipreces en Desagüe Laguna La Invernada DGA; 17 Rio Claro En San Carlos DGA y 18 Los Cóndores DGA. Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a lo observado en las estaciones anteriores, la Región del Maule presenta un comportamiento térmico anómalo en el sentido de que, al contrario de lo que establecen las predicciones realizadas por diferentes organismos internacionales, donde la tónica es el aumento de las temperaturas, esta región presenta una tendencia al alza en algunos casos, pero muy leve o a la disminución como se aprecia en esta estación climática de invierno. Esto podría estar dado por la existencia de un microclima, el que requiere mayor análisis y toma de datos para poder determinar sus causas.

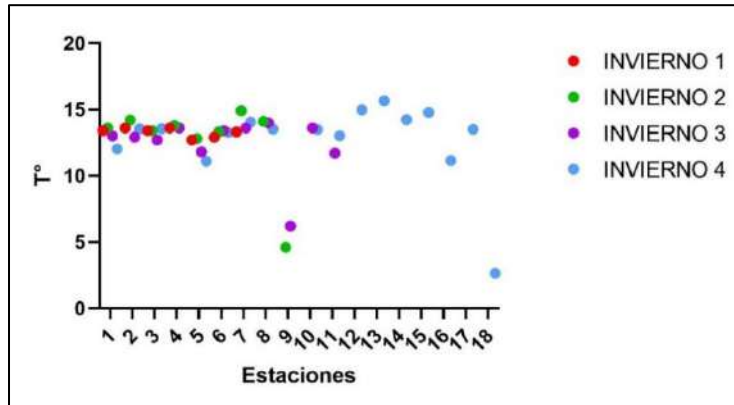


Gráfico 19: Variación temporal de la temperatura máxima en la Región del Maule, donde Invierno 1 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de invierno entre 1985 – 1989; invierno 2 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de invierno entre 1990 – 1999; invierno 3 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de invierno entre 2000 – 2009 y Invierno 4 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de otoño entre 2010 – 2020. En las estaciones, 1 Potrero Grande DGA; 2 Talca UC DGA; 3 Colorado DGA; 4 Ancoa Embalse DGA; 5 Digua Embalse DGA; 6 Parral DGA; 7 Pencahue DGA; 8 Río Claro en Rauquén DGA; 9 Lo Aguirre DGA; 10 Río Maule en Armerillo DGA, 11 Río Melado en El Salto DGA; 12 Armerillo DGA; 13 Laguna de Torca DGA; 14 Curicó DGA; 15 Constitución DGA; 16 Río Cipreces en Desagüe Laguna La Invernada DGA; 17 Río Claro En San Carlos DGA y 18 Los Cóndores DGA. Fuente: Elaboración propia.

El comportamiento de las temperaturas mínimas en la Región del Maule en la época de invierno, se aprecia una variación latitudinal en su comportamiento, evidenciando una baja de los valores en la zona centro norte y centro sur de la región, donde los registros alcanzados por la estación de Curicó, por el norte, marcaron una disminución de 2,5°C, superior a la disminución alcanzada en la parte sur con las estaciones de Digua Embalse DGA y Parral DGA con 1,03°C y 0,86°C respectivamente. En la zona central del valle en cambio, se registró un aumento los valores en la estación Ancoa Embalse DGA, donde se alcanzó un alza de 3,2°C. (ver figura 27).

La zona costera de la región, al estar con falta de estaciones con registros de más de 10 años, se muestra con un aparente aumento de la temperatura, pero se debe a la falta de datos de décadas anteriores, lo que no permite realizar un comparativo.

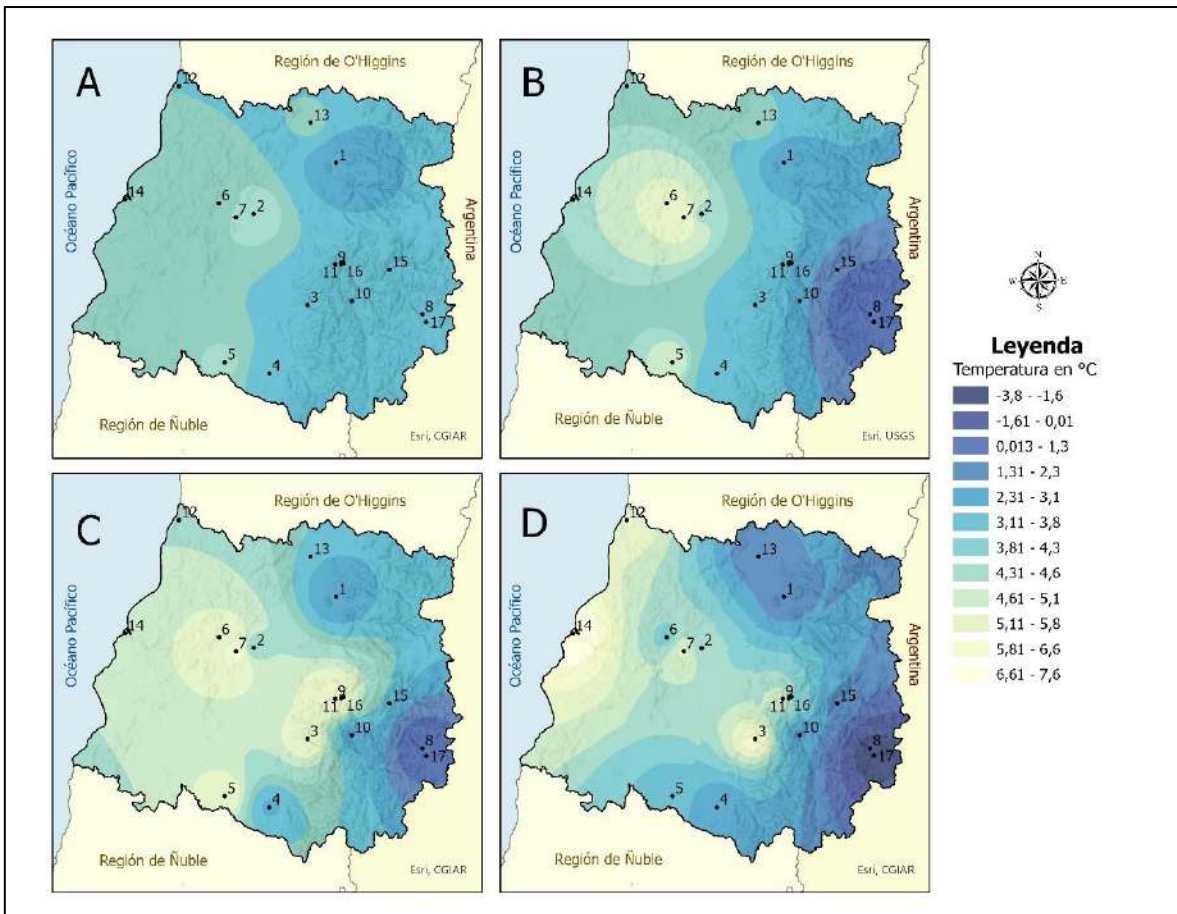


Figura 27: Distribución espacial de la variación de temperatura en la Región del Maule, donde A corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de invierno entre 1985 – 1989; B corresponde al promedio de las temperaturas mínima de invierno entre 1990 – 1999; C corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de invierno entre 2000 – 2009 y D corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de invierno entre 2010 – 2020. Las estaciones corresponden a: 1 Potrero Grande DGA; 2 Talca UC DGA; 3 Colorado DGA; 4 Ancoa Embalse DGA; 5 Digua Embalse DGA; 6 Parral DGA; 7 Pencahue DGA; 8 Rio Claro en Rauquén DGA; 9 Lo Aguirre DGA; 10 Rio Maule en Armerillo DGA, 11 Rio Melado en El Salto DGA; 12 Armerillo DGA; 13 Laguna de Torca DGA; 14 Curicó DGA; 15 Constitución DGA; 16 Rio Cipreces en Desagüe Laguna La Invernada DGA; 17 Rio Claro En San Carlos DGA y 18 Los Cóndores DGA. Fuente: Elaboración propia.

Respecto a la variación temporal de las temperaturas mínimas de invierno en la Región del Maule se puede observar que, de las once estaciones que cuentan con registros en, al menos, dos décadas, siete de ellas presenta disminuciones en las temperaturas mínimas; tres se mantuvieron estables con leves aumentos de 0,1°C y sólo una estación con un aumento de superior a los 3°C como se mencionó con anterioridad (ver gráfico 20).

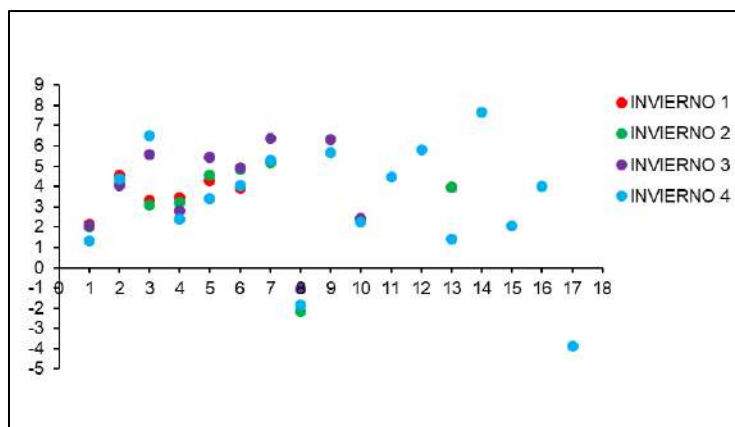


Gráfico 20: Variación temporal de la temperatura mínimas en la Región del Maule, donde Invierno 1 corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de invierno entre 1985 – 1989; invierno 2 corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de invierno entre 1990 – 1999; invierno 3 corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de invierno entre 2000 – 2009 y Invierno 4 corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de otoño entre 2010 – 2020. En las estaciones, 1 Potrero Grande DGA; 2 Talca UC DGA; 3 Colorado DGA; 4 Ancoa Embalse DGA; 5 Digua Embalse DGA; 6 Parral DGA; 7 Pencahue DGA; 8 Rio Claro en Rauquén DGA; 9 Lo Aguirre DGA; 10 Rio Maule en Armerillo DGA, 11 Rio Melado en El Salto DGA; 12 Armerillo DGA; 13 Laguna de Torca DGA; 14 Curicó DGA; 15 Constitución DGA; 16 Rio Cipreces en Desagüe Laguna La Invernada DGA; 17 Rio Claro En San Carlos DGA y 18 Los Cóndores DGA. Fuente: Elaboración propia.

En el análisis de los datos, no se logra identificar un período de tiempo donde los datos muestren alguna singularidad, como grandes aumentos o bajas de temperaturas.

Similar a lo que ocurre en la Región del Maule, en las regiones de Ñuble y Biobío se evidencia una tendencia clara a la disminución de las temperaturas máximas de invierno en todos los años, en todas las estaciones meteorológicas. Geoespacialmente, al estar las estaciones de ambas regiones ubicadas en el sector oriente, se hace más evidente la disminución de temperatura en la parte de la Cordillera de Los Andes (ver figura 28 y gráfico 21).

Contrario a lo descrito por estudios genéricos sobre cambio climático, como se ha mencionado con anterioridad, se destaca nuevamente la importancia de contar con estudio localizados que muestren en comportamiento de los factores climatológicos, ya que, como se ha demostrado en el presente informe, el comportamiento de las temperaturas se presenta como errático y no responde necesariamente a las proyecciones realizadas por investigaciones de menor escala.

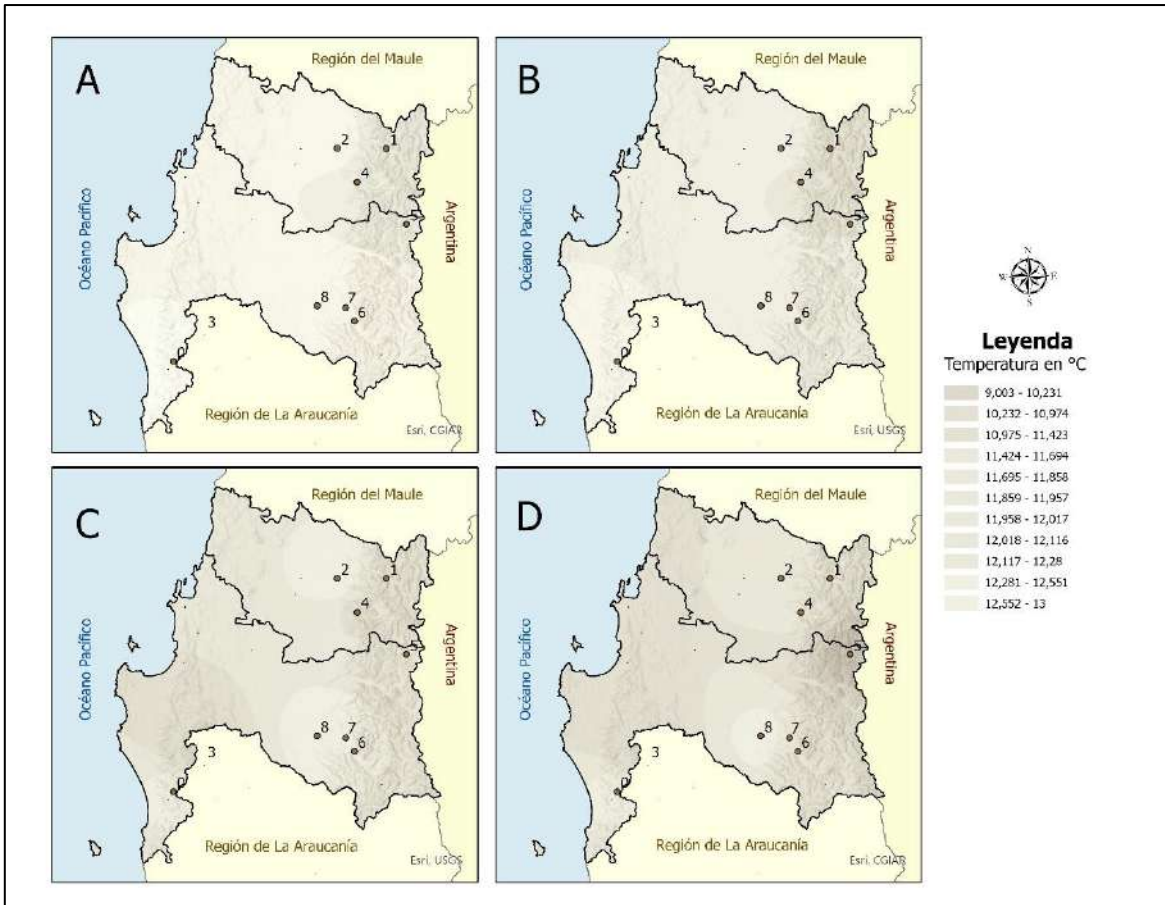


Figura 28: Distribución espacial de la variación de temperatura en las Regiones del Ñuble y Biobío, donde A corresponde al promedio de las temperaturas máximas de invierno entre 1985 – 1989; B corresponde al promedio de las temperaturas máximas de invierno entre 1990 – 1999; C corresponde al promedio de las temperaturas máximas de invierno entre 2000 – 2009 y D corresponde al promedio de las temperaturas máximas de invierno entre 2010 – 2020. Las estaciones corresponden a: 1 Caracol DGA; 2 Coihueco Embalse DGA; 3 Diguillin DGA; 4 Parque Nahuelbuta DGA; 5 Alto Mallines DGA; 6 Río Biobío En La Culebra DGA; 7 Río Huequecura Aguas Arriba Embalse Angostura DGA; 8 Quilaco DGA y 9 Contulmo DGA. Fuente: Elaboración propia.

Siguiendo con lo planteado anteriormente, la distribución temporal de las temperaturas máximas en las regiones de Ñuble y Biobío, en el gráfico 21 se puede apreciar una tendencia a la disminución de las temperaturas máximas, particularmente, en la década entre los años 2010 y 2020 en todas las estaciones con registros de, al menos, 30 años.

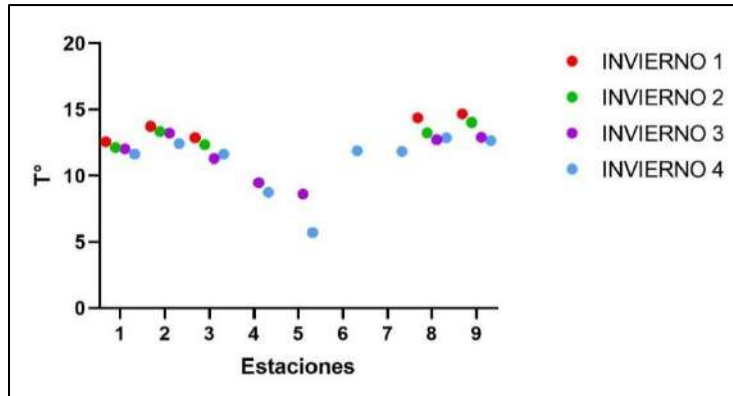


Gráfico 21: Variación temporal de temperatura en las Regiones del Ñuble y Biobío, donde Invierno 1 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de invierno entre 1985 – 1989; Invierno 2 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de invierno entre 1990 – 1999; Invierno 3 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de invierno entre 2000 – 2009 y Invierno 4 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de invierno entre 2010 – 2020. Las estaciones corresponden a: 1 Caracol DGA; 2 Coihueco Embalse DGA; 3 Diguillin DGA; 4 Parque Nahuelbuta DGA; 5 Alto Mallines DGA; 6 Río Biobío En La Culebra DGA; 7 Río Huequecura Aguas Arriba Embalse Angostura DGA; 8 Quilaco DGA y 9 Contulmo DGA. Fuente: Elaboración propia.

En relación a las temperaturas mínimas de la estación de invierno de la Región de Ñuble presenta una disminución de las temperaturas en todo su territorio, con valores que alcanzan los $-2,2^{\circ}\text{C}$ a $0,1^{\circ}\text{C}$.

En la región del Biobío por su parte, no se logra identificar un patrón claro en el comportamiento de las temperaturas, dado que, en algunas estaciones, el promedio de las temperaturas mínimas bajo, mientras que, en otras, aumentó de manera importante.

Así, por ejemplo, en la estación Alto Mallines, ubicada en la Cordillera de Los Andes la temperatura bajo $0,97^{\circ}\text{C}$, en la estación Contulmo, ubicada en la parte suroeste de la región, se registró un aumento de $1,1^{\circ}\text{C}$. Este comportamiento de las estaciones y la falta de una red más robusta de estaciones, distribuye las temperaturas de manera irregular en el territorio durante los períodos de tiempo analizados en esta investigación (ver figura 29).

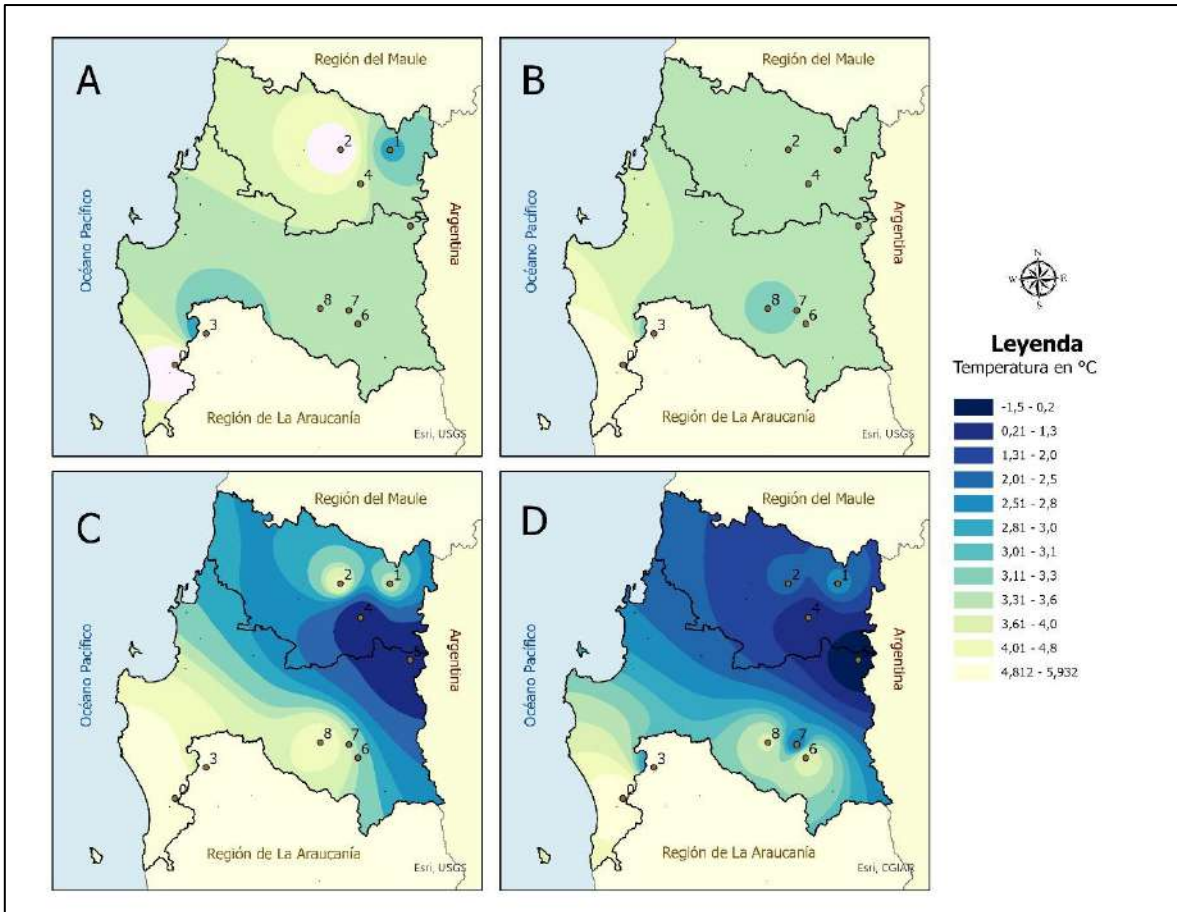


Figura 29: Distribución espacial de la variación de temperatura en las Regiones del Ñuble y Biobío, donde A corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de invierno entre 1985 – 1989; B corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de invierno entre 1990 – 1999; C corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de invierno entre 2000 – 2009 y D corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de invierno entre 2010 – 2020. Las estaciones corresponden a: 1 Caracol DGA; 2 Coihueco Embalse DGA; 3 Diguillín DGA; 4 Parque Nahuelbuta DGA; 5 Alto Mallines DGA; 6 Río Biobío En La Culebra DGA; 7 Río Huequecura Aguas Arriba Embalse Angostura DGA; 8 Quilaco DGA y 9 Contulmo DGA. Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en el gráfico, el comportamiento temporal de las temperaturas mínimas promedio, no obedecen a un patrón, sino que, más bien, presenta un comportamiento errático, con décadas en las cuales las temperaturas mínimas aumentan, y otras donde los valores bajan, alcanzando incluso, valores bajo 0°C.

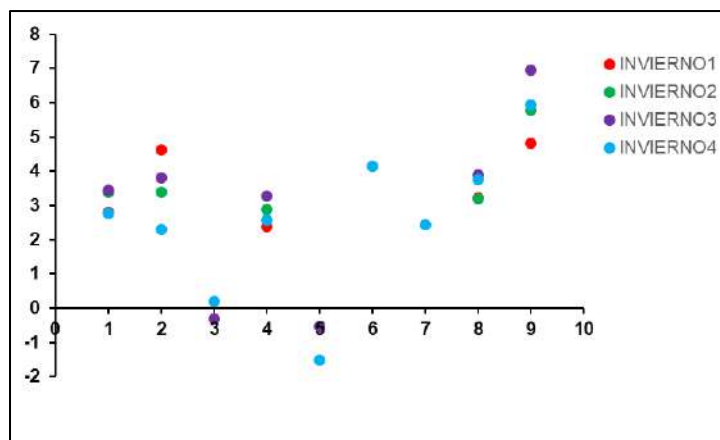


Gráfico 22: Variación temporal de temperatura en las Regiones del Ñuble y Biobío, donde Invierno 1 corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de invierno entre 1985 – 1989; Invierno 2 corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de invierno entre 1990 – 1999; Invierno 3 corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de invierno entre 2000 – 2009 y Invierno 4 corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de invierno entre 2010 – 2020. Las estaciones corresponden a: 1 Caracol DGA; 2 Coihueco Embalse DGA; 3 Diguillin DGA; 4 Parque Nahuelbuta DGA; 5 Alto Mallines DGA; 6 Río Biobío En La Culebra DGA; 7 Río Huequecura Aguas Arriba Embalse Angostura DGA; 8 Quilaco DGA y 9 Contulmo DGA. Fuente: Elaboración propia.

3.3.1.4 Estación de Primavera

Las temperaturas en primavera, en la Región de Valparaíso, presentan el mismo comportamiento que en el resto de las estaciones climáticas. De las 8 estaciones que presentan datos continuos, todas presentan una tendencia al alza de las temperaturas, donde la estación Los Aromos DGA, nuevamente, es la que registra la mayor alza, con 1,5°C, seguida por la estación Alicahue DGA con un aumento de 1,4°C en las temperaturas máximas de primavera. Si bien, la estación Lago Peñuelas sigue siendo la púnica estación que presenta una disminución en sus temperaturas máximas de primavera, al igual que en el resto de las estaciones climáticas, la tendencia de alza de los valores se distribuye de manera homogénea en toda la región, siendo la zona del valle central la que registra un aumento importante, particularmente, en el segundo decenio analizado (1990 – 2000), donde se puede apreciar que las estaciones Alicahue DGA, Vilcuya DGA, Quillota DGA y Los Aromos DGA aumentan sus temperaturas, provocando que la distribución geoespacial de este aumento se traspase a toda la zona de valle interior (ver figura 30).

Al igual que ocurre en otras regiones, donde se incorporan datos de estaciones en la zona de la Cordillera de Los Andes, da la impresión de que existe un enfriamiento o baja de temperatura, son embargo, esta disminución se debe a la existencia en el registro de datos que no estaba en los decenios anteriores.

Ahora, si se compran la distribución de las temperaturas en la figura 14, en los recuadros C y D, se puede observar que existe una disminución en el decenio representado por la letra D.

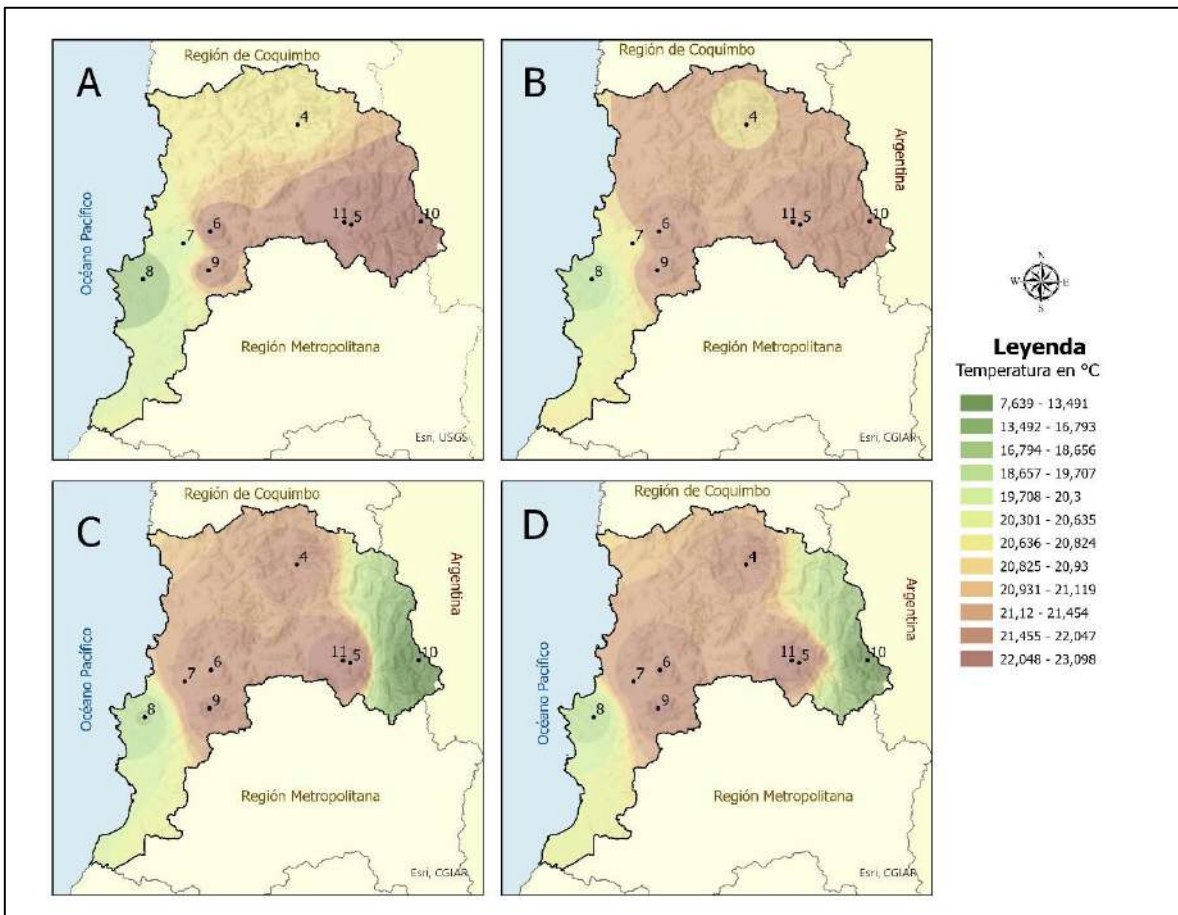


Figura 30: Distribución espacial de la variación de temperatura en la Valparaíso, donde A corresponde al promedio de las temperaturas máximas de primavera entre 1985 – 1989; B corresponde al promedio de las temperaturas máximas de primavera entre 1990 – 1999; C corresponde al promedio de las temperaturas máximas de primavera entre 2000 – 2009 y D corresponde al promedio de las temperaturas máximas de primavera entre 2010 – 2020. Las estaciones corresponden a: 1 Río Juncal en Juncal Dga; 2 Canal Colorado en Bocatoma Dga; 3 Alicahue (DGA); 4 Vilcuya DGA; 5 Quillota DGA; 6 Los Aromos DGA; 7 Lago Peñuelas DGA; 8 Lliu-Lliu Embalse DGA; 9 Río Aconcagua en Chacabuquito DGA y, 10 Portillo DGA. Fuente: Elaboración propia.

Esto ocurre dado que se registró una baja de temperaturas en ese decenio, en las estaciones Vilcuya DGA, Los Aromos DGA y Lago Peñuelas DGA, siendo esta última la que presenta la disminución más importante con 0,57°C (ver gráfico 23).

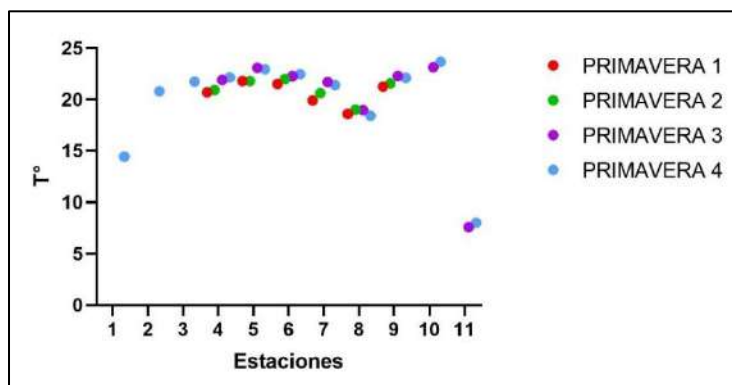


Gráfico 23: Variación temporal de temperatura en la Región Valparaíso, donde Primavera 1 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de primavera entre 1985 – 1989; Primavera 2 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de primavera entre 1990 – 1999; Primavera 3 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de primavera entre 2000 – 2009 y Primavera 4 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de primavera entre 2010 – 2020. Las estaciones corresponden a 1 Río Juncal en Juncal Dga; 2 Canal Colorado en Bocatoma Dga; 3 Alicahue (DGA); 4 Vilcuya DGA; 5 Quillota DGA; 6 Los Aromos DGA; 7 Lago Peñuelas DGA; 8 Lliu-Lliu Embalse DGA; 9 Río Aconcagua en Chacabucquito DGA y, 10 Portillo DGA. Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a las temperaturas mínimas en primavera, la Región de Valparaíso experimenta un enfriamiento paulatino y constante en el tiempo, a lo largo de las cuatro décadas analizadas. Así, en la década del año 1985, el promedio de temperaturas mínimas se ubicaba entre los 8,1°C y 9,2°C, registrando mayores valores la zona de oriente de la Cordillera de la Costa, en la zona central de región. Ya, en la década siguiente, entre los años 1990 al 2000, se registra una disminución de las temperaturas de, al menos, 1°C, destacando la estación de Vilcuya con una disminución de 1,4°C y la estación Lliu-Lliu Embalse con una disminución de 1,16°C. En los años siguientes las temperaturas siguen disminuyendo, llegando finalmente a registrar valores de disminución de más de 2,0°C, donde destacan las estaciones de Vilcuya y Quillota con 2,3°C y 2,1°C respectivamente, ubicadas la primera en la zona Cordillera de Los Andes y, la segunda, en la Cordillera de la Costa, lo que da cuenta de un enfriamiento general en toda la región (ver figura 31).

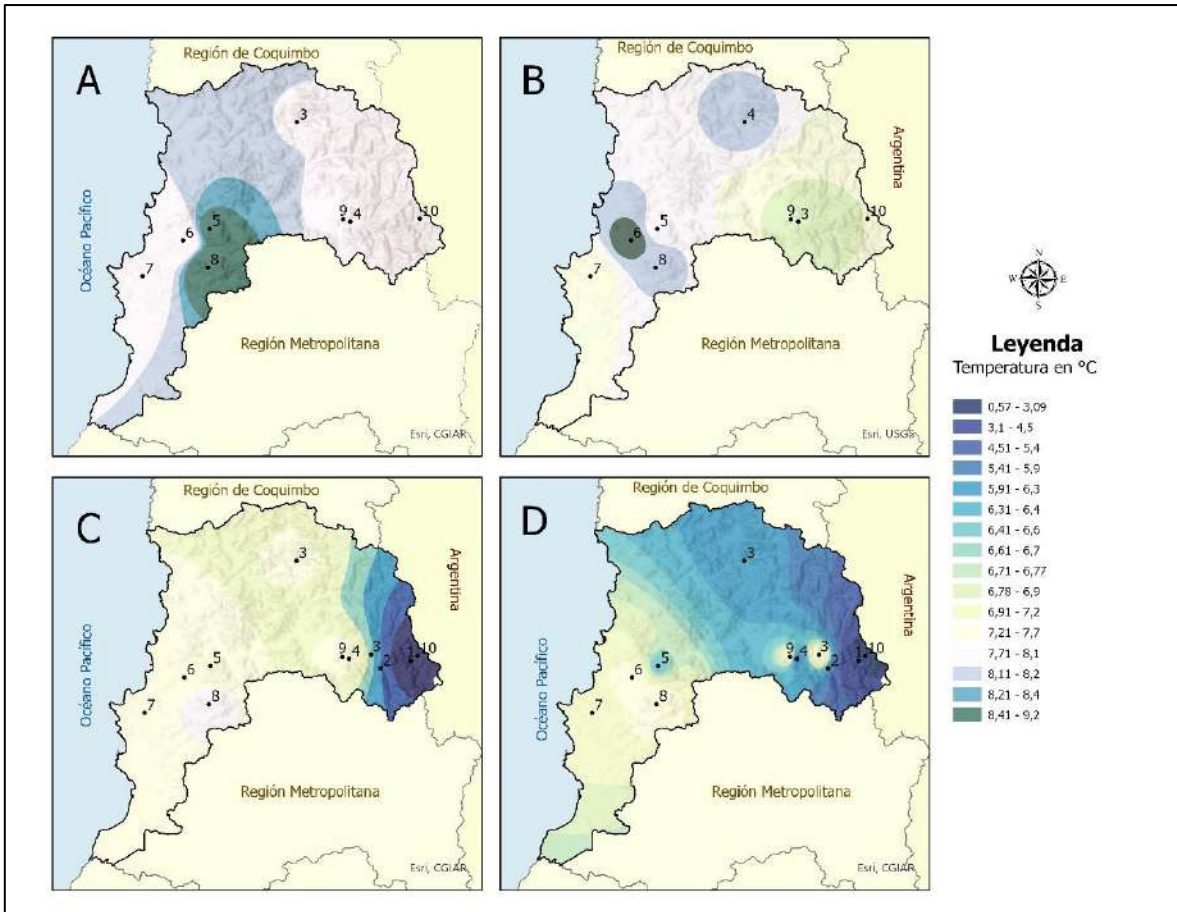


Figura 31: Distribución espacial de la variación de temperatura en la Valparaíso, donde A corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de primavera entre 1985 – 1989; B corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de primavera entre 1990 – 1999; C corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de primavera entre 2000 – 2009 y D corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de primavera entre 2010 – 2020. Las estaciones corresponden a: 1 Río Juncal en Juncal Dga; 2 Canal Colorado en Bocatomá Dga; 3 Alicahue (DGA); 4 Vilcuya DGA; 5 Quillota DGA; 6 Los Aromos DGA; 7 Lago Peñuelas DGA; 8 Lliu-Lliu Embalse DGA; 9 Río Aconcagua en Chacabuquito DGA y, 10 Portillo DGA. Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a lo observado en el gráfico 24, se puede distinguir lo descrito anteriormente. Los puntos de color celeste (que representan los valores promedios de temperaturas mínimas registradas entre 2010 y 2020) se encuentran por debajo de los otros puntos en todas las estaciones meteorológicas, salvo en la estación Portillo que es la única que registró un aumento de 0,7°C y la estación Los Aromos que registro un aumento de 0,2°C.

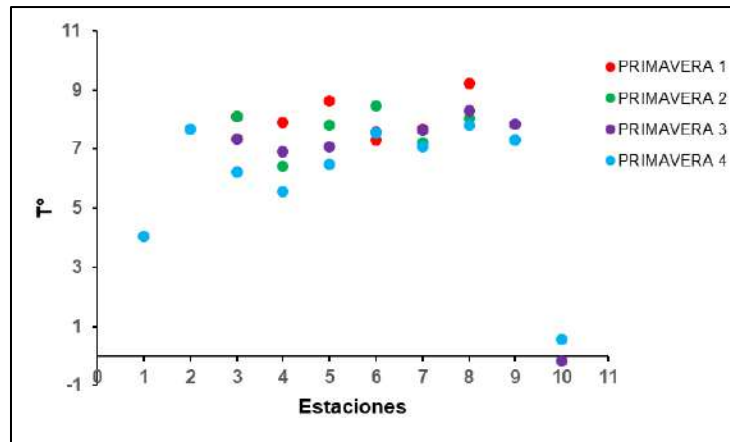


Gráfico 24: Variación temporal de temperatura en la Región Valparaíso, donde Primavera 1 corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de primavera entre 1985 – 1989; Primavera 2 corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de primavera entre 1990 – 1999; Primavera 3 corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de primavera entre 2000 – 2009 y Primavera 4 corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de primavera entre 2010 – 2020. Las estaciones corresponden a 1 Río Juncal en Juncal Dga; 2 Canal Colorado en Bocatoma Dga; 3 Alicahue (DGA); 4 Vilcuya DGA; 5 Quillota DGA; 6 Los Aromos DGA; 7 Lago Peñuelas DGA; 8 Lliu-Lliu Embalse DGA; 9 Río Aconcagua en Chacabuquito DGA y, 10 Portillo DGA. Fuente: Elaboración propia.

La Región del Maule, por su parte, presenta un comportamiento similar al resto de las estaciones climáticas, donde no existen grandes variaciones en los valores de temperaturas máximas, y la distribución geoespacial de las mismas se mantiene en el tiempo. Así, las estaciones Colorado DGA, Ancoa Embalse DGA y Digua Embalse DGA presentaron disminuciones en sus temperaturas, con 0,3°C, 0,8°C y 0,9°C, siendo las más importantes. Por lo anterior, se observa un cambio en la distribución geoespacial de las temperaturas en la zona central de la región, identificándose una zona de disminución o enfriamiento de las temperaturas ubicada en la parte centro sur de la región. Situación similar se da en la zona costera, donde en el último decenio se incorporan registros de la estación Río Cipreces en Desagüe Laguna La Invernada DGA, lo que hace variar los datos trabajados en los decenios anteriores (ver figura 32).

En el gráfico 25 se aprecia como las temperaturas máximas de primavera tienden a mantenerse o variar con leves aumentos o disminuciones, destacando la gran cantidad de estaciones meteorológicas que se suman en el año 2010.

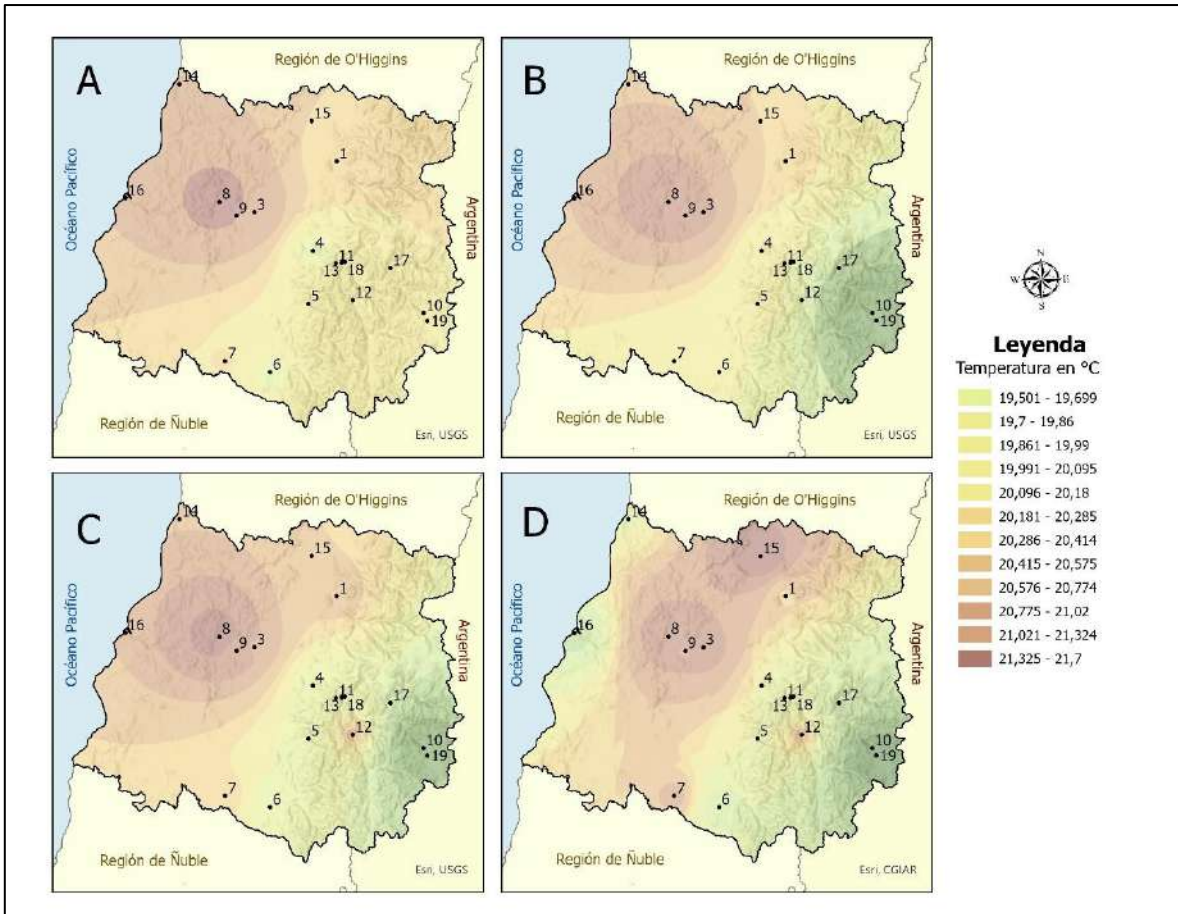


Figura 32: Distribución espacial de la variación de temperatura en la Región del Maule, donde A corresponde al promedio de las temperaturas máximas de primavera entre 1985 – 1989; B corresponde al promedio de las temperaturas máximas de primavera entre 1990 – 1999; C corresponde al promedio de las temperaturas máximas de primavera entre 2000 – 2009 y D corresponde al promedio de las temperaturas máximas de primavera entre 2010 – 2020. Las estaciones corresponden a: 1 Potrero Grande DGA; 2 Talca UC DGA; 3 Colorado DGA; 4 Ancoa Embalse DGA; 5 Digua Embalse DGA; 6 Parral DGA; 7 Pencahue DGA; 8 Rio Claro en Rauquén DGA; 9 Lo Aguirre DGA; 10 Rio Maule en Armerillo DGA, 11 Rio Melado en El Salto DGA; 12 Armerillo DGA; 13 Laguna de Torca DGA; 14 Curicó DGA; 15 Constitución DGA; 16 Rio Cipreces en Desagüe Laguna La Invernada DGA; 17 Rio Claro En San Carlos DGA y 18 Los Cóndores DGA. Fuente: Elaboración propia.

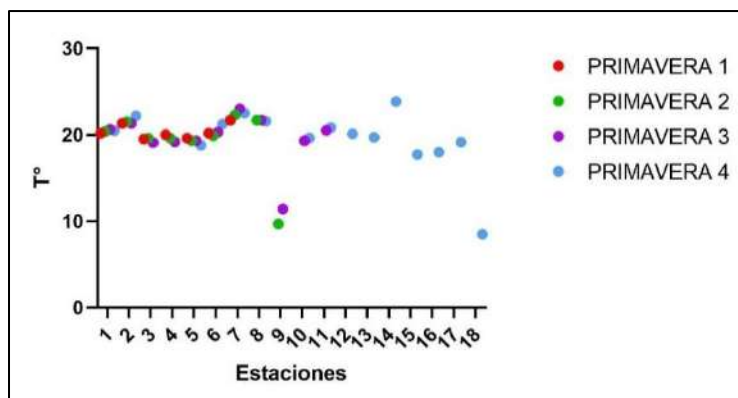


Gráfico 25: Variación temporal de la temperatura máxima en la Región del Maule, donde Primavera 1 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de primavera entre 1985 – 1989; Primavera 2 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de primavera entre 1990 – 1999; Primavera 3 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de primavera entre 2000 – 2009 y Primavera 4 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de primavera entre 2010 – 2020. En las estaciones, 1 Potrero Grande DGA; 2 Talca UC DGA; 3 Colorado DGA; 4 Ancoa Embalse DGA; 5 Digua Embalse DGA; 6 Parral DGA; 7 Pencahue DGA; 8 Río Claro en Rauquén DGA; 9 Lo Aguirre DGA; 10 Río Maule en Armerillo DGA, 11 Río Melado en El Salto DGA; 12 Armerillo DGA; 13 Laguna de Torca DGA; 14 Curicó DGA; 15 Constitución DGA; 16 Río Cipreces en Desagüe Laguna La Invernada DGA; 17 Río Claro En San Carlos DGA y 18 Los Cóndores DGA. Fuente: Elaboración propia.

En relación a las temperaturas mínimas en primavera en la Región del Maule, se observa un aumento en los valores y un cambio en la distribución geoespacial de las mismas, ubicándose los mayores valores en el valle central de la región, manteniéndose la Cordillera de Los Andes con menores valores, particularmente, en la parte sureste.

La mayor disminución de las temperaturas mínimas en primavera se presenta en las estaciones de Parral DGA y Digua Embalse DGA con 2,55°C y 1,27°C respectivamente, ambas ubicadas en la parte centro – sur de la región. Por el contrario, la estación de Ancoa Embalse DGA, ubicada en la parte occidental de la Cordillera de Los Andes registra un aumento considerable de 1,64°C.

Lo anterior, a diferencia de las estaciones climatológicas anteriores no se logra identificar un comportamiento uniforme en la región, sino más bien, se aprecian aumentos y disminuciones de las temperaturas mínimas que se distribuyen en toda la región (ver figura 33).

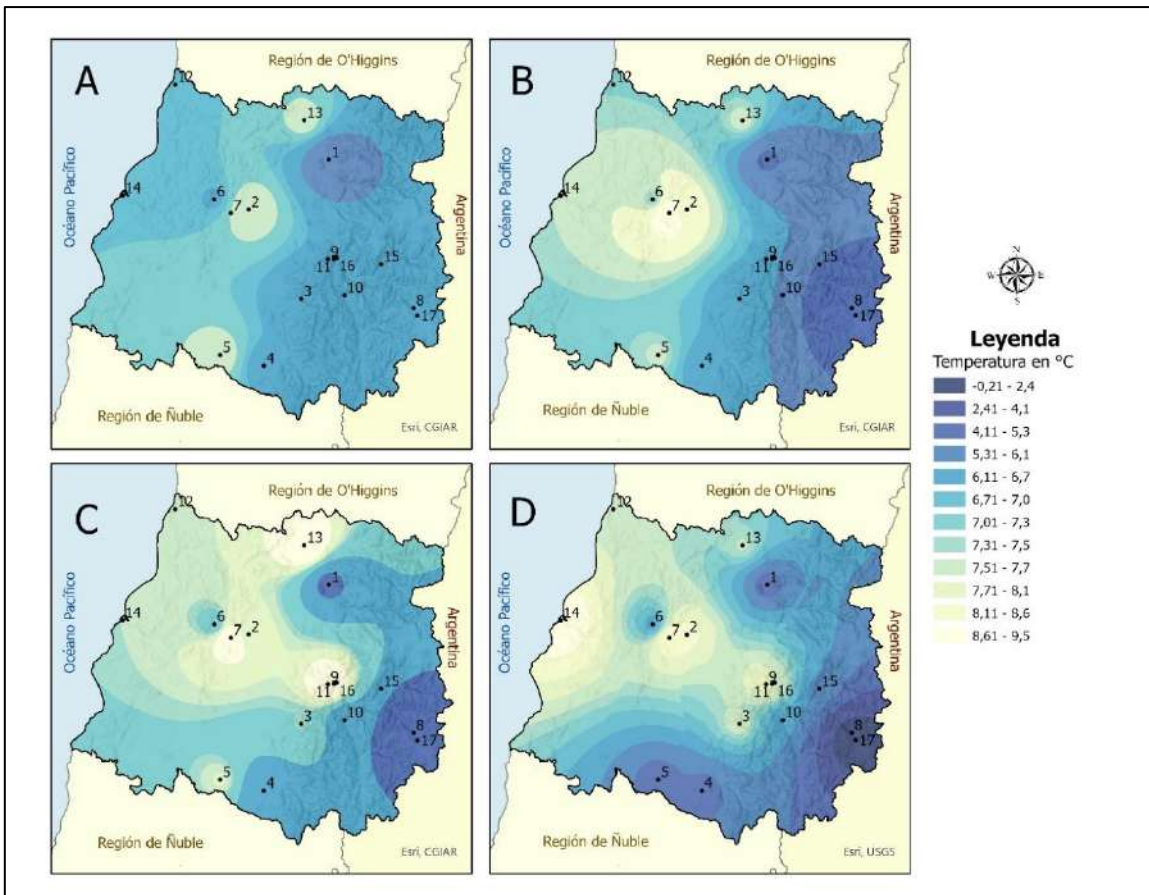


Figura 33: Distribución espacial de la variación de temperatura en la Región del Maule, donde A corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de primavera entre 1985 – 1989; B corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de primavera entre 1990 – 1999; C corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de primavera entre 2000 – 2009 y D corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de primavera entre 2010 – 2020. Las estaciones corresponden a: 1 Potrero Grande DGA; 2 Talca UC DGA; 3 Colorado DGA; 4 Ancoa Embalse DGA; 5 Digua Embalse DGA; 6 Parral DGA; 7 Pencahue DGA; 8 Río Claro en Rauquén DGA; 9 Lo Aguirre DGA; 10 Río Maule en Armerillo DGA, 11 Río Melado en El Salto DGA; 12 Armerillo DGA; 13 Laguna de Torca DGA; 14 Curicó DGA; 15 Constitución DGA; 16 Río Cipreces en Desagüe Laguna La Invernada DGA; 17 Río Claro En San Carlos DGA y 18 Los Cóndores DGA. Fuente: Elaboración propia.

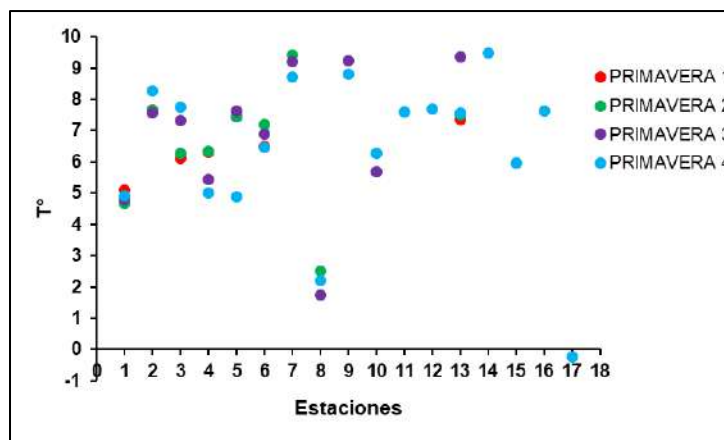


Gráfico 26: Distribución temporal de la temperatura en la Región del Maule, donde Primavera 1 corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de primavera entre 1985 – 1989; Primavera 2 corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de primavera entre 1990 – 1999; Primavera 3 corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de primavera entre 2000 – 2009 y Primavera 4 corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de primavera entre 2010 – 2020. En las estaciones, 1 Potrero Grande DGA; 2 Talca UC DGA; 3 Colorado DGA; 4 Ancoa Embalse DGA; 5 Digua Embalse DGA; 6 Parral DGA; 7 Pencahue DGA; 8 Río Claro en Rauquén DGA; 9 Lo Aguirre DGA; 10 Río Maule en Armerillo DGA, 11 Río Melado en El Salto DGA; 12 Armerillo DGA; 13 Laguna de Torca DGA; 14 Curicó DGA; 15 Constitución DGA; 16 Río Cipreces en Desagüe Laguna La Invernada DGA; 17 Río Claro En San Carlos DGA y 18 Los Cóndores DGA. Fuente: Elaboración propia.

Las regiones de Ñuble y Biobío, al igual que la región del Maule, se mantiene estable en sus temperaturas máximas en primavera, experimentando pequeñas alzas que van desde 0,1°C a 0,4°C.

En la Región del Ñuble la estación Coihueco Embalse DGA fue la que registro un mayor aumento de temperatura con 0,9°C. En la Región del Biobío la estación Contulmo DGA, ubicada en la zona sur de la región, fue la que registro la mayor disminución en los valores de temperatura máxima en primavera, con una baja de 1,5°C (ver gráfico 27).

Como se mencionó con anterioridad, la escasez de datos en los dos primeros decenios hace difícil poder establecer un mayor análisis del comportamiento de las temperaturas. Pese a lo anterior, se puede observar una estabilidad en los valores entre los años 2000 y 2020 (ver figura 34).

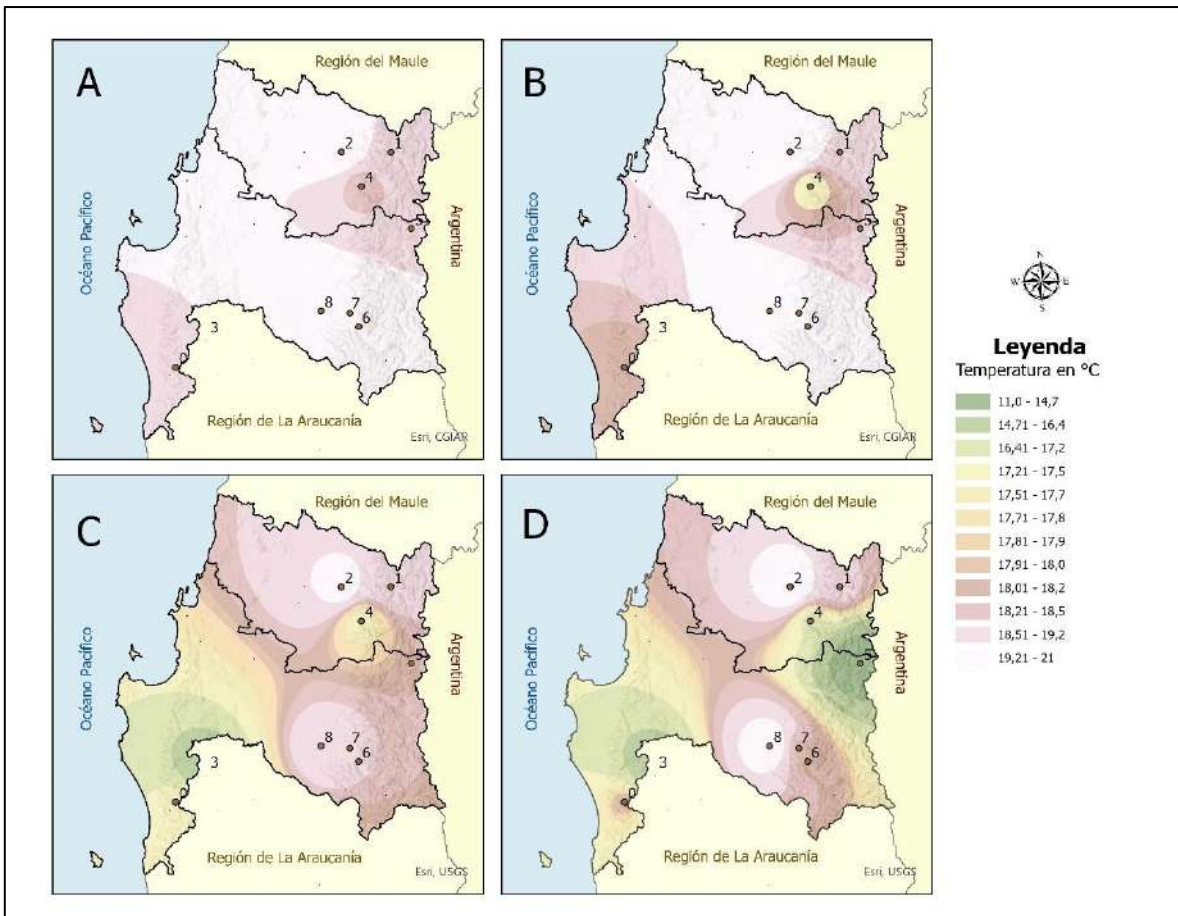


Figura 34: Distribución espacial de la variación de temperatura en las Regiones del Ñuble y Biobío, donde A corresponde al promedio de las temperaturas máximas de primavera entre 1985 – 1989; B corresponde al promedio de las temperaturas máximas de primavera entre 1990 – 1999; C corresponde al promedio de las temperaturas máximas de primavera entre 2000 – 2009 y D corresponde al promedio de las temperaturas máximas de primavera entre 2010 – 2020. Las estaciones corresponden a: 1 Caracol DGA; 2 Coihueco Embalse DGA; 3 Diguillin DGA; 4 Parque Nahuelbuta DGA; 5 Alto Mallines DGA; 6 Río Biobío En La Culebra DGA; 7 Río Huequecura Aguas Arriba Embalse Angostura DGA; 8 Quilaco DGA y 9 Contulmo DGA. Se puede observar una escasa variación en las temperaturas y su distribución geoespacial. Fuente: Elaboración propia.

Así, considerando la limitante de los datos por la falta de registro en la décadas anterior al 2000, se logra apreciar que las temperaturas en la zona costera se mantienen similares a lo largo del período analizado, destacando un pequeño aumento en la zona surponiente de la Región del Biobío, a la vez que se logra identificar una zona de enfriamiento en la parte norponiente de la misma región.

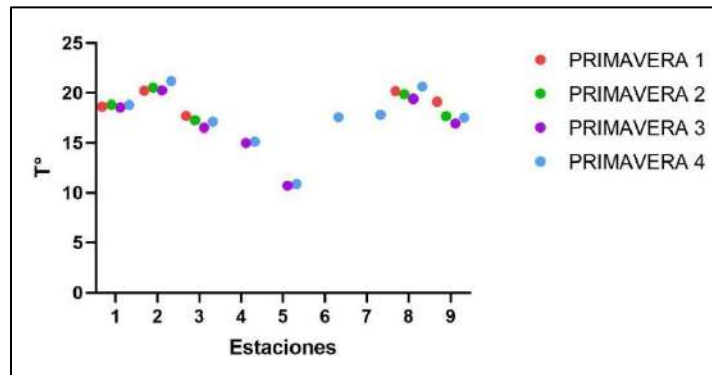


Gráfico 27: Distribución temporal de la variación de temperatura en las Regiones del Ñuble y Biobío, donde Primavera 1 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de primavera entre 1985 – 1989; Primavera 2 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de primavera entre 1990 – 1999; Primavera 3 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de primavera entre 2000 – 2009 y Primavera 4 corresponde al promedio de las temperaturas máximas de primavera entre 2010 – 2020. Las estaciones corresponden a: 1 Caracol DGA; 2 Coihueco Embalse DGA; 3 Diguillin DGA; 4 Parque Nahuelbuta DGA; 5 Alto Mallines DGA; 6 Río Biobío En La Culebra DGA; 7 Río Huequecura Aguas Arriba Embalse Angostura DGA; 8 Quilaco DGA y 9 Contulmo DGA. Fuente: Elaboración propia.

Las temperaturas mínimas en la estación de primavera para las regiones de Ñuble y Biobío presentaron una distribución espacial heterogénea durante el periodo de tiempo analizado, dado que no se logra identificar un patrón en su distribución. Lo anterior, puede darse debido a la poca cantidad de estaciones analizadas. Sólo en la década del año 1991 al año 2000 se observa un aumento de las temperaturas mínimas en ambas regiones llegando en la estación de Contulmo a 3,3°C ubicada en la parte sur de la Región del Biobío (ver figura 35).

Posteriormente, las temperaturas mínimas disminuyen en la Región de Ñuble y parte norte de la Región del Biobío, incluyendo la zona de la Cordillera de Los Andes, presentando esta última un leve aumento entre los años 2011 al 2020.

La Región de Ñuble por su parte, registra un leve aumento de los valores en la zona costera, concentrando los valores más bajos en la zona oriental de la misma.

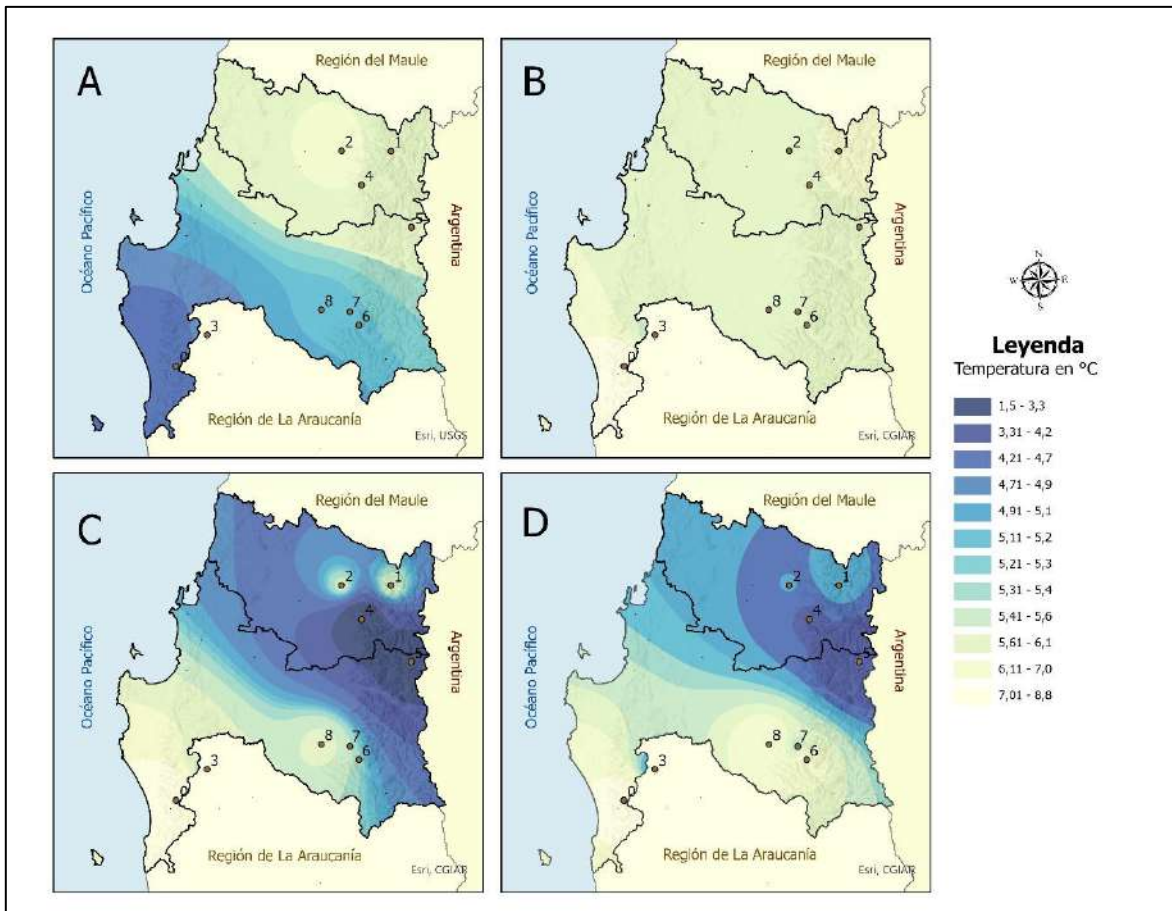


Figura 35: Distribución espacial de la variación de temperatura en las Regiones del Ñuble y Biobío, donde A corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de primavera entre 1985 – 1989; B corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de primavera entre 1990 – 1999; C corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de primavera entre 2000 – 2009 y D corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de primavera entre 2010 – 2020. Las estaciones corresponden a: 1 Caracol DGA; 2 Coihueco Embalse DGA; 3 Diguillin DGA; 4 Parque Nahuelbuta DGA; 5 Alto Mallines DGA; 6 Río Biobío En La Culebra DGA; 7 Río Huequecura Aguas Arriba Embalse Angostura DGA; 8 Quilaco DGA y 9 Contulmo DGA. Fuente: Elaboración propia.

Esta disminución queda en evidencia la observar el gráfico 28, donde se puede ver que los puntos de color celeste (que representan al período entre los años 2011 y 2020), se ubican bajo los puntos que representan a las otras décadas, siendo sólo la estación de Coltulmo DGA la que registra un aumento en los valores de temperatura mínima.

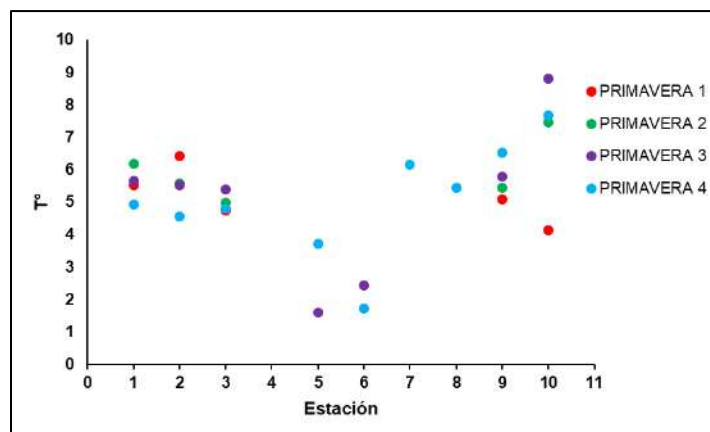


Gráfico 28: Distribución temporal de la variación de temperatura en las Regiones del Ñuble y Biobío, donde Primavera 1 corresponde al promedio de las temperaturas mínima de primavera entre 1985 – 1989; Primavera 2 corresponde al promedio de las temperaturas mínima de primavera entre 1990 – 1999; Primavera 3 corresponde al promedio de las temperaturas mínima de primavera entre 2000 – 2009 y Primavera 4 corresponde al promedio de las temperaturas mínima de primavera entre 2010 – 2020. Las estaciones corresponden a: 1 Caracol DGA; 2 Coihueco Embalse DGA; 3 Diguillin DGA; 4 Parque Nahuelbuta DGA; 5 Alto Mallines DGA; 6 Río Biobío En La Culebra DGA; 7 Río Huequecura Aguas Arriba Embalse Angostura DGA; 8 Quilaco DGA y 9 Contulmo DGA. Fuente: Elaboración propia.

3.3.2 Distribución temporal y geográfica de las precipitaciones

En el caso de las precipitaciones, se consideró el mismo periodo de tiempo (35 años), con la diferencia del tipo de estación, ya que, en este caso, sólo se usaron estaciones pluviométricas, la que presentan una red mucho más robusta que las meteorológicas desde donde se obtuvo el dato de temperatura máxima y mínima para cada estación climatológica del año.

Dado que, en la zona central de Chile, donde se inserta el área de estudio, no llueve durante todo el año, sólo se analizaron los datos de los meses que concentran la mayor cantidad de precipitaciones, esto es entre los meses de mayo a septiembre.

A continuación, se presentan las estaciones pluviométricas utilizadas por región:

NOMBRE	LAT	LONG	REGIÓN
ALGARROBO	33° 26' 21"	71° 37' 26"	VALPARAÍSO
ALICAHUE	32° 20' 27"	70° 45' 06"	VALPARAÍSO
CANAL COLORADO EN BOCATOMA	32° 50' 18"	70° 21' 19"	VALPARAÍSO
CASABLANCA	33° 19' 23"	71° 24' 38"	VALPARAÍSO

CATEMU	32° 45' 29"	70° 56' 33"	VALPARAÍSO
CERRILLOS DE LEYDA	33° 38' 04"	71° 30' 38"	VALPARAÍSO
CERRO COLORADO ARMADA	33° 04' 57"	71° 37' 02"	VALPARAÍSO
COLLIGUAY	33° 10' 07"	71° 08' 47"	VALPARAÍSO
EL COBRE	32° 39' 11"	71° 11' 47"	VALPARAÍSO
EL TARTARO	32° 34' 06"	70° 41' 56"	VALPARAÍSO
ESTERO QUINTERO EN VALLE VERDE	32° 48' 04"	71° 25' 10"	VALPARAÍSO
ESTERO RABUCO	32° 51' 13"	71° 07' 14"	VALPARAÍSO
FUNDO LAS DOS PUERTAS	33° 51' 41"	71° 39' 47"	VALPARAÍSO
JAHUEL	32° 41' 14"	70° 35' 47"	VALPARAÍSO
LA MOSTAZA	32° 26' 15"	70° 40' 54"	VALPARAÍSO
LAGO PEUELAS	33° 08' 42"	71° 33' 22"	VALPARAÍSO
LAGUNA DE ZAPALLAR	32° 37' 26"	71° 24' 27"	VALPARAÍSO
LAGUNILLAS	33° 26' 50"	71° 27' 17"	VALPARAÍSO
LAS PATAGUAS	32° 32' 15"	71° 08' 07"	VALPARAÍSO
LAS PIEDRAS	33° 09' 20"	71° 18' 43"	VALPARAÍSO
LAS SALINAS	33° 00' 09"	71° 32' 48"	VALPARAÍSO
LLIU LLIU EMBALSE	33° 05' 54"	71° 12' 52"	VALPARAÍSO
LO ROJAS	32° 48' 49"	71° 15' 02"	VALPARAÍSO
LOS ANDES	32° 48' 41"	70° 38' 31"	VALPARAÍSO
LOS AROMOS	32° 57' 28"	71° 20' 42"	VALPARAÍSO
MINA CERRO NEGRO	32° 35' 35"	70° 52' 20"	VALPARAÍSO
QUEBRADA ALVARADO	33° 03' 02"	71° 06' 53"	VALPARAÍSO
QUILLOTA	32° 53' 46"	71° 12' 23"	VALPARAÍSO
RIECILLOS	32° 55' 21"	70° 21' 26"	VALPARAÍSO
RIO ACONCAHUA EN CHACABUQUITO	32° 51' 02"	70° 30' 34"	VALPARAÍSO
RIO ACONCAHUA EN RIO BLANCO	32° 54' 37"	70° 18' 26"	VALPARAÍSO
RIO ACONCAHUA EN ROMERAL	32° 50' 24"	71° 01' 32"	VALPARAÍSO
RIO ACONCAHUA EN SAN FELIPE	32° 45' 27"	70° 44' 11"	VALPARAÍSO
RIO ALICAHUE DEL COLLIGUAY	32° 19' 51"	70° 44' 16"	VALPARAÍSO
RIO JUNCAL EN JUNCAL	32° 52' 13"	70° 08' 50"	VALPARAÍSO
RIO MAIPO EN CABIMBAO	33° 46' 03"	71° 31' 50"	VALPARAÍSO
RODELILLO	33° 03' 02"	71° 35' 03"	VALPARAÍSO
SAN ANTONIO PTA PANUL	33° 34' 29"	71° 37' 30"	VALPARAÍSO
SAN FELIPE	32° 45' 19"	70° 42' 25"	VALPARAÍSO
TAPIHUE	33° 17' 27"	71° 17' 22"	VALPARAÍSO
VILCUYA	32° 51' 37"	70° 28' 18"	VALPARAÍSO
AGUA FRIA	35° 18' 26"	71° 05' 07"	MAULE
ANCOA EMBALSE	35° 54' 38"	71° 17' 45"	MAULE
ARMERILLOS	35° 42' 13"	71° 04' 47"	MAULE
COLORADO	35° 38' 27"	71° 15' 38"	MAULE
CONSTITUCION	35° 20' 30"	72° 25' 21"	MAULE
CURICO	34° 58' 30"	71° 14' 59"	MAULE

DIGUA EMBALSE	36° 15' 24"	71° 32' 54"	MAULE
EL ALAMO	36° 06' 47"	72° 25' 13"	MAULE
EL DURAZNO	35° 29' 41"	71° 19' 13"	MAULE
EL GUINDO	35° 15' 46"	71° 19' 35"	MAULE
EL MANZANO	34° 57' 48"	70° 55' 05"	MAULE
FUNDO EL RADAL	35° 25' 08"	71° 02' 38"	MAULE
HORNILLO	35° 52' 05"	71° 06' 60"	MAULE
HUAPI	35° 29' 10"	71° 17' 26"	MAULE
JUAN AMIGO	36° 04' 46"	71° 23' 29"	MAULE
LA ESTRELLA	35° 46' 59"	72° 11' 26"	MAULE
LAGUNA DE TORCA	34° 46' 05"	72° 03' 53"	MAULE
LIGUAY	35° 56' 51"	71° 41' 22"	MAULE
LINARES	35° 50' 43"	71° 36' 24"	MAULE
LONTUE	35° 02' 38"	71° 17' 22"	MAULE
MELOZAL	35° 47' 08"	71° 45' 59"	MAULE
MONTE OSCURO	35° 07' 30"	70° 58' 43"	MAULE
NIRIVILO	35° 32' 37"	72° 05' 34"	MAULE
PARRAL	36° 11' 36"	71° 49' 44"	MAULE
PENCAHUE	35° 22' 35"	71° 50' 09"	MAULE
POTRERO GRANDE	35° 10' 60"	71° 05' 52"	MAULE
PUTU	35° 13' 08"	72° 16' 60"	MAULE
QUELLA	36° 03' 25"	72° 05' 29"	MAULE
RIO ANCOA EN EL MORRO	35° 54' 30"	71° 17' 48"	MAULE
RIO CLARO EN RAUQUEN	35° 27' 05"	71° 43' 60"	MAULE
RIO CLARO EN SAN CARLOS	35° 41' 56"	71° 03' 41"	MAULE
RIO LONGAVI EN LA QUIRIQUINA	36° 13' 46"	71° 27' 26"	MAULE
RIO MATAQUITO EN LICANTEN	34° 59' 03"	72° 00' 35"	MAULE
RIO MAULE EN ARMERILLOS	35° 42' 16"	71° 06' 18"	MAULE
RIO MAULE EN FOREL	35° 24' 29"	72° 12' 38"	MAULE
RIO MELADO EN LA LANCHA DGAC	35° 51' 00"	71° 04' 00"	MAULE
SAN JAVIER	35° 35' 30"	71° 40' 30"	MAULE
SAN RAFAEL	35° 18' 40"	71° 31' 38"	MAULE
TALCA	35° 25' 10"	71° 39' 38"	MAULE
VILCHES ALTO	35° 35' 38"	71° 05' 19"	MAULE
VILLA PRAT	35° 05' 43"	71° 36' 43"	MAULE
LAS CRUCES	37° 06' 40"	71° 45' 54"	ÑUBLE / BIOBIO
MANGARRAL	36° 14' 07"	72° 20' 34"	ÑUBLE / BIOBIO
SAN CARLOS DE PUREN	37° 35' 39"	72° 16' 38"	ÑUBLE / BIOBIO
LOS ANGELES	37° 30' 08"	72° 24' 30"	ÑUBLE / BIOBIO
LAJA	37° 16' 38"	72° 42' 59"	ÑUBLE / BIOBIO
QUILACO	37° 41' 07"	72° 00' 24"	ÑUBLE / BIOBIO
TRUPAN	37° 16' 49"	71° 49' 24"	ÑUBLE / BIOBIO
CARAMPANGUE	37° 15' 21"	73° 14' 33"	ÑUBLE / BIOBIO

CERRO EL PADRE	37° 46' 47"	71° 51' 59"	ÑUBLE / BIOBIO
DICHATO	36° 32' 44"	72° 55' 52"	ÑUBLE / BIOBIO
QUILLAILEO	37° 39' 04"	71° 42' 49"	ÑUBLE / BIOBIO
TUCAPEL	37° 17' 36"	71° 57' 06"	ÑUBLE / BIOBIO
CONTULMO	38° 01' 06"	73° 13' 49"	ÑUBLE / BIOBIO
LAS PATAGUAS	36° 47' 33"	72° 53' 32"	ÑUBLE / BIOBIO
MULCHEN	37° 42' 53"	72° 14' 38"	ÑUBLE / BIOBIO
PILGUEN	37° 49' 50"	72° 13' 11"	ÑUBLE / BIOBIO
RAFAEL	36° 38' 11"	72° 50' 56"	ÑUBLE / BIOBIO

Tabla 7: Estaciones Pluviométricas. Fuente Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas.

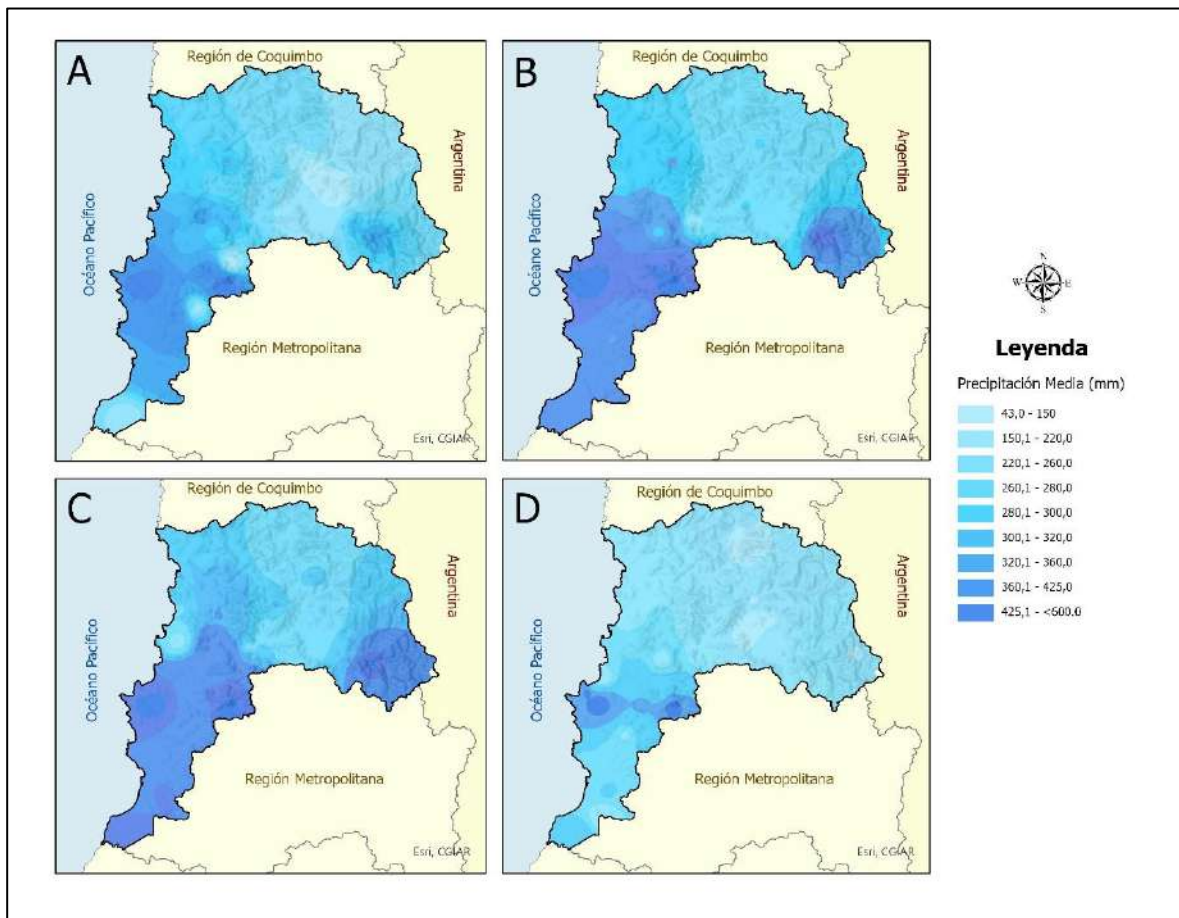


Figura 36: Variación de las precipitaciones medias para el período comprendido entre mayo y septiembre en la Región de Valparaíso. Donde A corresponde al promedio de las precipitaciones entre 1985 – 1989; B corresponde al promedio de las precipitaciones entre 1990 – 1999; C corresponde al promedio de las precipitaciones entre 2000 – 2009 y D corresponde al promedio de las precipitaciones entre 2010 – 2020.

De acuerdo al análisis temporal y geoespacial de las precipitaciones en la Región de Valparaíso, se pueden observar cambios importantes entre los años 1985 y

2020. En las décadas estudiadas, las precipitaciones se concentran en la zona suroeste de la región, registrando valores cercanos a los 360 mm promedio por temporada de lluvia², lo que se ve incrementada entre los años 1990 y 2000, con un alza de 65 mm promedio, destacando el aumento que se observa en la parte sureste, en la Cordillera de Los Andes. Si bien la Región de Valparaíso siempre ha mostrado variaciones latitudinales en la cantidad de agua caída, concentrándose de preferencia en su parte sur, llama la atención la disminución generalizada que presenta durante la última década, lo que confirma la condición de sequía que experimenta la zona central del país desde el año 2009 aproximadamente, la que ha dejado a la fecha, un déficit de un 70% de agua caída y un 70% de déficit en nieve (ver figura 36).

En la década del año 2010, se observa una disminución de los valores registrados en el 80% de las estaciones pluviométricas, lo que se hace aún más evidente en la década del año 2020 donde la disminución supera los 100 mm en promedio en todas las estaciones. Si bien, en la última década de suman siete estaciones pluviométricas, que podrían influir en la distribución de la precipitación, se puede indicar que estas no afectan al análisis realizado, dado que contribuyen a identificar la sequía que presenta la región, destacando sólo un leve aumento de las precipitaciones en la parte comprendida entre las localidades de Algarrobo y Cartagena, proyectándose este aumento levemente hacia el interior, hasta el límite con la Región Metropolitana, lo que se puede observar con un azul más oscuro en la figura 36, letra D.

Si se analizan las precipitaciones totales caídas en cada una de las estaciones pluviométricas en todo el período de tiempo que contempla este estudio, se puede establecer una tendencia a la baja en 27 de las 34 estaciones pluviométricas que presentan registros continuos entre los años 1985 y 2020, lo que representa cerca de un 80% del total. Sólo 7 estaciones el total mencionado, mostraron un aumento en sus registros, ubicadas en la zona centro – norte de la región.

² Se entenderá como temporada de lluvia los meses comprendidos entre mayo y septiembre de cada año.

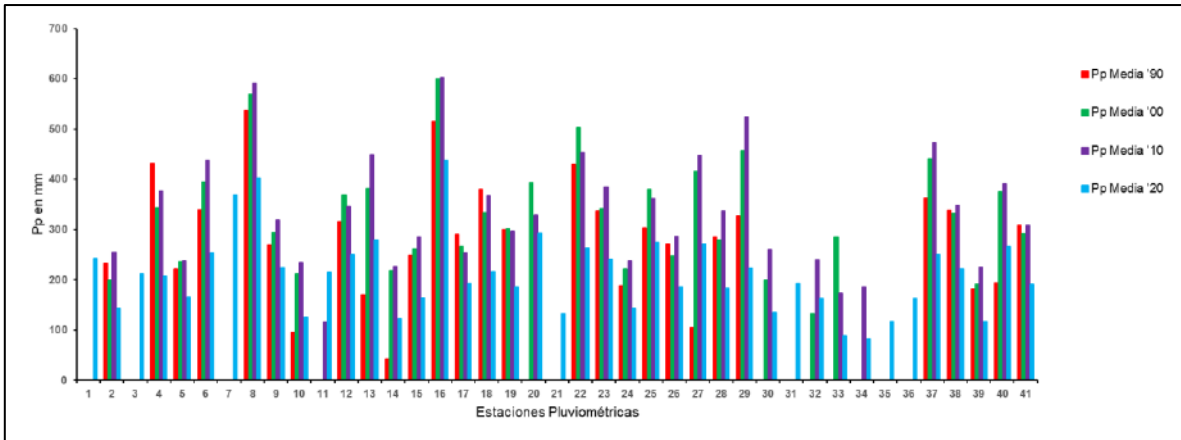


Gráfico 29: Variación de las precipitaciones medias para el período comprendido entre mayo y septiembre en la Región de Valparaíso. Donde el color rojo corresponde al promedio de las precipitaciones acumuladas entre 1985 – 1989; el color verde corresponde al promedio de las precipitaciones acumuladas entre 1990 – 1999; el color morado corresponde al promedio de las precipitaciones acumuladas entre 2000 – 2009 y el color celeste corresponde al promedio de las precipitaciones acumuladas entre 2010 – 2020.

Al igual que en la Región de Valparaíso, las precipitaciones en la Región del Maule presentan una disminución importante en los años estudiados.

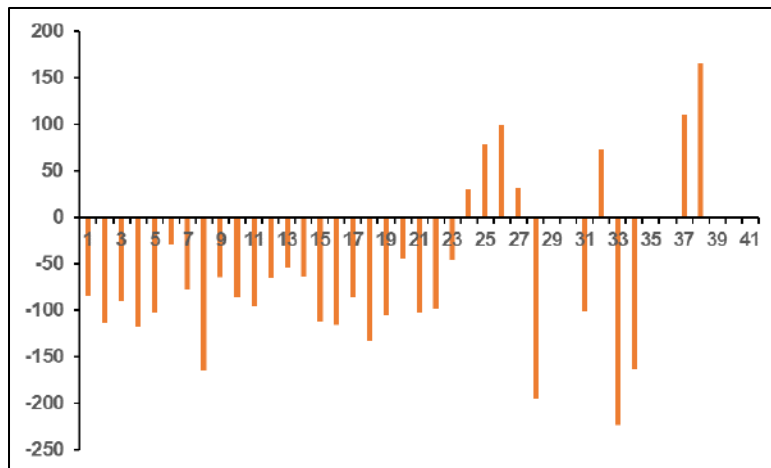


Gráfico 30: Variación temporal de las precipitaciones medias acumuladas para el período comprendido entre mayo y septiembre entre los años 1985 y 2020 en la Región de Valparaíso.

La distribución geográfica de las precipitaciones también presenta cambios importantes, desde el año 1985. Como se puede observar en la figura 37, el cuadrante B, que corresponde al promedio de las precipitaciones acumuladas entre 1990 – 1999, muestra una disminución de las precipitaciones en toda la zona costera y parte del valle central, en la parte norte de la región. En el cuadrante C,

que corresponde al promedio de las precipitaciones acumuladas entre 2000 – 2009, se puede ver un leve aumento de las precipitaciones en la zona costera de Constitución y hacia el interior, y otra zona cercana a Cauquenes. Ya en el recuadro D, que corresponde al promedio de las precipitaciones acumuladas entre 2010 – 2020, se puede ver que las precipitaciones disminuyen completamente en la zona costera, y se concentran en la zona de la Cordillera de Los Andes, principalmente, en la zona precordillerana, donde de igual forma, se observa una disminución en sus valores.

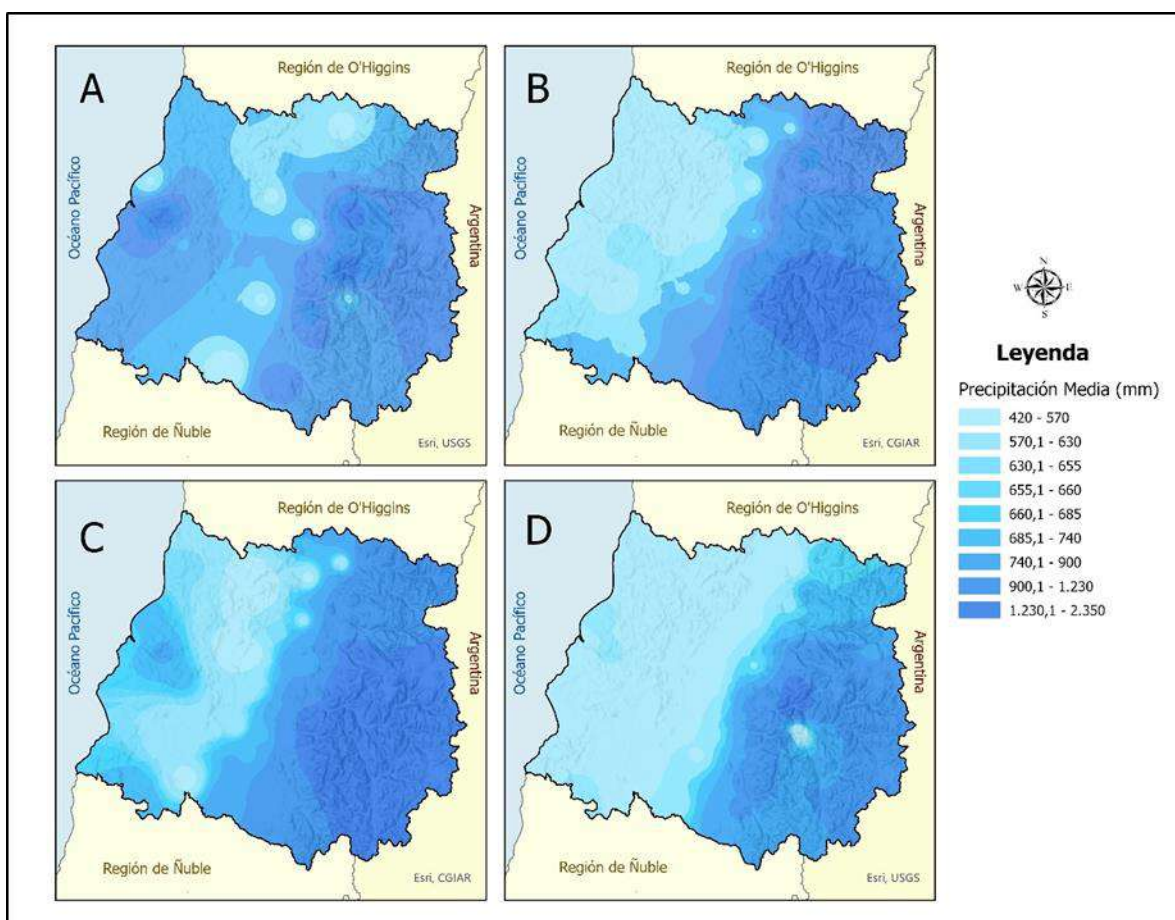


Figura 37: Variación de las precipitaciones medias para el período comprendido entre mayo y septiembre en la Región del Maule. Donde A corresponde al promedio de las precipitaciones entre 1985 – 1989; B corresponde al promedio de las precipitaciones entre 1990 – 1999; C corresponde al promedio de las precipitaciones entre 2000 – 2009 y D corresponde al promedio de las precipitaciones entre 2010 – 2020.

Según el estudio realizado Tapia (2021) “Caracterización y análisis de las sequías y olas de calor (1977-2020) en Talca”, memoria de pregrado para optar al título de

Ingeniero Agrónomo de la Universidad de Talca, explica como las precipitaciones han ido en descenso los últimos 120 años, produciéndose en este último siglo un 61,9% de meses más secos por sobre los húmedos, todo esto en conjunto de la sequía más larga (14 años), lo que viene a confirmar los resultados obtenidos en el presente trabajo.

De acuerdo a lo mencionado, la región presenta un clima templado lluvioso, con precipitaciones que alcanzan entre 1.500 a 2.000 mm en el año (Vargas, 2021). En este sentido, los datos analizados confirman la disminución importante en las precipitaciones, ya que, solo cinco estaciones se ubican en este rango de valores para el periodo de tiempo analizado, que serían las estaciones de Armerillos, Hornillos, Fundo el Radal, Río Maule en Armerillos y Río Melado en Lancha DGAC, ubicadas principalmente, en la parte cordillerana de la región.

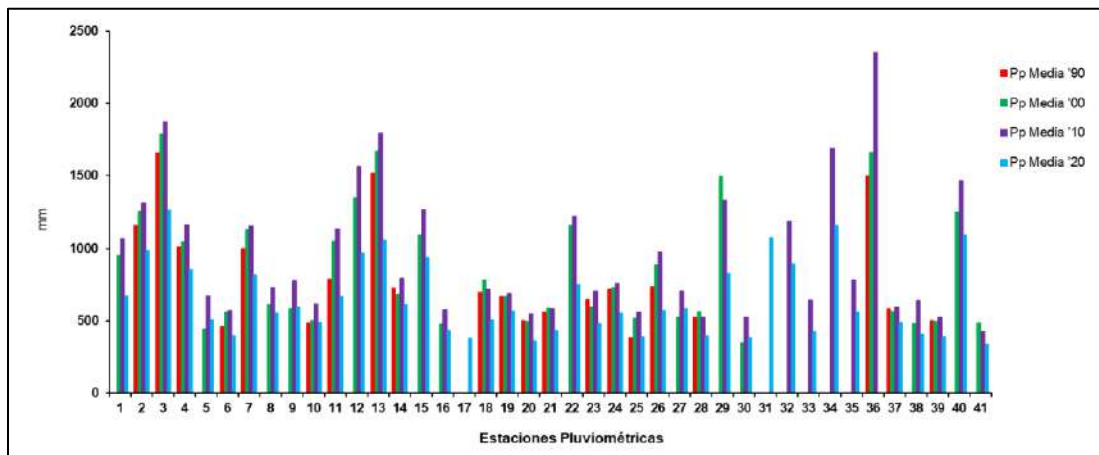


Gráfico 31: Variación de las precipitaciones medias para el período comprendido entre mayo y septiembre en la Región del Maule. Donde el color rojo corresponde al promedio de las precipitaciones acumuladas entre 1985 – 1989; el color verde corresponde al promedio de las precipitaciones acumuladas entre 1990 – 1999; el color morado corresponde al promedio de las precipitaciones acumuladas entre 2000 – 2009 y el color celeste corresponde al promedio de las precipitaciones acumuladas entre 2010 – 2020.

En el gráfico 31 se puede ver que, en la década del 2010 se presenta un aumento de las precipitaciones (barras en color morado) en comparación con el período entre los años 1985 al 1990 (barras en color rojo) y la década de 2000 (barras en color verde), las que luego vuelven a disminuir bruscamente en la década del año 2020 (barra en color celeste). Si bien, las precipitaciones acumuladas en promedio entre los años 2001 y 2010 aumentaron, no han sido suficiente para lograr el balance

hídrico que la zona requiere, más aún con la extenuante sequía que se agrava en la década del año 2020.

En lo referente a la distribución temporal, se puede ver que, de las 39 estaciones que presentan registros continuos, al menos, entre el año 1990 y 2020, sólo seis estaciones mostraron un aumento en sus precipitaciones, las que no superaron los 60 mm de incremento.

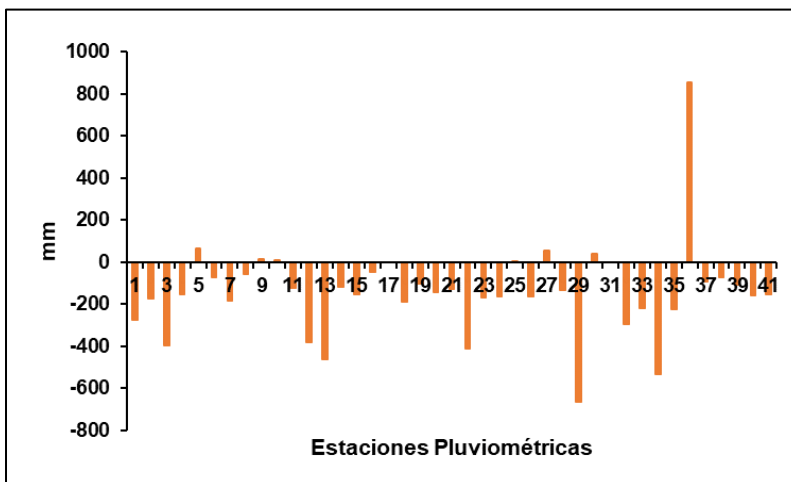


Gráfico 32: Variación temporal de las precipitaciones medias acumuladas para el período comprendido entre mayo y septiembre entre los años 1985 y 2020 en la Región del Maule.

El resto de las estaciones registran disminuciones importantes que superan los 100 mm promedio entre los meses de mayo a septiembre, destacando las estaciones de Río Maule en Armerillos, Hornillos y Monte Oscuro con disminuciones de 532, 462 y 411 mm respectivamente (ver gráfico 32).

En el caso de la Región de Ñuble, la escases de estaciones pluviométricas que permitan analizar los datos de manera correcta, por lo que se consideró un análisis integrado entre la Región del Ñuble y la Región del Biobío, ya que esta última, cuenta con mayor cantidad de estaciones que registran datos en el período de tiempo definido para este estudio.

Con esta limitación, se pudo definir que los valores de precipitaciones acumuladas promedio, entre los meses de mayo y septiembre, los cuales mostraron una realidad distinta al de las otras regiones. La distribución espacial de las precipitaciones varía

en cada década con una tendencia al aumento en las tres primeras, lo que se observa en la figura 38 en los cuadrante B que corresponde al promedio de las precipitaciones acumuladas entre los años 1990 – 1999, donde se ilustra el aumento de los registros de agua caída en a zona cordillerana de la región y la parte sur – oeste. Luego, en el cuadrante C, que corresponde al promedio de las precipitaciones acumuladas entre los años 1991 – 2000, se aprecia un nuevo aumento de las precipitaciones caídas en la temporada analizada, generalizada en casi toda la región, destacando la zona central y cordillerana de la región.

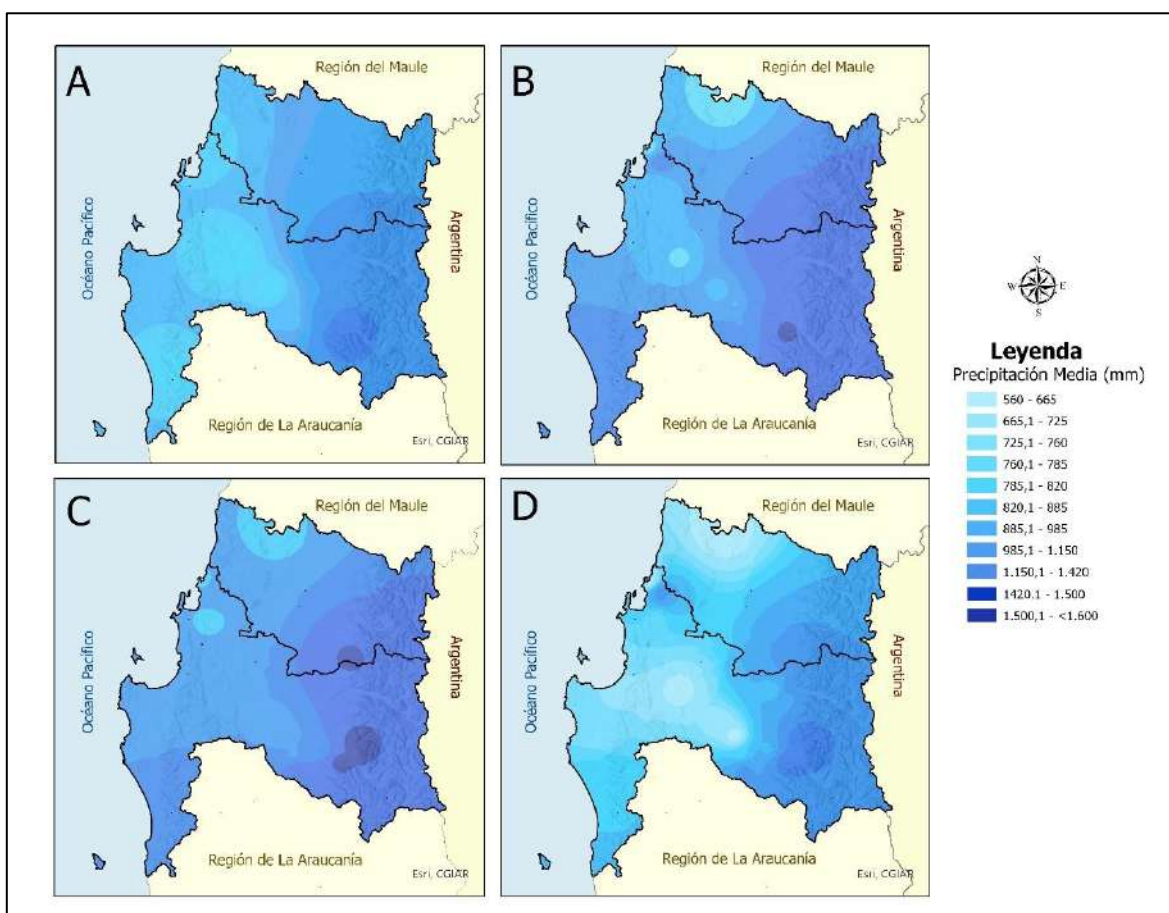


Figura 38: Variación de las precipitaciones medias para el período comprendido entre mayo y septiembre en la Región del Ñuble y Biobío. Donde A corresponde al promedio de las precipitaciones acumuladas entre 1985 – 1989; B corresponde al promedio de las precipitaciones acumuladas entre 1990 – 1999; C corresponde al promedio de las precipitaciones acumuladas entre 2000 – 2009 y D corresponde al promedio de las precipitaciones acumuladas entre 2010 – 2020.

Estos aumentos no superan en promedio, los 100 mm, los que luego vuelven a decaer en el período comprendido entre los años 2011 y 2020, como se observa en el cuadrante D.

Como se mencionó con anterioridad, las regiones de Ñuble y Biobío tienen un clima Mediterráneo y Templado con lluvias invernales, de acuerdo a la clasificación de Köppen, donde las precipitaciones suelen alcanzar entre 1.000 a 1.500 mm al año. Si bien, se indicó que hubo un aumento de las precipitaciones entre los años 1990 y 2010, este aumento no fue igual en todas las estaciones pluviométricas. Entre los años 1990 y 1999, sólo 6 estaciones de un total de 16, superaron los 1.000 mm de agua caída. A su vez, entre los años 2000 y 2010, fueron 7 (de 17) las estaciones que superaron los 1.000 mm. Entre los años 2011 y 2020 estas bajan drásticamente a solo 3 estaciones (de un total de 17) que superan los 1.000 mm de agua caída, lo que evidencia un déficit importante de precipitaciones.

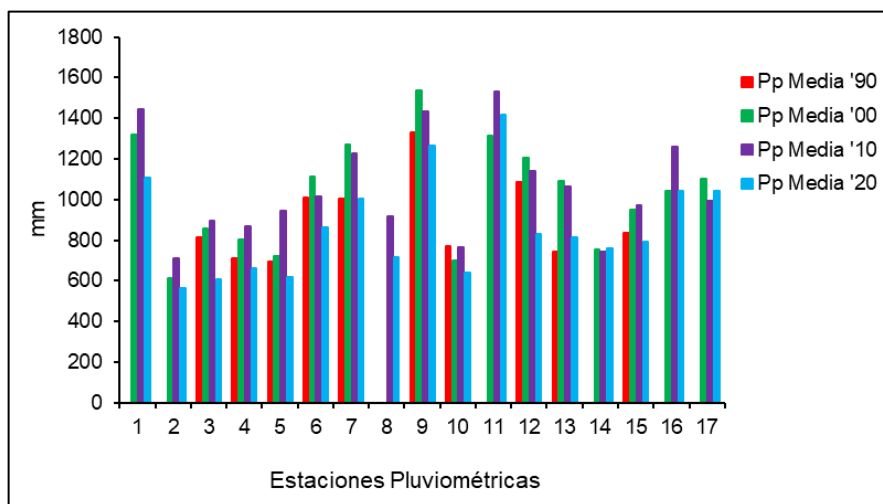


Gráfico 33: Variación de las precipitaciones medias para el período comprendido entre mayo y septiembre en la Región del Maule. Donde el color rojo corresponde al promedio de las precipitaciones acumuladas entre 1985 – 1989; el color verde corresponde al promedio de las precipitaciones acumuladas entre 1990 – 1999; el color morado corresponde al promedio de las precipitaciones acumuladas entre 2000 – 2009 y el color celeste corresponde al promedio de las precipitaciones acumuladas entre 2010 – 2020.

El gráfico 34 confirma lo descrito con anterioridad. Se puede observar que, analizando todo el período de estudio, sólo cinco estaciones mostraron aumentos en las precipitaciones promedio acumuladas entre los meses de mayo a septiembre,

y 12 estaciones pluviométricas disminuyeron sus valores, donde destacan las estaciones Carampangue, San Carlos de Purén, Las Cruces y Tucapel con 202,2 mm, 208,5 mm, 210,9 mm y 252,2 mm respectivamente. Las estaciones Pilguén, Trupán y Las Pataguas, podría decirse que mantuvieron sus registros, ya que sólo registran un aumento de 0,5 mm, 3,9 mm y 8,5 mm respectivamente.

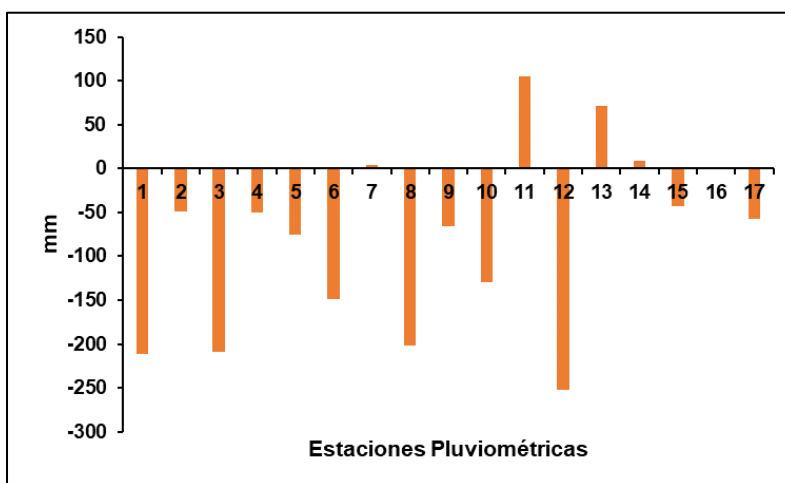


Gráfico 34: Variación temporal de las precipitaciones medias acumuladas para el período comprendido entre mayo y septiembre entre los años 1985 y 2020 en las regiones de Ñuble y Biobío.

3.4 Discusión de Resultados

Los datos analizados para todas las regiones, en cada una de las estaciones climáticas dan cuenta que el cambio climático y calentamiento global no han afectado a Chile de manera homogénea, sino más bien, existen regiones que presentan una tendencia a la elevación de las temperaturas máximas registradas, de acuerdo a las proyecciones realizadas por organismos internacionales. Sin embargo, existen regiones en el país donde la realidad de los registros analizados indica que, tales proyecciones, estarían erradas, ya que los aumentos son mucho menores, o incluso, la temperatura no ha aumentado, sino que, ha disminuido a lo largo del tiempo. Dado lo anterior, resulta importante poder contar con estudios acabados como el realizado en esta tesis, para todas las regiones de Chile, con la finalidad de poder analizar el impacto real que ocasionaría el cambio climático en

los diferentes ecosistemas, lo que contribuiría al desarrollo e implementación de políticas de Estado acordes a la realidad de cada región, y no establecer instrumentos de gestión estandarizados.

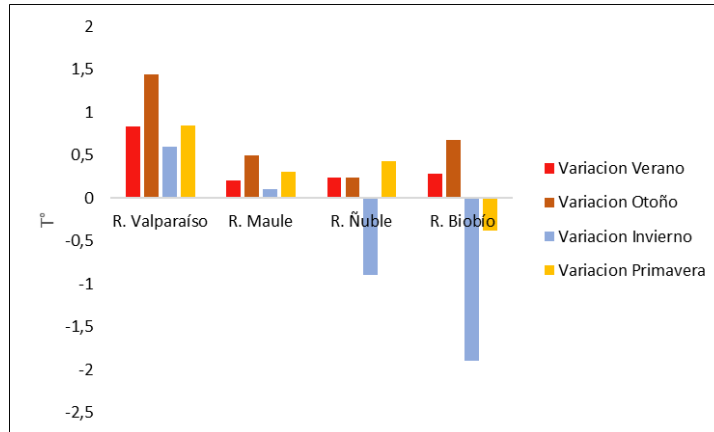


Gráfico 35: Promedio de variaciones de temperaturas máximas por región y estación del año. Se puede observar que la Región de Valparaíso es la que presenta los mayores aumentos en la temperatura, en las diferentes estaciones climáticas entre los años 1985 y 2020. Fuente: elaboración propia.

La Región de Valparaíso es la única de las cuatro regiones analizadas que ha experimentado una tendencia al aumento de las temperaturas máximas durante todo el año con valores que sobrepasan 1°C, alcanzando un aumento promedio de 1,4°C en otoño. Le sigue la Región del Maule con promedios de alzas en temperaturas máximas en todas las estaciones del año, pero con valores inferiores a los 0,5°C.

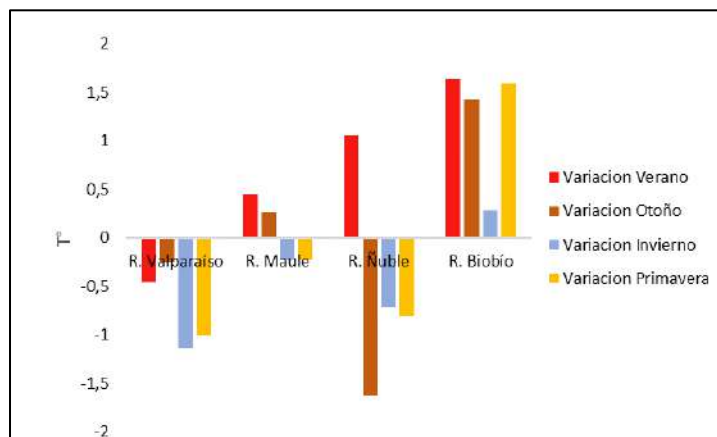


Gráfico 36: Promedio de variaciones de temperaturas mínimas por región y estación del año. Se puede observar que la Región de Valparaíso es la que presenta una disminución de sus

temperaturas en las cuatro estaciones analizadas, mientras que la Región del Biobío muestra un aumento de las mismas. Fuente: elaboración propia.

Las regiones de Ñuble y Biobío en cambio, muestran una tendencia a la disminución de las temperaturas máximas, en particular, en las estaciones de invierno y primavera, alcanzando una disminución de 0,9°C y 1,9°C respectivamente (ver gráfico 36).

A lo anterior, se confirma el incremento de las temperaturas máximas anuales en el período considerado entre 1986 y 2020, para todas las regiones del área de estudio en Chile Central. A mayor temperatura del aire aumenta la sequedad ambiental, situación que se agrava por la mega sequía en la cual se encuentra el país, lo que afecta a cada región debido a la reducción paulatina de las precipitaciones. Por tanto, en el gradiente latitudinal, si bien es cierto las temperaturas máximas tienden a ser menores en el rango propio de la región de acuerdo con la latitud, estos rangos manifiestan un incremento como tendencia general (ver gráfico 37).

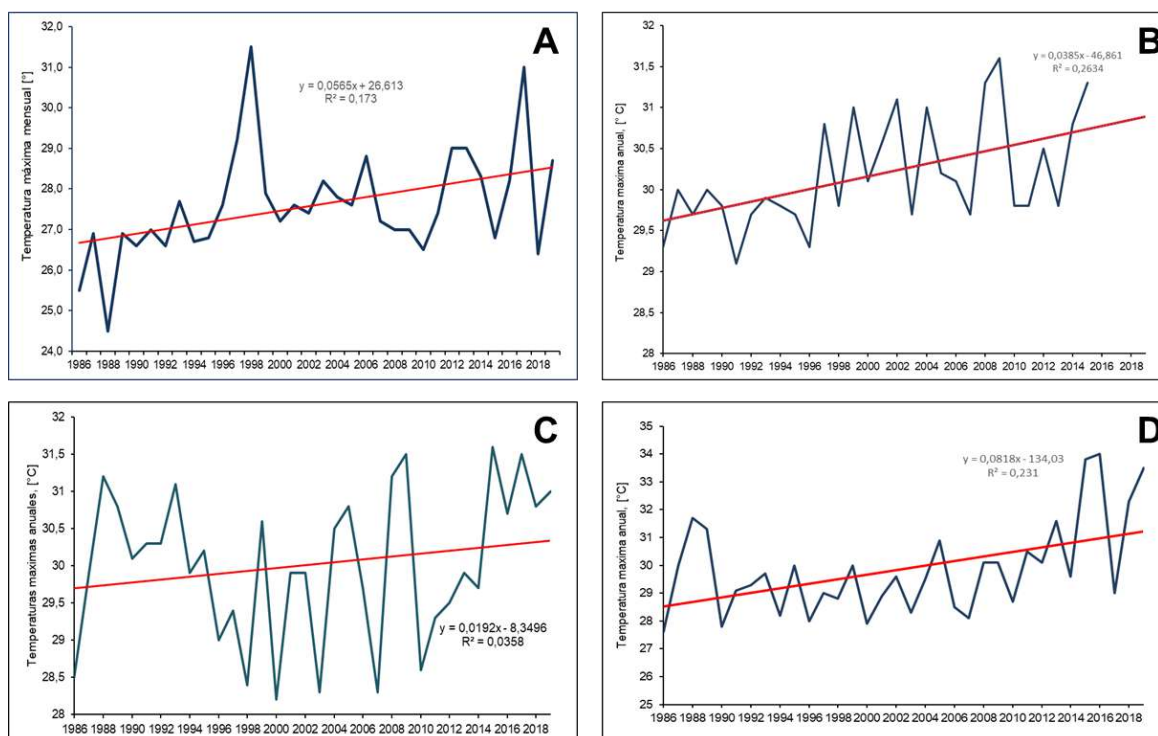


Gráfico 37. Evolución de las temperaturas máximas anuales. En el cuadrante A corresponde a la Región de Valparaíso. En el cuadrante B la Región del Maule. En el cuadrante C la Región de Ñuble y el cuadrante D corresponde a la Región del Biobío. Fuente: Elaboración propia

Por su parte, en relación al promedio de variación de las temperaturas mínimas, en el gráfico 36 se puede apreciar que la Región de Valparaíso presenta una disminución en todas las estaciones del año, siendo más marcada en la estación de invierno. En el caso de la Región del Maule se observa que las estaciones de verano y otoño muestran un alza en los valores de temperaturas mínimas, mientras que en las estaciones de invierno y primavera se ve claramente una baja de las mismas, sin embargo, tanto las alzas como las bajas no suelen sobrepasar los $0,4^{\circ}\text{C}$ por lo que se puede definir que las temperaturas se mantuvieron más menos estables. Diferente escenario es el que presenta la Región de Ñuble, donde sólo la estación de verano registro un aumento importante que sobrepasa $1,0^{\circ}\text{C}$, mientras que en el resto de las estaciones las disminuciones de las temperaturas mínimas llegan a $1,6^{\circ}\text{C}$.

La región del Biobío fue la única que registro un aumento de las temperaturas mínimas en todas las estaciones del año, llegando a superar un aumento de $1,4^{\circ}\text{C}$ en tres de las cuatro estaciones. Lo anterior demuestra que, si bien existe una variación en las temperaturas, esta no se comporta de la misma manera en todo el país, dado que existen particularidades que la diferencian, entre las cuales pueden estar las condiciones geográficas, de cada una de ellas.

En los datos correspondientes a las precipitaciones, analizando los resultados obtenidos en todas las regiones, se puede concluir que la Región del Maule fue la que tuvo una mayor disminución en sus precipitaciones medias acumuladas, con estaciones que superaron la disminución de más de 600 mm, seguida por las regiones de Ñuble y Biobío, donde las estaciones pluviométricas alcanzaron pérdidas cercanas a los 250 mm. Por último, la Región de Valparaíso tuvo estaciones pluviométricas con pérdidas de poco más de 200 mm en el periodo de tiempo analizado. Es decir, si bien todas las regiones han decaído sus precipitaciones, la Región del Maule es la que presenta un mayor déficit de precipitaciones (ver gráfico 38).

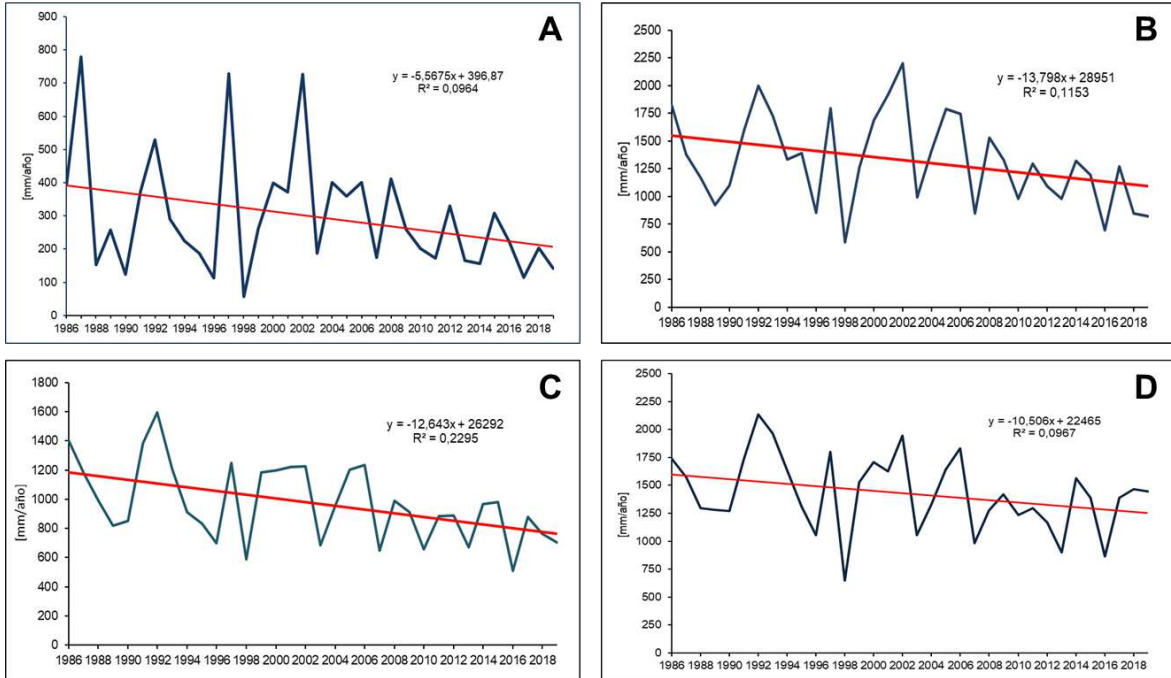


Gráfico 38. Evolución de las precipitaciones anuales. En el cuadrante A corresponde a la Región de Valparaíso. En el cuadrante B la Región del Maule. En el cuadrante C la Región de Ñuble y el cuadrante D corresponde a la Región del Biobío.

CAPITULO IV

ESTATUS Y PRODUCTIVIDAD DE LA VEGETACION NATIVA

4.1 Balance de la Superficie de Bosque Nativo

En la zona central de Chile, se ha visto afectada por eventos de sequía de muchos años de duración y las temperaturas máximas han superado los registros históricos. El impacto en el bosque nativo recién se ha estado investigando, pero no se cuenta con estudios de larga data, como es el caso del Catastro de especies nativas que CONAF lleva a cabo sistemáticamente a partir del año 1994.

Para predecir la respuesta del bosque frente a cambios climáticos globales es necesario conocer su funcionamiento (Ngao et al. 2005), siendo la productividad primaria neta un proceso fundamental del mismo (Pozo Torres, G. J., 2021). Según Duran, L. (2005) el tipo forestal esclerófilo, con un 2.0% de la superficie de bosques de Chile, ha sido cosechado intensamente debido a que la mayoría de las especies que lo componen presentan algún grado de interés comercial, ya sea por la extracción de productos maderables o no maderables.

De acuerdo a la revisión bibliográfica realizada, no existe un estudio sobre la productividad primaria del bosque esclerófilo de la zona central y centro – sur de Chile. Si bien, se encontraron estudios para ciertas especies individuales, principalmente, de vegetación introducida de monocultivos como el *Pinus Radiata* y *Eucaliptus*, estos no son representativos para el objetivo de estudio.

Dado que, i) este estudio tiene por objetivo poder determinar la relación existente entre los elementos climatológicos de temperatura y precipitación, con la productividad vegetal nativa, como consecuencia del cambio climático en la zona central y centro sur de Chile, en los últimos 30 años y ii) las regiones de Valparaíso, Maule, Ñuble y Biobío son frecuentemente afectadas por incendios forestales primero, por la alta cantidad de población que existe y, segundo, la fácil accesibilidad a espacios naturales para recreación; se buscaron áreas donde la

intervención del ser humano y los incendios forestales no hayan cambiado la configuración de la vegetación nativa, para verificar que los cambios – en caso de que hubiesen – son producto del cambio climático y no por causas ajenas a este.

4.2 Materiales y Métodos

Considerando que, el principal objetivo de analizar los cambios en la vegetación nativa, por causa del cambio climático, la única alternativa disponible es realizar análisis temporales con imágenes satelitales. La serie más longeva de sensores espaciales, hasta hoy, es la serie Landsat (ver figura 39).

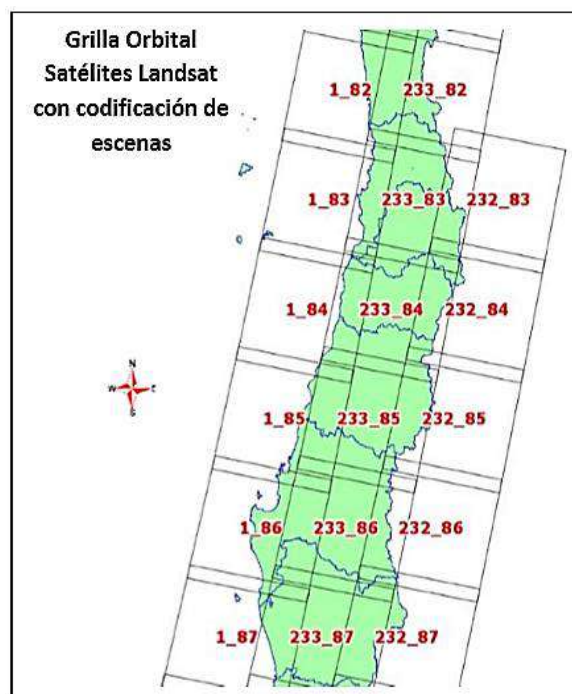


Figura 39: Grilla orbital del satélite LANDSAT-5 TM y códigos path and row de las escenas resultantes.
Fuente: Elaboración propia

Para cubrir el área de estudio, se trabajó con imágenes del año T1:1986, siendo posible contrastarlas con imágenes T2: diciembre 2019 y enero 2020, para así determinar las zonas donde el bosque nativo ha cambiado por motivo del cambio climático, descartando otras causas como la intervención antrópica e incendios forestales, como se mencionó anteriormente.

Para excluir del análisis las zonas con intervención antrópica, se analizaron exclusivamente sectores con presencia de vegetación nativa, que estén alejados de los centros poblados o correspondan a zonas con algún nivel de protección, como las del Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas por el Estado (SNASPE), áreas de protección privadas y bienes nacionales de uso público. Dado que la ocurrencia de incendios forestales afecta el estado de la vegetación nativa, se descartaron del análisis las áreas donde históricamente ha habido incendios, utilizando para ello los antecedentes recopilados por CONAF en el período 1985 - 2019.

La tabla 8, muestra los sectores de análisis identificados a través de la eliminación progresiva de los usos y subusos que no constituyen formaciones nativas del Catastro y Evaluación de los Recursos Vegetacionales Nativos de Chile, para cada una de las regiones involucradas. El resultado fueron 63 polígonos identificados, abarcando una superficie de 122.655 ha en las cuatro regiones consideradas.

Región	Coordenadas UTM	Superficie Regional [ha]	Superficie de Prospección de Vegetación [ha]
Valparaíso	6.338.625 253.574 19H	1.639.600	26.402
Maule	6.076.360 257.449 19H	3.029.610	50.405
Nuble	5.943.598 236175 19H	1.317.850	16.267
Bio Bio	5.928.584 672.863 18H	2.389.020	29.581
Total		8.376.080	122.655

Tabla 8. Superficie regional y superficie de prospección con vegetación nativa Fuente: Elaboración propia a partir de INE, (2006) y GeoHack, (2020).

La forma en que se verificó la disminución de bosque nativo en las áreas de análisis, se hizo considerando la presencia de suelos desnudos o sin clorofila calculando la diferencia de T2-T1 donde si ésta es positiva, significa un deterioro en la cobertura del bosque, y si es negativa que el bosque se ha recuperado.

Esta técnica presenta una limitación. Las imágenes Landsat poseen una resolución espacial de 30 m por pixel, lo que no permite distinguir el posible deterioro del bosque expresado en la sustitución de especies. Por esta razón solo se analizaron cambios en la cobertura de este.

Landsat es un conjunto de satélites desarrollados por la NASA (National Aeronautics and Space Administration of USA), desde comienzos de la década de 1970. Las imágenes Landsat son muy utilizadas para la investigación ambiental, ya que es posible adquirir imágenes en un período de tiempo de 35 años aproximadamente, con los satélites Landsat 5, 7 y 8. La resolución temporal o período de revisita de Landsat, es de 16 días. Dado que la vegetación nativa esclerófila está adaptada a estrés hídricos propios del clima del área de estudio, se decidió analizar imágenes satelitales de primavera y verano, con la finalidad de identificar deterioro vegetacional causado por el cambio climático. Lo anterior, se justifica considerando que las precipitaciones que alimentan este tipo de vegetación tienen su pick entre los meses de mayo a septiembre, donde se acumula nieve que se derrite en primavera y verano. De esta forma, si existe un cambio en la cantidad de agua caída en otoño e invierno, sumado al aumento de las temperaturas, el posible impacto se verá reflejado en los meses mencionados.

Bandas Landsat 5 TM	Longitud de Onda (μm)	Resolución (metros)
Banda 1 - Azul	0.45 - 0.52	30
Banda 2 - Verde	0.52 - 0.60	30
Banda 3 - Rojo	0.63 - 0.69	30
Banda 4 - Infrarrojo Cercano (NIR)	0.76 - 0.90	30
Banda 5 - SWIR	1.55 - 1.75	30
Banda 6 - Infrarrojo Térmico	10.40 - 12.50	120 (remuestreada a 30)
Banda 7 - SWIR	2.08 - 2.35	30

Tabla 9: Resolución espectral y espacial de las imágenes de Landsat 5. Fuente: Congedo Luca (2016).

Otra característica muy útil de las imágenes Landsat es que actualmente es posible obtenerlas ortorrectificadas, lo que asegura la sincronización espacial entre escenas de distintas épocas. En cuanto a las resoluciones espectrales y espaciales de los sensores Landsat, se presentan a continuación las características de los sensores Landsat 5 para el “Tiempo 1” (T1) y Landsat 8 para el “Tiempo 2” (T2) (ver tabla 9 y 10).

Bandas de Landsat 8 (Sensores OLI y TIRS)	Longitud de Onda (μm)	Resolución (metros)
Banda 1 - Costera - Aerosoles	0.435 - 0.451	30
Banda 2 - Azul	0.452 - 0.512	30
Banda 3 - Verde	0.533 - 0.590	30
Banda 4 - Rojo	0.636 - 0.673	30
Banda 5 - Infrarrojo Cercano (NIR)	0.851 - 0.879	30
Banda 6 - Infrarrojo de onda corta 1 (SWIR 1)	1.566 - 1.651	30
Banda 7 - Infrarrojo de onda corta 2 (SWIR 2)	2.107 - 2.294	30
Banda 8 - Pancromática	0.503 - 0.676	15
Banda 9 - Cirrus	1.363 - 1.384	30
Banda 10 - Infrarrojo Térmico (TIR 1)	10.60 - 11.19	100
Banda 11 - Infrarrojo Térmico (TIR 2)	11.50 - 12.51	100

Tabla 10: Resolución espectral y espacial de las imágenes de Landsat 5. Fuente: U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey.

En la selección de imágenes del T1 se consideró la imagen más antigua disponible y el grado de cobertura de nubes y nieve, seleccionando las escenas de menor % de cobertura. En la tabla n°11, se aprecian los códigos Landsat junto a la fecha de adquisición para las imágenes Landsat 5 que cumplieron con los criterios establecidos. Así mismo, en la tabla n°12, se aprecian los códigos Landsat junto a la fecha de adquisición para las imágenes Landsat 8.

Código Landsat 5	Día	Mes	Año
001085_19860204	04	02	1986
001086_19861221	21	12	1986
233083_19861230	30	12	1986
233085_19861230	30	12	1986
233086_19861011	11	10	1986

Tabla 11: Códigos y fechas de imágenes Landsat 5 seleccionadas para el proyecto. Fuente: Elaboración propia.

Código Landsat 8	Día	Mes	Año
LC08_L1TP_001085_20191216_20191226_01_T1	16	12	2019
LC08_L1TP_001086_20191216_20191226_01_T1	16	12	2019
LC08_L1TP_233083_20200110_20200114_01_T1	10	1	2020
LC08_L1TP_233085_20200110_20200114_01_T1	10	1	2020
LC08_L1TP_233086_20200110_20200114_01_T1	10	10	2020

Tabla 12: Códigos y fechas de imágenes Landsat 8 seleccionadas para el proyecto. Fuente: Elaboración propia.

Debido a la calidad espectral de Landsat, al tamaño del píxel y a que no hay registros documentales de tipo de bosque existente en el año 1986 en el área de estudio, no es posible analizar cambios en el tipo de bosque, como por ejemplo el paso de bosque a matorral, lo que caracterizaría una sustitución de especies. Por

este motivo, los cambios se analizaron en función de la pérdida de cobertura de clorofila dentro del bosque nativo entre el T1 y T2, asociando este hecho a un deterioro del bosque.

Una vez seleccionados los sectores de análisis, se procedió a limpiar los polígonos, quitando manualmente elementos del paisaje que generen confusión en el análisis satelital, como por ejemplo cuerpos de agua, caminos o infraestructura dentro de un parque administrado por CONAF.

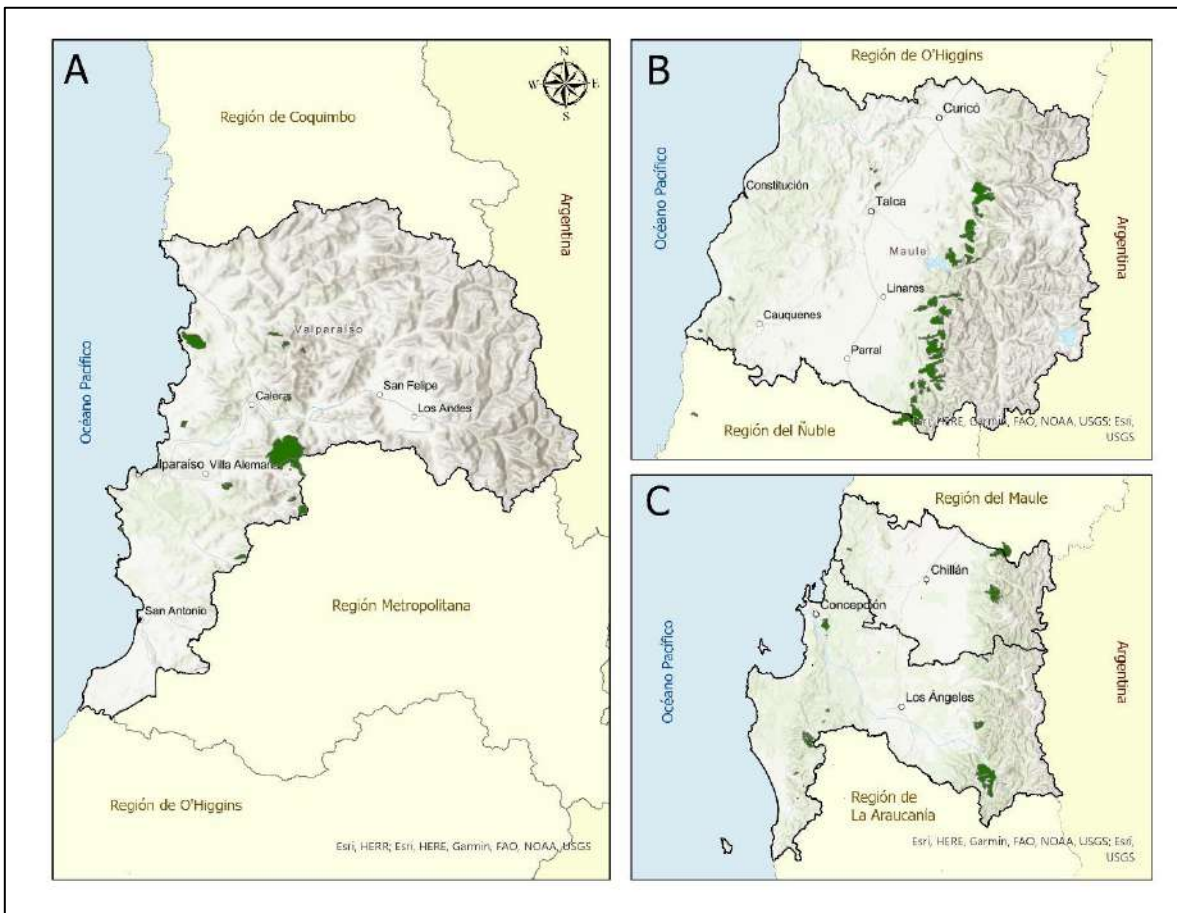


Figura 40: Áreas de análisis seleccionadas de acuerdo a los criterios explicados en color verde. En el cuadrante A, están las áreas seleccionadas para la Región de Valparaíso; en el cuadrante B, están las áreas seleccionadas para la Región del Maule y en el cuadrante C, están las áreas seleccionadas para las Regiones de Ñuble y Biobío.

Asimismo, se seleccionaron en segunda instancia, exclusivamente sectores con vegetación homogénea o pura, como el núcleo de un bosque o laderas con vegetación, omitiendo los suelos desnudos en la parte alta de las mismas. Este

procedimiento se realizó con las imágenes T1 y T2 para asegurar coherencia en el uso del suelo, evitando, por ejemplo, lugares reforestados luego de 1986.

En la etapa de procesamiento de las imágenes, se realizaron correcciones Radiométrica, Atmosférica y Topográfica, para luego cuantificar los sectores sin vegetación de las áreas analizadas, obteniendo el valor en hectáreas del cambio entre T1 y T2 para las Regiones de Valparaíso, Maule Ñuble y Biobío. Para detectar los sectores sin vegetación se calculó un NDVI o Índice de Vegetación Normalizada a las imágenes. Luego se calculó para cada imagen, en forma empírica, el valor del umbral entre el suelo desnudo y el suelo con clorofila.

Una vez calculado el NDVI y determinada la superficie de suelo desnudo, se realizó una estimación de la productividad de la vegetación nativa. Estudios realizados a nivel mundial por Galidaki, G; Zianis, D; Gitas, I; Rodoglou, K.; Karathanassi, V., Tsakiri-Strati, M., Woodhouse, I., y Mallinis, G. durante el año 2017 en todas las áreas de bosques mediterráneos del mundo, considerando el sur de Chile, Sudáfrica, España, Sur de Portugal, Norte de Africa, Italia, Francia, Grecia y Turquía, demuestran que existe una fuerte correlación entre el valor del NDVI de las formaciones vegetacionales y la producción de biomasa en [ton/ha] o bien [Mg/ha]. Los modelos de correlación estadística planteados por estos autores son de 2 tipos: a) modelos de regresión lineal y b) modelos de regresión exponencial. (Ecuación N° 2 y N°3)

Modelos de Regresión Lineal:

$$B \text{ [ton/ha]} = m \cdot [\text{NDVI}] + n \quad R^2 = 0.74 \quad \text{Ec. N° 2}$$

Modelos de Regresión Exponencial:

$$B \text{ [ton/ha]} = a \cdot e^{b[\text{NDVI}]} \quad R^2 = 0.70 \quad \text{Ec. N° 3}$$

Donde m, n, a y b son los coeficientes de regresión que explican la variación de la variable dependiente, en este caso la biomasa (B) de las formaciones

vegetacionales frente a la variación de la variable independiente, que es el valor del NDVI.

Por tanto, bajo esta premisa se determinó para aquellas formaciones de matorral esclerófilo la productividad medida en términos de biomasa anual generada por unidad de superficie en este caso 1 hectárea.

4.3 Análisis de Resultados

Utilizando el NDVI de cada imagen se determinó el umbral entre los píxeles con y sin clorofila, analizando la combinación falso color convencional, lo que permitió elaborar un ráster binario, donde los píxeles sin clorofila asumen el valor “1” y los que poseen clorofila el valor “0”, para T1 y para T2, en cada área de análisis. En la figura 41 se aprecia un ejemplo para una de ellas.

Rangos	Descripción
A – de 25% a 50%	Entre un 25% y 50% de mayor superficie de suelos desnudos, aparecen en las imágenes del 2019-20 comparado con la de 1986.
B – de 1% a 25%	Entre un 1% y 25% de mayor superficie de suelos desnudos, aparecen en las imágenes del 2019-20 comparado con la de 1986.
C – de -1% a 1%	Entre 1986 y 2019-20 no se aprecian cambios significativos en la presencia de suelos desnudos.
D – de -25% a -1%	Entre un 1% y 25% de menor superficie de suelos desnudos, aparecen en las imágenes del 2019-20 comparado con la de 1986.
E – de -50% a -25%	Entre un 25% y 50% de menor superficie de suelos desnudos, aparecen en las imágenes del 2019-20 comparado con la de 1986.

Tabla 13: Rangos porcentuales de los cambios en la detección de suelos desnudos sobre imágenes Landsat, entre los años 1986 y 2019-20 para las áreas de análisis. Fuente: Elaboración propia.

Los resultados por región se clasificaron en tres categorías para su mejor interpretación:

- i) Aumento: Se considera cuando se detecta un aumento en la superficie de suelos desnudos mayor al 1%, con respecto la superficie de las áreas

analizadas por región. En términos prácticos, sería la sumatoria de los rangos “A” y “B”.

- ii) **Mantención:** Se considera cuando se detectan cambios positivos o negativos, menores al 1%. Corresponde al rango “C”.
- iii) **Disminución:** se considera cuando las áreas de análisis presentan valores negativos en la detección de suelos desnudos de 2019-20 comparado con lo detectado en 1986. Corresponde a la sumatoria de los rangos “D” y “E”.

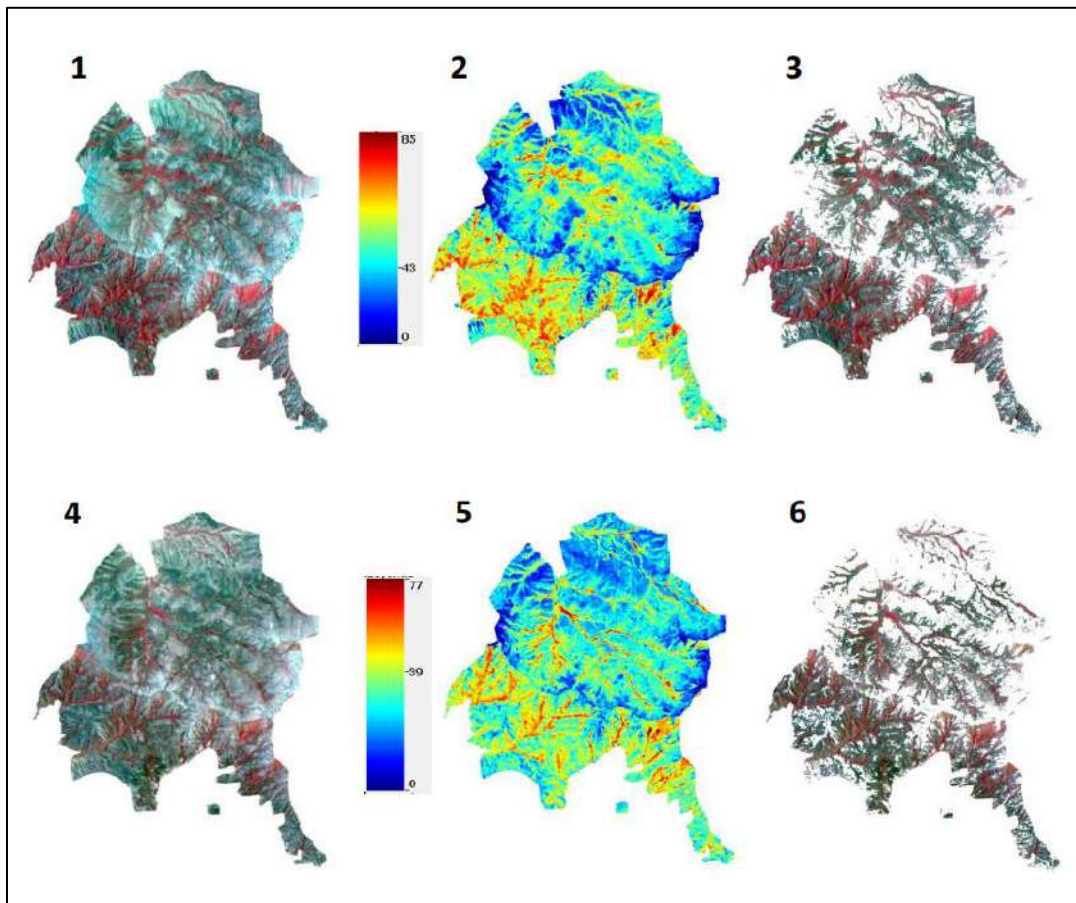


Figura 41: Cálculo de NDVI y elaboración de ráster binario con el umbral entre la presencia y ausencia de clorofila en un área de análisis, sobre las imágenes Landsat en T1 y T2. 1 corresponde a la Imagen Landsat del año 1986; 2 corresponde a cálculo de NDVI del año 1986; 3 corresponde a la Imagen enmascarada del año 1986; 4 corresponde a la Imagen Landsat del año 2019; 5 corresponde al cálculo de NDVI del año 2019 y, 6 corresponde a la Imagen enmascarada del año 2019. Fuente: Imágenes USGS. Elaboración propia.

En la Región de Valparaíso se aprecia una clara tendencia a la disminución del bosque nativo. Las áreas con signo positivo acumulan un 10,6% menos de bosque de un total de 17.468 ha analizadas, esto quiere decir que el suelo desnudo aumento

en este porcentaje. En los sectores donde el bosque nativo aumenta, 1.096 ha, el porcentaje es de un 0,45% representando 87,4 ha reales. En la categoría de mantención, en las áreas donde los cambios no son significativos, cuya superficie total es de 1,3 ha, los cambios, positivos o negativos no superaron el 0.006% (ver figura 42 y tabla 14). Si se analiza la cantidad de suelo desnudo v/s la superficie con recuperación de bosque nativo, los valores son disimiles, habiendo una diferencia de 10,15% de suelo desnudo por sobre terrenos donde el bosque nativo se recuperó, lo que es muy significativo para las superficies analizadas. Según el estudio realizado por Zepeda, R. (2013), titulado “Dinámica espacio-temporal del bosque nativo y matorral esclerófilo y la industria vitivinícola: Una aproximación para la conservación en el Valle de Leyda, Región de Valparaíso”, declara que entre los años 1996 y 2013, el bosque esclerófilo se había reducido un 2,68% en la comuna de Leyda, lo que se condice con los resultados obtenidos en este estudio.

Resulta importante mencionar que, a nivel mundial, este tipo de ecosistemas ha sido degradado históricamente a causa de la urbanización, la intensificación de la producción agrícola y la tala de bosques), siendo su tasa de conversión incluso más alta que la de bosques tropicales (Aguayo, 2009; Cox & Underwood, 2011, citado por Zepeda, R. 2013, incidiendo fuertemente en su conservación. A pesar de la importancia biológica de estas áreas, que albergan el 20% de las plantas vasculares en sólo el 2% de la superficie de la tierra, menos del 5% a nivel mundial se encuentra bajo alguna categoría de conservación (Klausmeyer, K. R., & Shaw, M. R. (2009); Cox, R. L., & Underwood, E. C. (2011).

Al comparar estos resultados con el análisis climatológico, se aprecia claramente que, en relación al promedio de las temperaturas máximas en primavera y verano, éstas podrían contribuir al deterioro en el bosque nativo producto de su aumento, cuyos valores se elevaron por sobre 3°C en gran parte de las áreas analizadas (ver figura 43 y 44).

Medición de los Suelos desnudos entre T1 y T2	Superficie analizada para T1 y T2	Superficie de la variación de los suelos desnudos entre T1 y T2	Variación porcentual de los suelos desnudos en relación al total de superficie
Aumento	17.468,6	2.056,0	10,6
Mantenición	847,7	1,3	-0,006
Disminución	1.096,9	87,4	-0,45
Total	19.413,2	2.143,0	11,056

Tabla 14: Resumen de los resultados de la detección de suelos desnudos entre 1986 y 2019-20 para las áreas de análisis para la Región de Valparaíso. Fuente: Elaboración propia.

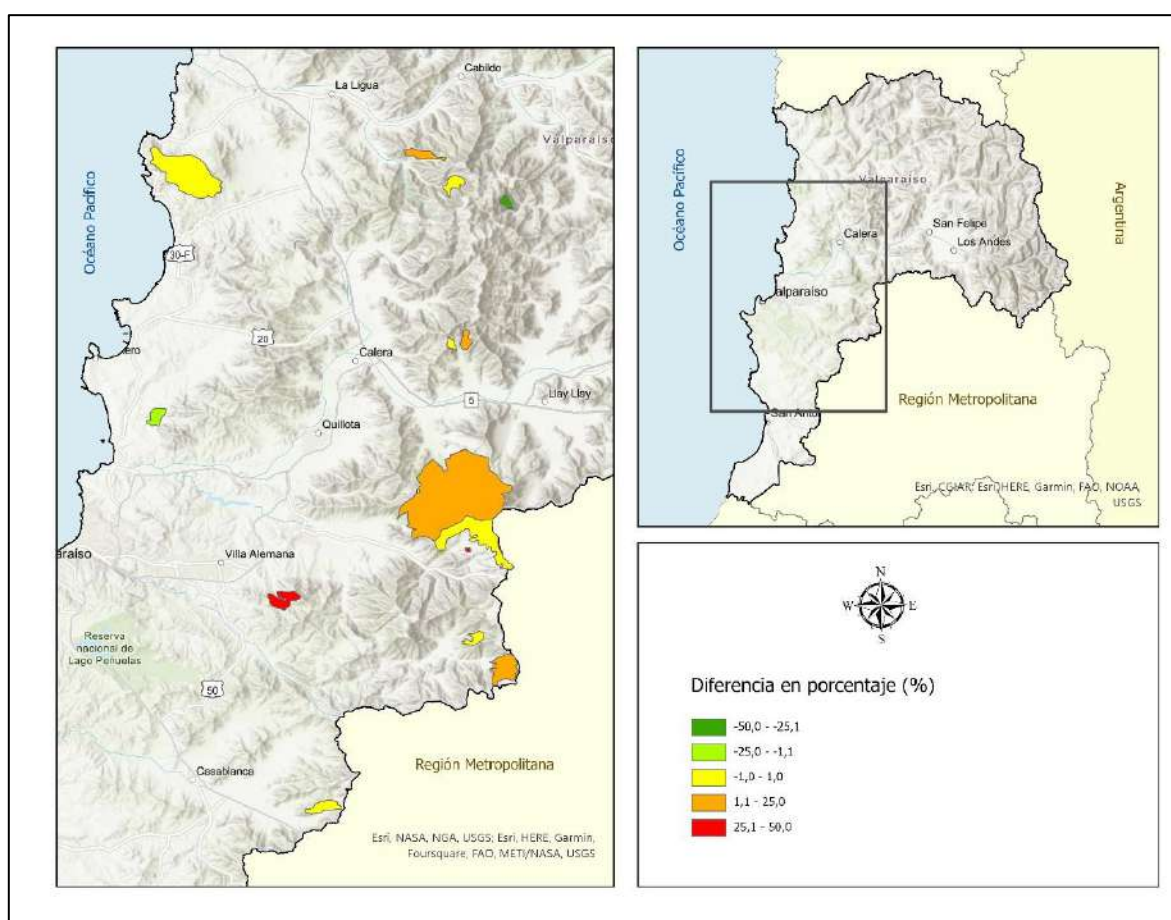


Figura 42: Porcentaje de cambios en la superficie de suelos desnudos registradas entre T1: 1986 y T2: 2019- 20, para las áreas de análisis de la Región de Valparaíso. Los valores positivos indican aumento de suelos desnudos en el período. Fuente: Elaboración propia.

En la estación de verano por su parte, las temperaturas máximas aumentaron en 2°C y las mínimas en 1°C, lo que pudo haber afectado el desarrollo de la vegetación.

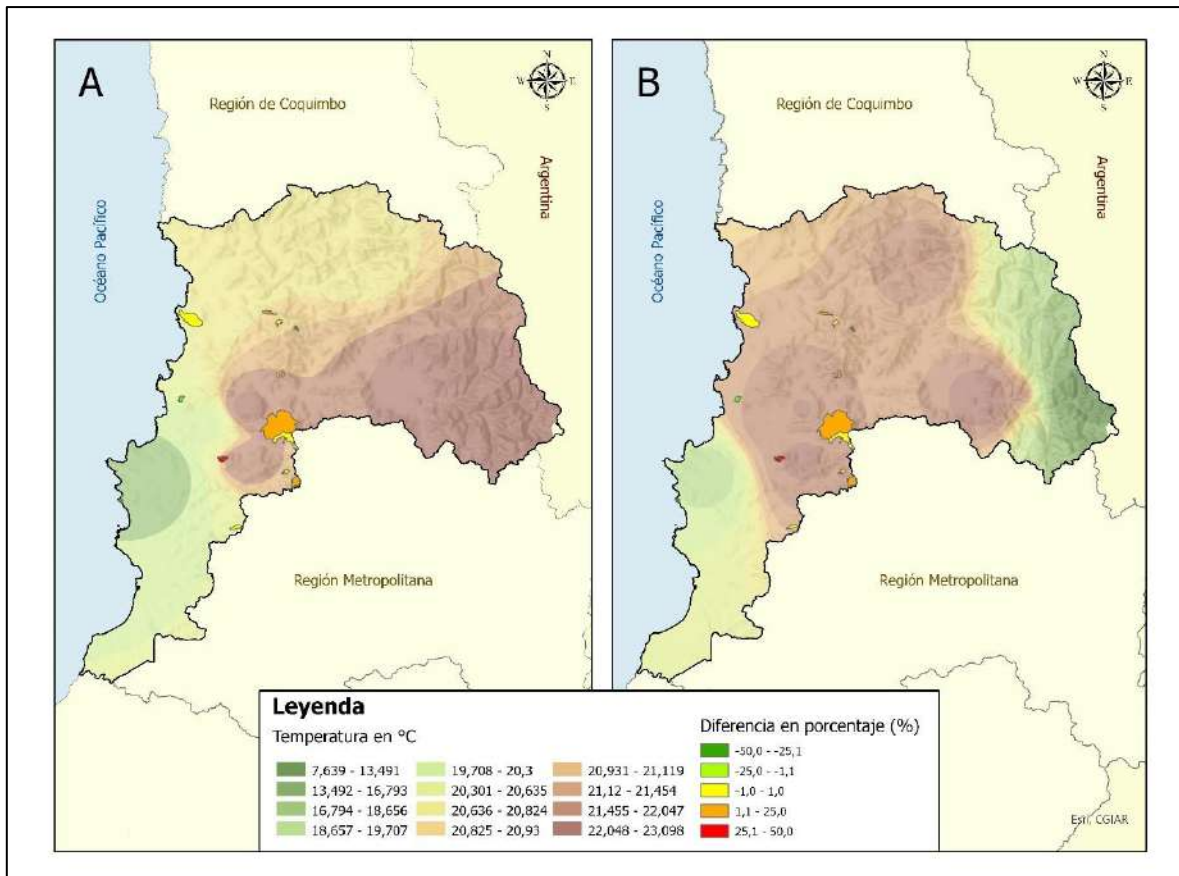


Figura 43: cambios en la biomasa de bosque nativo y cambio de temperaturas en la Región de Valparaíso. En el cuadrante A, se puede observar el promedio de la temperatura máxima para primavera entre los años 1985 al 1990. En el cuadrante B, se observa el promedio de temperaturas máximas para primavera entre los años 2011 al 2020. En ambos cuadrantes se superpuso las áreas de análisis y reducción del bosque nativo. Fuente: elaboración propia.

En el caso de las precipitaciones promedio acumuladas, como se describió en el capítulo III, la Región de Valparaíso experimentó una disminución de las precipitaciones que superaron los 200 mm en algunas estaciones, lo que implica una disminución en las reservas de agua dulce que alimentan los ríos y esteros en la época de primavera y verano. En este sentido, se puede observar que las áreas de bosque nativo analizadas, presentan una disminución que se condice con la falta de agua en el período seco del año (ver figura 45).

Fortes, J. A., Silva, J. L. A., & Mardones, D. Z. (2020) realizó un estudio del bosque esclerófilo en la zona de Colliguay, la que se ubica cercana a las áreas de análisis seleccionadas para el presente estudio, titulado “Análisis vegetacional del bosque

nativo en la región mediterránea de la zona central de Chile: zona de estudio valle de Colliguay”.

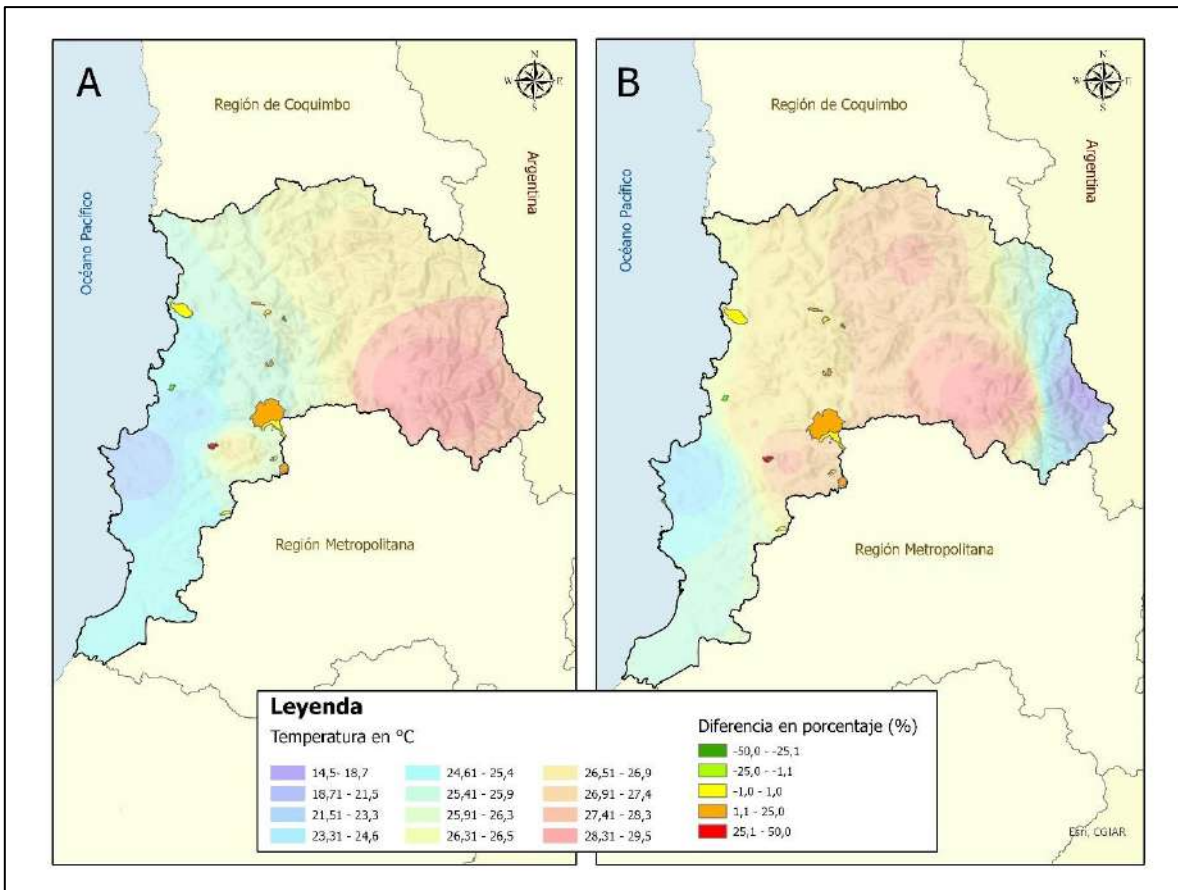


Figura 44: cambios en la biomasa de bosque nativo y cambio de temperaturas en la Región de Valparaíso. En el cuadrante A, se puede observar el promedio de la temperatura máxima para verano entre los años 1985 al 1990. En el cuadrante B, se observa el promedio de temperaturas máximas para verano entre los años 2011 al 2020. En ambos cuadrantes se superpuso las áreas de análisis y reducción del bosque nativo. Fuente: elaboración propia.

En dicho estudio, se analizó la composición del bosque nativo y su estructura, el cual se configura como una zona representativa de bosque nativo con un alto valor ecológico, debido a que tiene sitios considerados como uno de los 45 endemismos que existen en la zona mediterránea de Chile, pero con una alta sensibilidad ambiental a la desertificación (Fortes, J. A., Silva, J. L. A., & Mardones, D. Z., 2020).

Los resultados obtenidos por Fortes, J. A., Silva, J. L. A., & Mardones, D. Z. (2020) indican que “las condiciones bioclimáticas generan una retroalimentación positiva

que estimula las condiciones óptimas de crecimiento para la vegetación arbórea y arbustiva”.

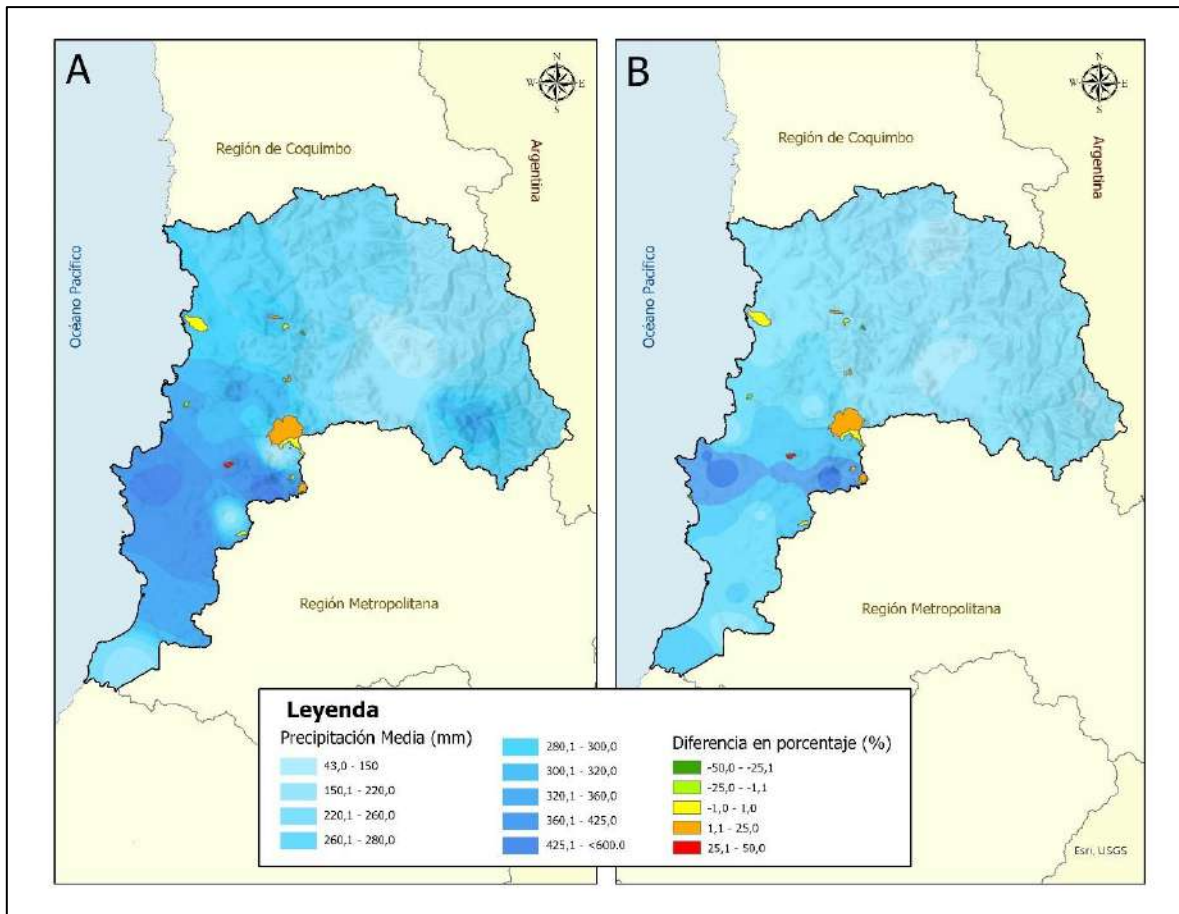


Figura 45: cambios en la biomasa de bosque nativo y precipitaciones en la Región de Valparaíso. En el cuadrante A, se puede observar la precipitación media acumulada entre los años 1985 al 1990. En el cuadrante B, se observa la precipitación media acumulada para los años 2011 al 2020. En ambos cuadrantes se superpuso las áreas de análisis y reducción del bosque nativo. Fuente: elaboración propia.

Pese a lo anterior, la sequía que afecta actualmente a Chile puede ser determinante en la longevidad de estos bosques. En este sentido, Benayas, R., José, M., & Scheiner, S. M. (2002) y Siles, G., Rey, P. J., Alcántara, J. M., Bastida, J. M., & Herreros, J. L. (2010)) plantean que, en las regiones semiáridas con climas de tipo mediterráneo, la disponibilidad de agua se considera el principal factor abiótico que limita la regeneración natural de los bosques nativos. Por ello, la disminución de la disponibilidad de agua en el suelo, producto de la sequía, implica un serio riesgo

para la perpetuación de estos bosques (Fortes, J. A., Silva, J. L. A., & Mardones, D. Z., 2020)

Esta conclusión podría explicar en parte, los resultados obtenidos en la presente investigación, los cuales indican que existe una pérdida importante de bosque nativo en las áreas analizadas de la Región de Valparaíso, producto del alza en las temperaturas máximas y disminución de las precipitaciones en un período superior a 30 años.

Año 1986			2020		Variaciones	
Polígono	Superficie	Valor NDVI	Superficie	Valor NDVI	Del NDVI [1986-2020]	Biomasa $B=7*Exp(4.3[NDVI])$
[N° Identificador]	[ha]	[NDVI*100]	[ha]	[NDVI*100]	[NDVI*100]	[ton/ha]
5	445.7	68	445.7	45	-23	-18.8
13	963.4	45	963.4	31	-14	-12.8
15	177.5	26	177.5	22	-4	-8.3
19	401.5	60	401.5	37	-23	-18.8
21	2078.6	55	2078.6	38	-17	-14.5
23	27.5	56	27.5	31	-25	-20.5
34	376.3	48	376.3	35	-13	-12.2
37	260.6	58	260.6	40	-18	-15.2
39	122.5	63	122.5	45	-18	-15.2
40	634.5	58	634.5	35	-23	-18.8
42	3237.9	58	3237.9	44	-14	-12.8
48	175.9	36	175.9	32	-4	-8.3
57	367.0	45	367.0	34	-11	-11.2
59	9862.6	49	9862.6	33	-16	-13.9
62	279.5	53	279.5	37	-16	-13.9
			0.0	Reducción NDVI medio	-15.9	-13.9

Tabla 15. Evolución de la superficie, NDVI y biomasa de formaciones vegetacionales nativas en la Región de Valparaíso. Fuente: elaboración propia.

Lo anterior se confirma con el análisis de 35 años de registros, donde se puede determinar que la biomasa ha disminuido en la Región de Valparaíso, prácticamente en todas las áreas seleccionadas y evaluadas, con una disminución media de 13.9 (ton/ha), confirmándose que la superficie no ha variado en 33 años (ver tabla 15).

A diferencia de la Región de Valparaíso, la Región del Maule presenta resultados opuestos. De acuerdo al análisis de las áreas seleccionadas, se evidencia una disminución del suelo desnudo, lo que se puede interpretar como una recuperación del bosque nativo.

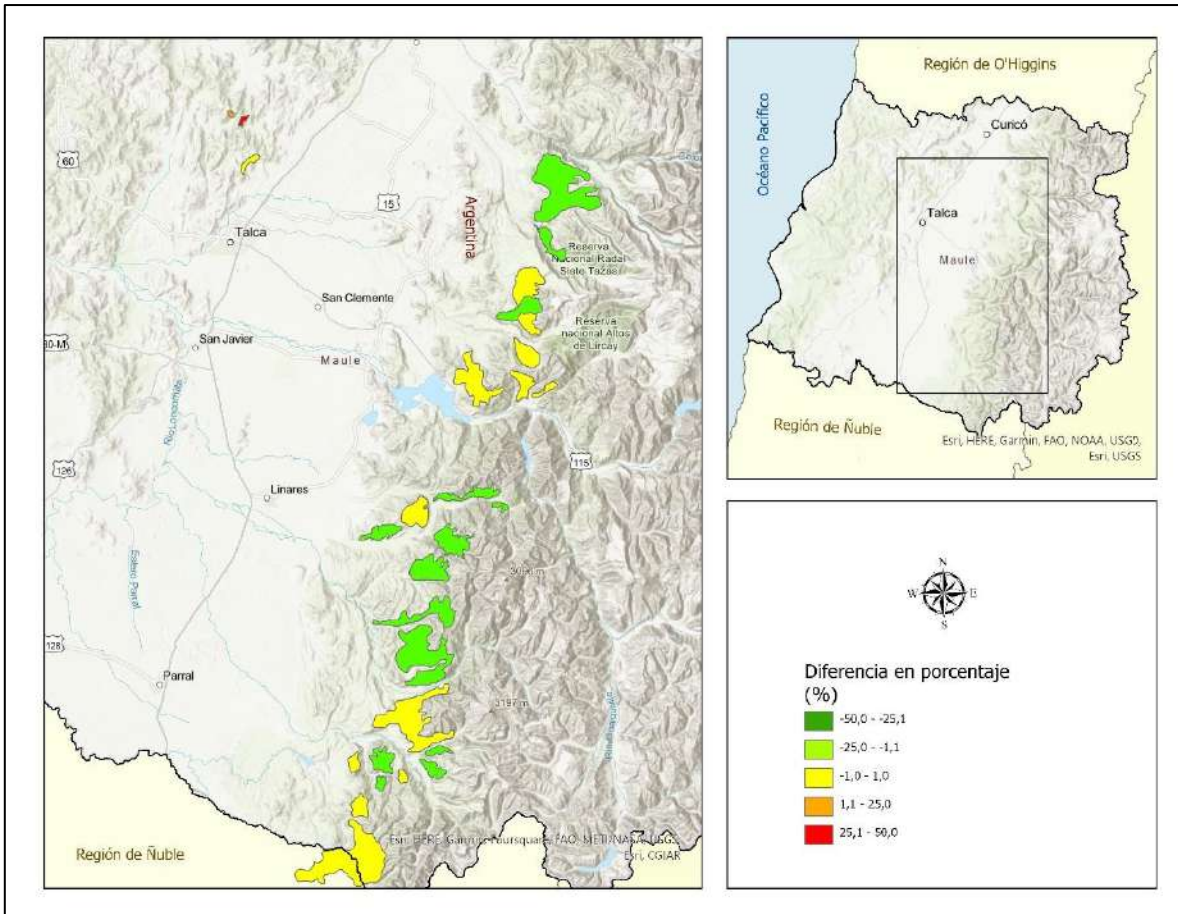


Figura 46: Porcentaje de cambios en la superficie de suelos desnudos registradas entre T1: 1986 y T2: 2019- 20, para las áreas de análisis de la Región del Maule. Los valores positivos indican aumento de suelos desnudos en el período. Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la figura n°46, la mayoría de las áreas seleccionadas presentan color verde (que representa la disminución del suelo desnudo) o amarillo (que representa un comportamiento neutro). Así, la superficie de suelo desnudo sólo aumento en un 0,15%, siendo el porcentaje de disminución del mismo un 3,75%. Esto quiere decir, que el bosque nativo recuperó más superficie de lo que avanzó el suelo desnudo (ver tabla 16).

Medición de los Suelos desnudos entre T1 y T2	Superficie analizada para T1 y T2	Superficie de la variación de los suelos desnudos entre T1 y T2	Variación porcentual de los suelos desnudos en relación al total de superficie
Aumento	522,1	78,8	-0,15
Mantenición	5.190,4	25,4	-0,5
Disminución	41.451,7	1892,8	3,75
Total	50.405,4	2017,4	11,056

Tabla 16: Resumen de los resultados de la detección de suelos desnudos entre 1986 y 2019-20 para las áreas de análisis para la Región del Maule. Fuente: Elaboración propia.

En el año 2003, Altamirano y Lara determinaron que la cobertura de bosque nativo en la precordillera del Maule, se redujo de 51.375 ha a 28.848 ha, lo cual correspondió a una reducción total de 44% en este período de 14 años. Así, la tasa anual de deforestación del bosque nativo calculada para este período alcanzó un 4,1% (1.613 ha/año).

Posteriormente, Frau et al (2009) realizaron un estudio de “Caracterización y monitoreo de paisaje semiárida en la Región del Maule mediante datos satelitales”, donde evaluaron los cambios en el uso de suelo por vegetación. En dicho estudio se puede apreciar que, entre los años 2004 y 2009, un gran porcentaje (78.5%) de la zona de estudio fue etiquetada en la categoría de “no cambio”, indicando que las cubiertas no registraron ganancias o pérdidas significativas en su cubierta vegetativa, seguido de un 16.9% y un 4.6% para las categorías de recuperación y degradación de la vegetación respectivamente. Los resultados de este trabajo, pese a que se realizó bastantes años atrás al presente estudio, resultan ser concordantes, lo que podría indicar una tendencia a la recuperación del bosque nativo en la Región del Maule.

Esta recuperación del bosque nativo en esta región, resulta importante dado que, para Martínez Castillo, V. (2016), la zona mediterránea del Maule posee características que la hacen especialmente interesante y única, por lo que, el bosque en esta región, se denomina “Bosque Maulino”, ya que sus particularidades la han transformado en una zona con características exclusivas, con carácter de “zona de transición” (entre la región mediterránea y la templada) y la presencia de

los Nothofagus, especialmente la de especies endémicas de este género a nivel regional.

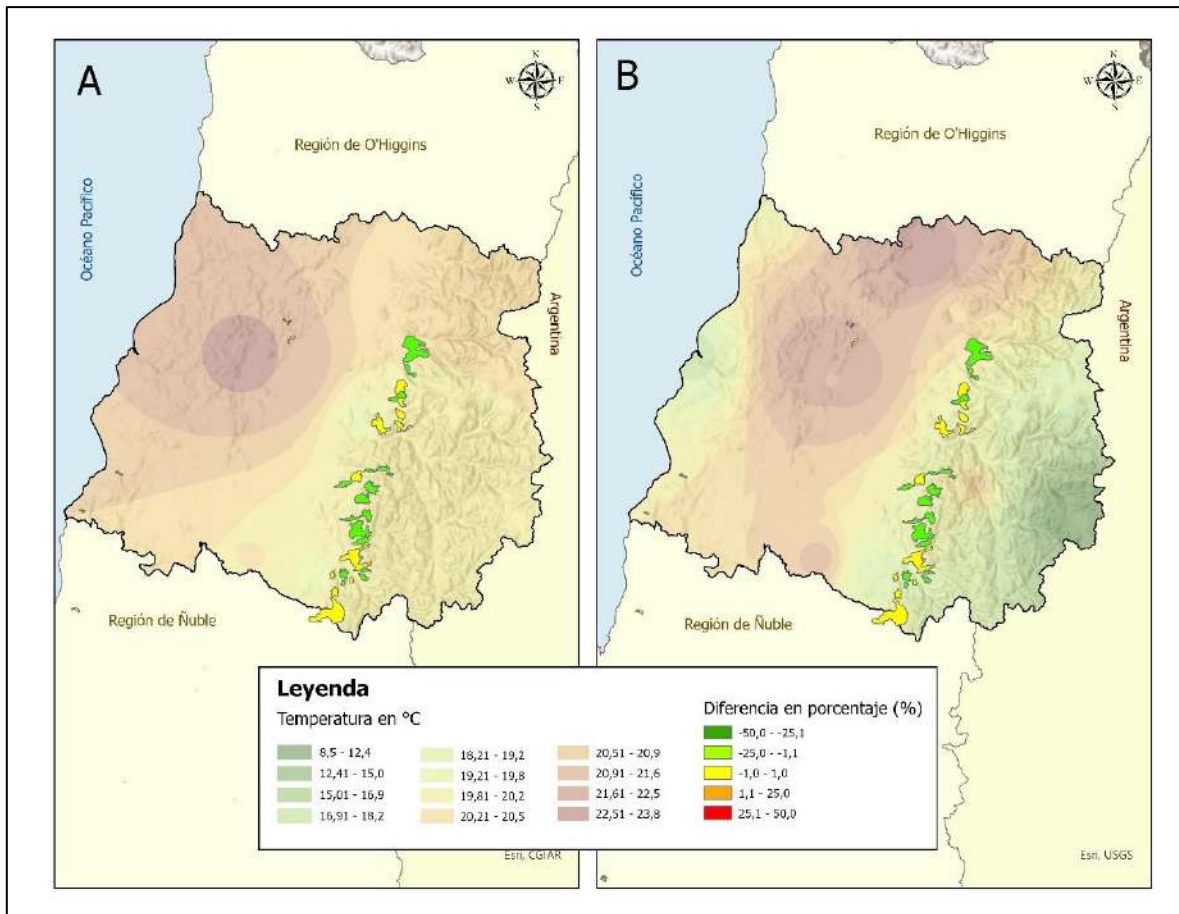


Figura 47: cambios en la biomasa de bosque nativo y cambio de temperaturas en la Región de Valparaíso. En el cuadrante A, se puede observar el promedio de la temperatura máxima para primavera entre los años 1985 al 1990. En el cuadrante B, se observa el promedio de temperaturas máximas para primavera entre los años 2011 al 2020. En ambos cuadrantes se superpuso las áreas de análisis y reducción del bosque nativo. Fuente: elaboración propia.

Ahora bien, si se analizan los resultados de las áreas seleccionadas con el análisis de variables climatológicas, se puede ver que el cambio climático no genera un mayor impacto en la recuperación del bosque nativo, lo cual resulta sorprendente.

En el caso de la estación de primavera, las temperaturas máximas no experimentan grandes variaciones en sus valores, y la distribución geoespacial de las mismas se mantiene en el tiempo. La estación meteorológica que mayor variación tuvo, registró un aumento de 0,9°C (ver figura 47).

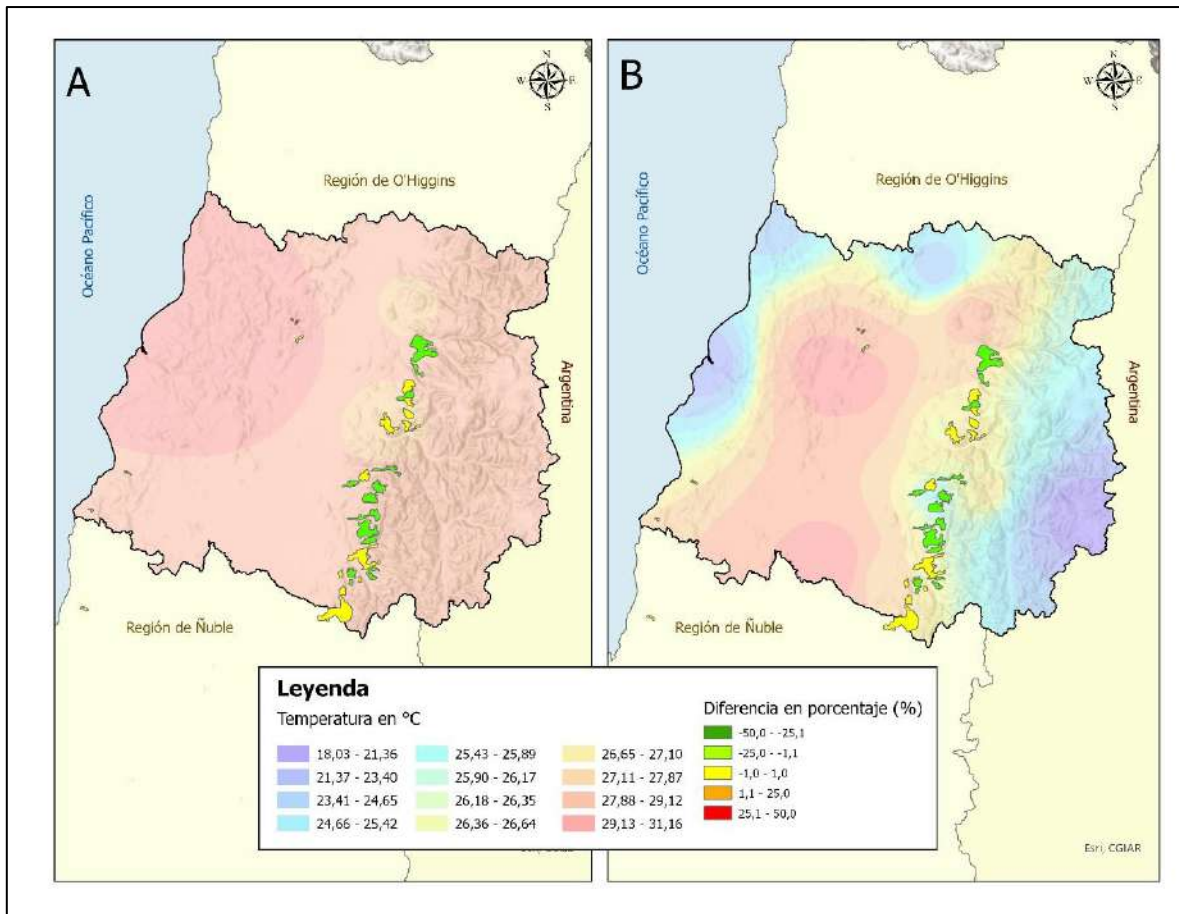


Figura 48: cambios en la biomasa de bosque nativo y cambio de temperaturas en la Región de Valparaíso. En el cuadrante A, se puede observar el promedio de la temperatura máxima para verano entre los años 1985 al 1990. En el cuadrante B, se observa el promedio de temperaturas máximas para verano entre los años 2011 al 2020. En ambos cuadrantes se superpuso las áreas de análisis y reducción del bosque nativo. Fuente: elaboración propia.

En la estación de verano en cambio, se produce un enfriamiento en la zona costera, zona central del valle y en los faldeos de la Cordillera de Los Andes, donde se produjo una disminución de 2,1°C en el promedio de temperaturas máximas en verano (ver figura 48), siendo esta zona donde se ubican las áreas seleccionadas de vegetación analizadas en esta región, y es justamente, donde se observa la recuperación del bosque nativo, con un retroceso del suelo desnudo.

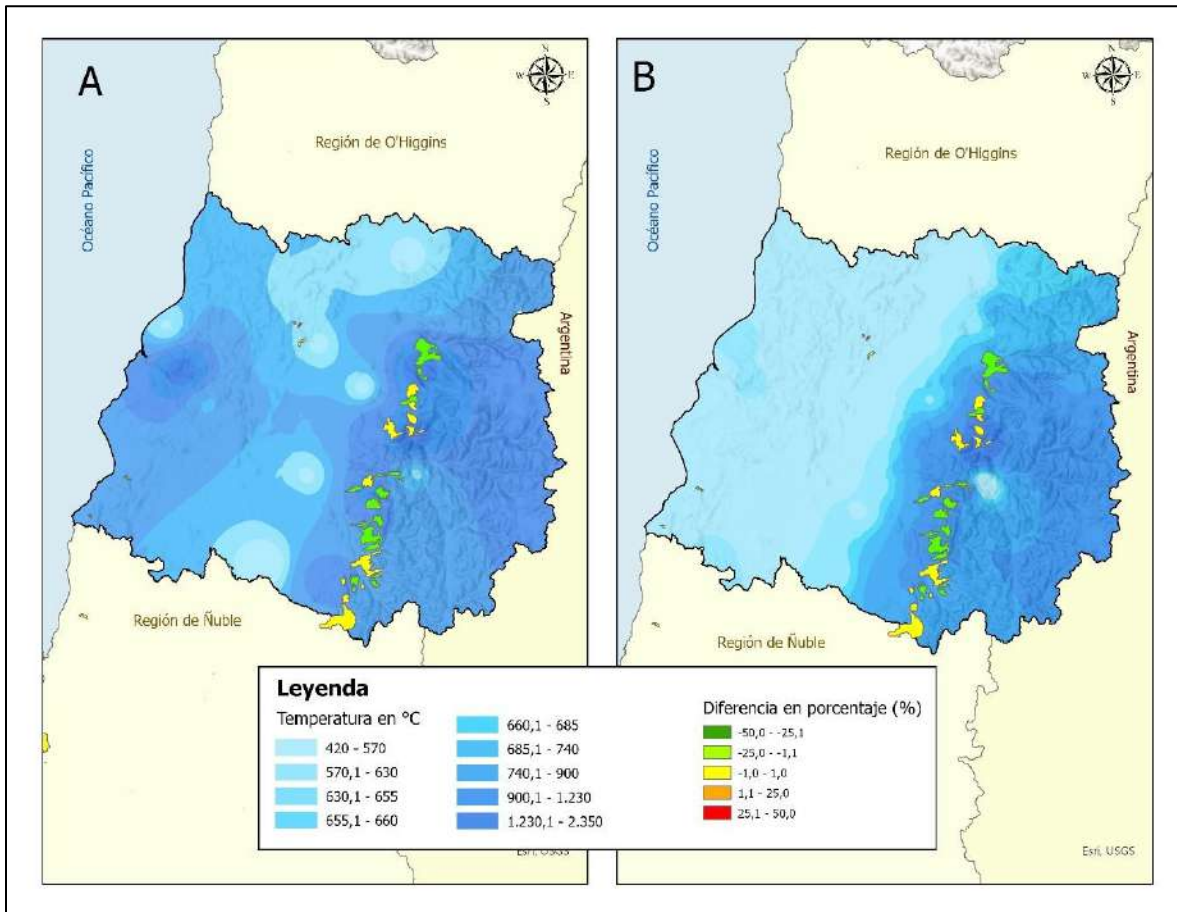


Figura 49: cambios en la biomasa de bosque nativo y precipitaciones en la Región del Maule. En el cuadrante A, se puede observar la precipitación media acumulada entre los años 1985 al 1990. En el cuadrante B, se observa la precipitación media acumulada para los años 2011 al 2020. En ambos cuadrantes se superpuso las áreas de análisis y reducción del bosque nativo. Fuente: elaboración propia.

En términos de las precipitaciones, si bien la Región del Maule es la que presenta una mayor disminución de agua caída que alcanzó los 600 mm en algunas estaciones pluviométricas. Este déficit de agua se encuentra, principalmente, en la zona costera y valle central, manteniendo sus registros en la zona pre y cordillerana de Los Andes, donde se ubican la mayor parte de las áreas seleccionadas para el análisis vegetacional.

Año 1986			2020				
Polígono	Superficie	Valor NDVI	Superficie	Valor NDVI	Variación superficie	Variación del NDVI [1986-2020]	Biomasa $B=7*Exp(4.3[NDVI])$
[N° Identificador]	[ha]	[NDVI*100]	[ha]	[NDVI*100]	[ha]	[NDVI*100]	[ton/ha]
1	3238.7	76	3242.3	84	+3.6	+8	9.9
3	1059.2	71	1059.4	80	+0.2	+9	10.3
4	970.2	79	968.5	82	-1.7	+3	8.0
6	1396.3	71	1395.4	79	-0.9	+8	9.9
11	1116.6	75	1117.3	83	+1	+8	9.9
16	7.8	64	7.7	63	-0.1	-1	-7.3
18	391.8	58	392.1	61	+0.3	+3	8.0
20	1425.5	76	1427.0	84	+1.5	+8	9.9
25	967.1	77	966.8	85	-0.3	+8	9.9
26	1698.7	76	1699.1	85	-6.6	+9	10.3
28	514.4	77	515.0	82	+0.6	+5	8.7
30	390.3	77	391.5	82	+1.2	+5	8.7
31	336.3	79	335.7	83	-0.6	+4	8.3
32	6012.1	75	6014.3	80	+2.2	+5	8.7
33	246.2	74	245.6	75	-0.6	+1	7.3
35	145.4	76	145.6	0	+0.2	-76	-183.8
36	2183.9	73	2184.2	0	+0.3	-73	-161.5
38	2.7	51	2.6	80	-0.1	+29	24.4
41	486.8	74	486.9	69	+0.1	-5	-8.7
43	6338.6	75	6340.6	80	+2	+5	8.7
45	2401.8	76	2399.2	80	-2.6	+4	8.3
46	2604.2	74	2606.0	85	+1.8	+11	11.2
47	8402.6	77	8400.5	79	-2.1	+2	7.6
49	1863.6	75	1863.6	80	0.0	+5	8.7
50	1203.8	71	1202.7	83	-1.1	+12	11.7
54	2445.2	75	2446.1	78	+0.9	+3	8.0
55	165.2	74	164.6	80	-0.6	+6	9.1
56	1313.2	77	1314.5	70	+1.3	-7	-9.5
58	429.8	77	429.6	83	-0.2	+6	9.1
60	103.7	72	103.9	84	+0.2	+12	11.7
61	7803.0	73	7806.4	71	+3.4	-2	-7.6
63	294.5	73	294.5	84	0.0	+11	11.2
66	834.1	75	834.4	81	+0.3	+6	9.1
				Reducción NDVI medio	+5.5	-22	18.0

Tabla 17. Evolución de la superficie, NDVI y biomasa de formaciones vegetacionales nativas en la Región del Maule. Fuente: elaboración propia.

El único polígono que registró un aumento importante de suelo desnudo, se ubica en la zona central de la región, donde las precipitaciones sufrieron una importante disminución en sus registros (ver figura 49).

Dado lo anterior, se puede concluir que la Región del Maule no experimente un aumento del suelo desnudo, lo que se traduce en la recuperación del bosque nativo, por lo que el cambio climático aún no afecta de manera directa a vegetación en las áreas seleccionadas, donde se logró determinar un incremento neto de 5.5 ha, mientras que el NDVI y la biomasa presentan incrementos moderados cuyo valor medio es cercano a 9.8 (ton/ha) y sólo 6 sitios reducen su NDVI y biomasa asociada con un balance de 18 (ton/ha) para la región (ver tabla 17).

Con esto, se puede evidenciar que, el aumento de la temperatura no es un factor fundamental en el desarrollo de la vegetación, por el contrario, la disponibilidad de agua resulta vital, lo que queda verificado con el análisis de los resultados en esta región, ya que, a diferencia de la Región de Valparaíso, la disminución importante de precipitaciones se produce en la zona donde no se encuentra bosque nativo sin intervenir. A su vez, las zonas donde sí está el bosque nativo sin intervenir, aún mantienen las condiciones pluviométricas necesarias para su desarrollo e incluso, recuperación del mismo.

En el caso de la Región de Ñuble, sólo se pudieron determinar tres áreas seleccionadas que cumplieran con el perfil descrito en materiales y métodos de este capítulo, observando que, aquellos ubicados en la precordillera de Los Andes, presentan aumento de superficie de suelo desnudo, lo que se traduce en una disminución del bosque nativo (ver figura 50). Así, como se muestra en la tabla 18, el suelo desnudo aumentó en un 21,4%, disminuyendo sólo en un 0,97%, por lo que se evidencia que el bosque nativo no tuvo una recuperación en esta región.

La Región del Biobío por su parte, no muestra grandes diferencias en el aumento de suelo desnudo, alcanzando sólo un 1,84% y una disminución del mismo de un 1,7%, por lo que no se aprecia ni pérdida ni una recuperación importante del bosque nativo (ver tabla 19 y figura 51).

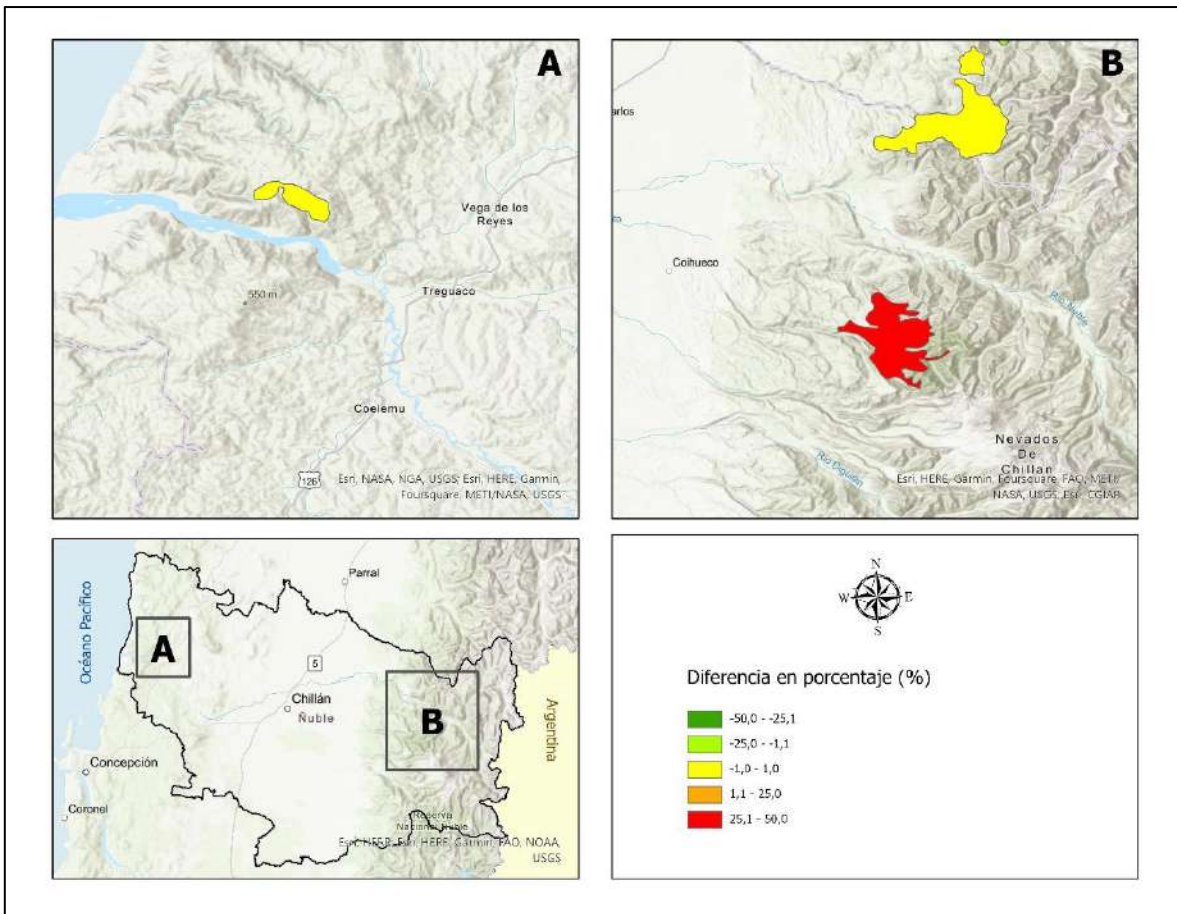


Figura 50: Porcentaje de cambios en la superficie de suelos desnudos registradas entre T1: 1986 y T2: 2019- 20, para las áreas de análisis de la Región de Ñuble. Los valores positivos indican aumento de suelos desnudos en el período. Fuente: Elaboración propia.

Medición de los Suelos desnudos entre T1 y T2	Superficie analizada para T1 y T2	Superficie de la variación de los suelos desnudos entre T1 y T2	Variación porcentual de los suelos desnudos en relación al total de superficie
Aumento	7520,5	3480,4	21,4
Mantenición	343,7	5,4	0,033
Disminución	8403,1	158,5	-0,97
Total	16267,3	3327,3	20,4

Tabla 18: Resumen de los resultados de la detección de suelos desnudos entre 1986 y 2019-20 para las áreas de análisis para la Región del Ñuble. Fuente: Elaboración propia.

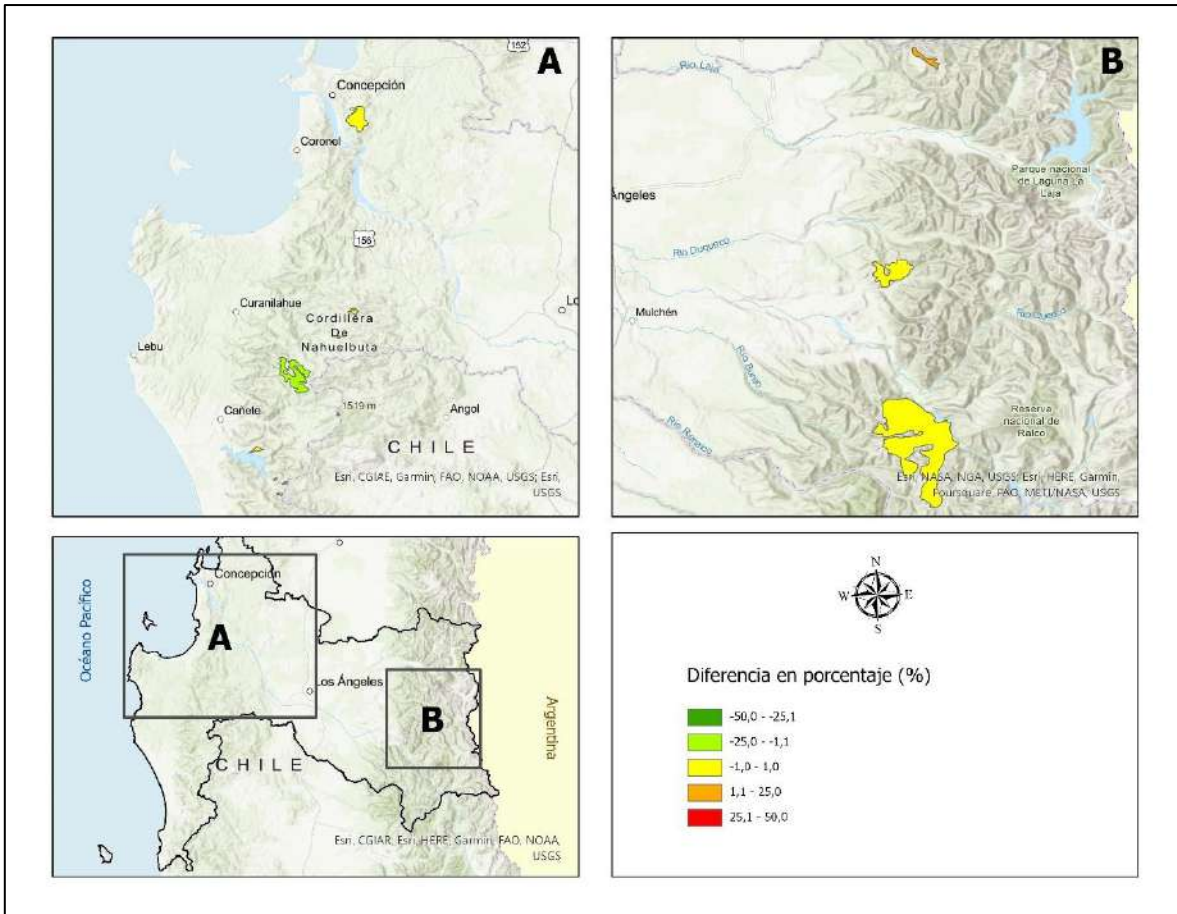


Figura 51: Porcentaje de cambios en la superficie de suelos desnudos registradas entre T1: 1986 y T2: 2019- 20, para las áreas de análisis de la Región del Biobío. Los valores positivos indican aumento de suelos desnudos en el período. Fuente: Elaboración propia.

Medición de los Suelos desnudos entre T1 y T2	Superficie analizada para T1 y T2	Superficie de la variación de los suelos desnudos entre T1 y T2	Variación porcentual de los suelos desnudos en relación al total de superficie
Aumento	18.986,2	545,7	1,84
Mantención	2.694,5	3,2	0,011
Disminución	7.901,0	524,3	-1,77
Total	29.581,6	1.073,2	0,081

Tabla 19: Resumen de los resultados de la detección de suelos desnudos entre 1986 y 2019-20 para las áreas de análisis para la Región del Biobío. Fuente: Elaboración propia.

En términos climatológicos, las regiones del Ñuble y Biobío se presentan estable en sus temperaturas máximas en primavera, experimentando pequeñas alzas que van desde 0,1°C a 0,4°C. En la Región del Ñuble solo una estación registró un aumento de 0,9°C. En la Región del Biobío, por su parte, se registró una disminución en los valores de temperatura máxima en primavera de 1,5°C (ver figura 52).

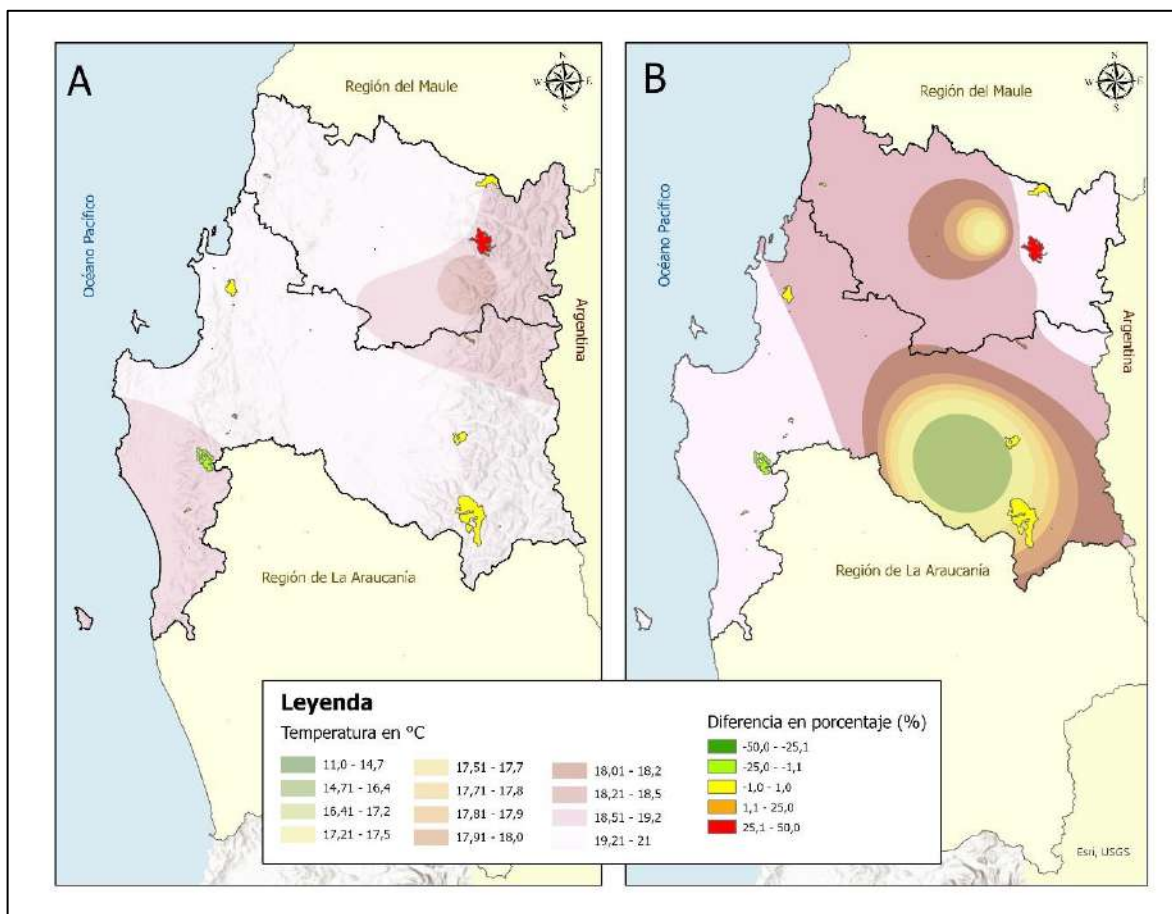


Figura 52: cambios en la biomasa de bosque nativo y cambio de temperaturas en las regiones de Ñuble y Biobío. En el cuadrante A, se puede observar el promedio de la temperatura máxima para primavera entre los años 1985 al 1990. En el cuadrante B, se observa el promedio de temperaturas máximas para primavera entre los años 2011 al 2020. En ambos cuadrantes se superpuso las áreas de análisis y reducción del bosque nativo. Fuente: elaboración propia.

En la estación de verano ocurre algo similar presentándose temperaturas estables en las máximas de verano durante todo el período de tiempo analizado, con variaciones menores que van entre 0,1°C a 0,4°C, en verano. Incluso, en la zona precordillerana se observa una disminución de 0,4°C, evidenciando un pequeño enfriamiento (ver figura 53).

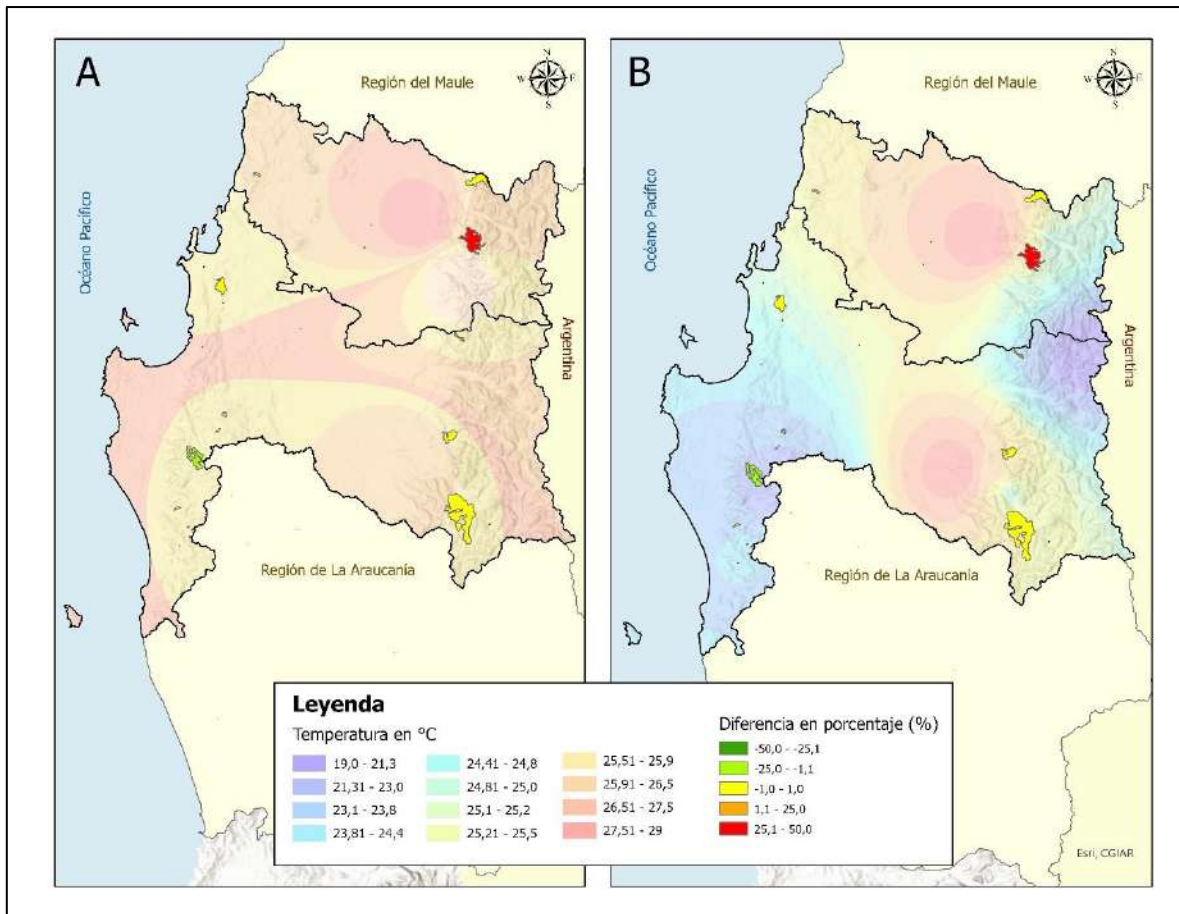


Figura 53: cambios en la biomasa de bosque nativo y cambio de temperaturas en las regiones de Ñuble y Biobío. En el cuadrante A, se puede observar el promedio de la temperatura máxima para verano entre los años 1985 al 1990. En el cuadrante B, se observa el promedio de temperaturas máximas para verano entre los años 2011 al 2020. En ambos cuadrantes se superpuso las áreas de análisis y reducción del bosque nativo. Fuente: elaboración propia.

En este sentido, se podría indicar que la variación de temperatura, nuevamente confirma que no es crucial en el desarrollo de biomasa de bosque nativo, dado que, en la Región del Ñuble, se presenta un aumento de suelo desnudo, mientras que, en la Región del Biobío, los resultados de investigación arrojan una recuperación del bosque nativo. De acuerdo a la Seremía del Ministerio de Medio Ambiente, en su Política Pública Regional para la conservación de la Biodiversidad de la Región del Biobío 2022-2035 “la Región del Biobío se encuentra en uno de los 34 *hotspots* de biodiversidad con prioridad de conservación en el mundo debido a la riqueza de especies y endemismo.

Además, se inserta en una zona de transición biogeográfica (ecotono) entre el bosque esclerófilo de la zona central (bosque y matorral mediterráneo) y del bosque templado valdiviano” y elevado nivel de amenaza, e cual presenta altas tasas de pérdida de hábitat y otros impactos producidos por la actividad antrópica (Reyes, R., Razeto Migliaro, J., Barreau, A., & Müller-Using, S., 2020), por lo que, es importante determinar si el cambio climático es causante o no del deterioro del bosque nativo. En este caso, los resultados de investigación establecen que la temperatura no ha variado de manera importante, y como se mencionó con anterioridad, la vegetación nativa no vario de manera trascendental en las áreas seleccionadas analizadas.

En términos de precipitaciones, tal como se explicó en el capítulo III de esta investigación, las regiones de Ñuble y Biobío presentaron una reducción del agua caída que alcanza los 250 mm, es decir, en el último decenio la precipitación media acumulada, entre mayo y septiembre, se redujo en 250 mm. Esta disminución debió afectar de manera importante a la recuperación del bosque nativos en las áreas seleccionadas analizadas. Sin embargo, como se puede observar en la figura 54, sólo un área de la Región de Ñuble sufrió un aumento importante de suelo desnudo. La Región del Biobío, por el contrario, presenta un comportamiento neutro en todo el período de tiempo analizado. Lo anterior no es menor, si se considera que, en la región, sólo un 39% de su superficie se encuentra cubierta por bosque nativo (Baron Zagal, M. Y., 2022), la mayor parte de la superficie está cubierta por plantaciones forestales de monocultivo.

Ahora, si se considera que la cantidad de agua utilizada por las especies forestales está fuertemente influenciada por el clima en el que estas se encuentran y que la evidencia internacional indica que los árboles utilizan más agua cuando el recurso se encuentra disponible en mayores cantidades (Pizarro et al, 2019), en este caso, no aplicaría, dado que no se ve una relación directa entre la disminución de bosque nativo y variación de precipitaciones en la Región de Ñuble. Esta falta de relación, podría indicar que existen otros factores que estarían afectando el desarrollo del bosque nativo, como pueden ser las erupciones volcánicas que presenta la zona

analizada, alejando al cambio climático como responsable de este comportamiento vegetal.

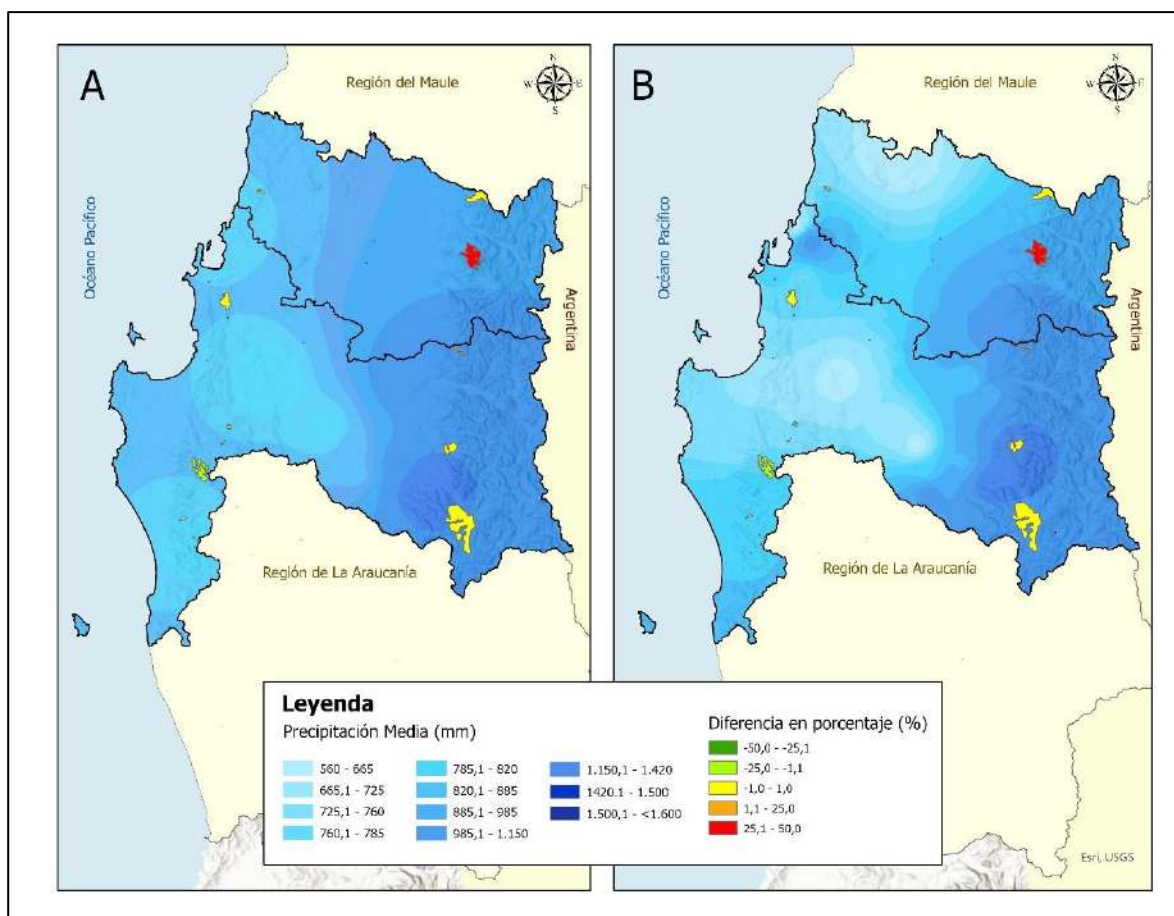


Figura 54: cambios en la biomasa de bosque nativo y precipitaciones en la Región del Biobío. En el cuadrante A, se puede observar la precipitación media acumulada entre los años 1985 al 1990. En el cuadrante B, se observa la precipitación media acumulada para los años 2011 al 2020. En ambos cuadrantes se superpuso las áreas de análisis y reducción del bosque nativo. Fuente: elaboración propia.

Confirmando lo anterior, la productividad de biomasa en la Región de Ñuble alcanzó un incremento de apenas 2.1 ha y un incremento de 2.1 puntos en el NDVI, correspondiente a 7.8 (ton/ha) de biomasa en pie (ver tabla n°20), mientras que la Región del Biobío presenta un incremento de 0.13 há, con un incremento de 7.2 puntos en el NDVI correspondiente a una biomasa media de 9.8 (ton/ha) (ver tabla 21).

Año 1986			2020				
Polígono	Superficie	Valor NDVI	Superficie	Valor NDVI	Variación superficie	Variación del NDVI [1986-2020]	Biomasa $B=7*Exp(4.3 [NDVI])$
[N° Identificador]	[ha]	[NDVI*100]	[ha]	[NDVI*100]	[ha]	[NDVI*100]	[ton/ha]
2	7.520	77	7524.1	77	+4.1	0.0	7.0
7	343.5	80	343.5	85	0.0	+5	8.7

Tabla 20. Evolución de la superficie, NDVI y biomasa de formaciones vegetacionales nativas en la Región de Ñuble. Fuente: elaboración propia.

Año 1986			2019				
Polígono	Superficie	Valor NDVI	Superficie	Valor NDVI	Variación superficie	Variación del NDVI [1986-2019]	Biomasa $B=7*Exp(4.3[NDVI])$
[N° Identificador]	[ha]	[NDVI*100]	[ha]	[NDVI*100]	[ha]	[NDVI*100]	[ton/ha]
9	69.8	79	69.8	83	0.0	+4	8.3
10	43.7	78	43.7	81	0.0	+3	8.0
12	279.0	82	279.1	85	0.0	+3	8.0
17	608.8	70	608.8	80	0.0	+10	10.8
22	17543.6	62	17543.6	83	0.0	+21	17.3
24	44.2	79	44.2	85	0.0	+6	9.1
27	4872.9	78	4873.1	85	+0.2	+7	9.5
29	2900.8	79	2900.8	85	0.0	+6	9.1
44	330.1	81	330.2	85	+0.1	+4	8.3
51	18.3	81	18.3	86	0.0	+5	8.7
52	2694.7	73	2694.7	87	0.0	+14	12.8
64	88.9	78	88.9	83	0.0	+5	8.7

Tabla 21. Evolución de la superficie, NDVI y biomasa de formaciones vegetacionales nativas en la Región del Biobío. Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

Las pruebas científicas indican que la influencia humana en el clima es inequívoca, con impactos que se dejan sentir en todos los continentes y océanos. Con diferentes efectos sobre los ecosistemas, la salud humana y el bienestar, como indican el último informe de la Organización Mundial de la Salud (<https://www.paho.org/es/temas/cambio-climatico-salud>) y el informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático 2021 (IPCC) de las Naciones Unidas, que también destaca que el calentamiento que hemos experimentado hasta la fecha ha generado cambios irreversibles en muchos sistemas de soporte planetario (Ministerio de Medio Ambiente, 2021).

Por otro lado, el "Informe Lancet Countdown 2020 sobre Salud y Cambio Climático" analiza 43 indicadores, destacando la necesidad de actuar, implementando medidas que implican recursos adicionales. Sin embargo, también es importante destacar que es vital priorizar la asignación de recursos y, para ello, datos como los recogidos a lo largo de este trabajo son esenciales para determinar si los efectos del cambio climático se manifiestan de la misma manera para todo un territorio o si existen variaciones territoriales. Esto es de suma urgencia para el caso de Chile, ya que se encuentra en el décimo lugar del ranking de los más afectados por el cambio climático en todo el planeta según el Global Climate Risk Report 2017 elaborado por la organización de medio ambiente y desarrollo (Germanwatch, Alemania) (Eckstein et al, 2019), siendo entonces en este contexto de gran importancia los hallazgos obtenidos en esta investigación.

En primer lugar, Chile central y centro – sur se encuentra en una transición entre condiciones oceánicas frías y condiciones continentales más cálidas y húmedas (Garreaud, 2011) que le otorgan las características de un clima mediterráneo. Sin embargo, el clima de esta zona ha sufrido cambios significativos. En la década de 1980, las predicciones auguraban un aumento de la temperatura promedio de 3°C a 4°C en la zona central y centro sur (Fuenzalida et al., 1989), sin embargo, los

resultados de esta investigación indicaron que la elevación de las temperaturas no alcanzó dicha predicción. Así, la Región de Valparaíso fue la única que ha experimentado una tendencia al aumento sostenido de las temperaturas máximas durante todo el año con valores que sobrepasan 1°C, alcanzando un aumento promedio de 1,4°C en otoño. La Región del Maule en cambio, registró aumentos de temperaturas en todo el año, pero no sobrepasaron los 0,5°C. Las regiones de Ñuble y Biobío en cambio, muestran una tendencia a la disminución de las temperaturas máximas, en particular, en las estaciones de invierno y primavera, alcanzando una baja de 0,9°C y 1,9°C respectivamente. Estos resultados distan de las predicciones realizadas por el Ministerio de Medio Ambiente de Chile, en su Atlas de Riesgo Climático (<https://arclim.mma.gob.cl/>), donde se estima un alza promedio de 2,0°C para toda el área de estudio analizada.

Por su parte, en relación al promedio de variación de las temperaturas mínimas, la Región de Valparaíso presenta una disminución en todas las estaciones del año, siendo más marcada en la estación de invierno. En la Región del Maule las estaciones de verano y otoño muestran un alza en los valores de temperaturas mínimas, mientras que en las estaciones de invierno y primavera registraron una baja de las mismas, tanto las alzas como las bajas no suelen sobrepasar los 0,4°C por lo que se puede definir que las temperaturas se mantuvieron más menos estables. La Región de Ñuble las disminuciones de las temperaturas mínimas llegan a 1,6°C.

La región del Biobío fue la única que registró un aumento de las temperaturas mínimas en todas las estaciones del año, llegando a superar un aumento de 1,4°C. Estos resultados concluyen que, si bien existe una variación en las temperaturas, esta no se comporta de la misma manera en todas las regiones analizadas, comportamiento que se podría extrapolar a todo el país. Lo anterior se debe a que existen particularidades geográficas que la diferencian, por lo que realizar pronósticos a nivel nacional puede llevar a errores para la toma de decisiones, más aún en la actualidad, donde la Ley N°21.455 Ley Marco de Cambio Climático, exige la elaboración comunal de Planes de Adaptación al Cambio Climático.

En el caso de la precipitación, los modelos climáticos también hablan de una disminución significativa de la cantidad de agua caída, lo que también pudo ser observado en este estudio, donde se pudo observar que la Región del Maule fue la que tuvo una mayor disminución en sus precipitaciones medias acumuladas, con estaciones que superaron la disminución de más de 600 mm, seguida por las regiones de Ñuble y Biobío, donde las estaciones pluviométricas alcanzaron pérdidas cercanas a los 250 mm. Por último, la Región de Valparaíso tuvo estaciones pluviométricas con pérdidas de poco más de 200 mm en el periodo de tiempo analizado. En el caso de la región del Biobío, se encuentra definida como una zona de amenaza hidrometeorológica con el 38,5% de los eventos presentados en el país entre 1983 y 2013, de los cuales el 61% de los eventos fueron sistemas frontales (Henríquez, Aspee y Quense, 2016).

Estas variaciones climáticas y cambios en los valores de temperatura y precipitación deberían afectar significativamente la disponibilidad de condiciones ideales para el desarrollo del bosque nativo en esta zona. Según el Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2), dadas las predicciones climáticas para Chile, en la zona centro-sur, habría un aumento en la degradación del bosque nativo de un 17%. El Atlas de Riesgo Climático (ACRIM) definió un Índice de Aumento de Olas de Calor y Sequía, bajo el cual clasificó a todas las comunas entre las regiones de Coquimbo y Magallanes como zonas donde el bosque nativo podría verse afectado por cambios en las condiciones climáticas. En este sentido, nuevamente, los resultados de la investigación arrojan una diferencia a lo proyectado. Se logró determinar que en la Región de Valparaíso que hay una diferencia de suelo desnudo de un 10,6%, lo que se traduce en menos de bosque nativo, valor menor al proyectado por el CR2, siendo ésta, la región que más aumento de temperaturas máximas registro en el periodo de tiempo analizado. Según Joos et al. (1998), la temperatura determina en parte, las tasas de fotosíntesis y respiración de la vegetación, por lo que, en condiciones de mucho calor, las plantas se estresan y pueden morir. De acuerdo a una investigación realizada por Jiangel et al, el año 2012, en la zona norte de Estados Unidos, sobre los efectos del cambio climático y los cambios en los

bosques nativos, determinando los controles climáticos sobre el crecimiento de la vegetación, se desarrolló un modelo que sugiere que el estrés térmico resultante del aumento previsto de la temperatura, es el factor dominante de la disminución simulada de la cobertura de árboles de hoja perenne sobre Norte América occidental. En el caso de Chile, esta relación directa entre el aumento de temperatura y la productividad de biomasa, no resulta clara de identificar.

En los sectores donde el bosque nativo aumentó, en la Región de Valparaíso, el porcentaje sólo alcanzó un 0,45%, representando 87,4 ha reales. En la Región del Maule en cambio, el suelo desnudo disminuyó en un 3,75%, lo que se puede interpretar como una recuperación del bosque nativo, muy distinto a lo se indica el ACRIM, donde se identifica las áreas analizadas como zonas de riesgo climático de pérdida de vegetación nativa moderado, alto y muy alto. El IPCC (2018b), establece que un aumento de 1,5 °C en la temperatura global, una porción de la vegetación mediterránea en Europa se convertiría en vegetación de desierto. Un estudio reciente que mostró que especies de 67 géneros de plantas y animales distribuidas en 36% del área del continente australiano fueron afectadas (mortalidad, estrés extremo) en la época de las grandes sequías del período 1891-1903 (Godfree et al., 2019). Asimismo, este estudio mostró que el colapso de los ecosistemas australianos se produjo después de acumular un déficit de precipitación anual de entre 80% y 200% durante un período de sequía de dos a cuatro años. Si se considera que Australia esta a una latitud similar a la zona central de Chile, se podría esperar contar con un comportamiento cercano al del continente, lo cual no ha sido así, ya que existen zonas del área de estudio, donde incluso, el bosque nativo se ha recuperado.

La Región del Biobío por su parte, no muestra grandes diferencias en el aumento de suelo desnudo, alcanzando sólo un 1,84% y una disminución del mismo de un 1,7%, por lo que no se aprecia ni pérdida ni una recuperación importante del bosque nativo, situación también diferente a lo proyectado por el ACRIM. Estos resultados se condicen por lo definido por Garreaud (2011), donde indica que, hacia el sur de la Región del Maule, las tendencias climáticas ya no son significativas y predomina

un leve enfriamiento, lo que ayudaría a conservar mejor la biomasa existente. Lo anterior podría explicarse por el hecho de que esta investigación, no realiza un análisis por tipo de vegetación nativa o esclerófila. Chelli et al (2017) determinaron que, en Italia, para diferentes tipos de clima, frente al cambio climático (aumento de temperatura y disminución de las precipitaciones), no todas las especies presentan una afectación similar. Así, lograron definir que, en un clima mediterráneo, similar al de Chile Central, existe una disminución en la productividad de biomasa neta del arbusto dominante *Cistus monspeliensis* tras 3 años de disminución progresiva de las precipitaciones del 6, 18 y 46%. Sin embargo, los mismos autores determinaron que otras especies como la *Helichrysum italicum*, no presentan disminución.

Ahora bien, de acuerdo a lo descrito con anterioridad, cuando se cruzan las variables de diferencia en la productividad vegetal o biomasa, y el cambio climático, se logra determinar que éste no afecta de igual manera a cada región analizada, lo que no logra comprobar la hipótesis planteada al comienzo de la investigación, donde se indicaba que “El cambio climático, incide directamente en la alteración de las variables del clima, afectando a los recursos naturales que interactúan con él, como el suelo y la biósfera en su conjunto, con lo cual las diversas formaciones vegetacionales nativas del territorio, muestran signos de susceptibilidad diferenciada ante la presencia de sequías y alzas de temperaturas, lo que se traduce en una reducción de la productividad y vigorosidad vegetal nativa”. No se observa una relación directa entre el alza de temperaturas máximas y/o mínimas y la disminución de biomasa de bosque nativo.

Tampoco se logra determinar una relación directa entre la disminución de las precipitaciones (considerando sólo el período de lluvias comprendido entre mayo y septiembre) y la disminución de biomasa en el periodo de tiempo analizado.

En el caso de la Región de Valparaíso, es posible determinar con mayor claridad esta relación, ya que las áreas seleccionadas analizadas que mostraron una recuperación del bosque nativo, se emplazan en las zonas donde las precipitaciones lograron mantenerse, pese a la clara disminución que registra toda

la región. Las regiones de Ñuble y Biobío en cambio, presentan diferencias importantes en la producción de biomasa, pese a que muestran diferencias similares en la reducción de precipitaciones. Se concluye, por tanto, que deben existir otras variables que estarían afectando al bosque nativo, como la actividad volcánica que registra esta zona.

Finalmente, queda en evidencia la urgencia de poder contar con estudios específicos que individualicen la realidad regional y comunal a escalas más detalladas. Las diferencias geográficas resultan cruciales en la determinación de los impactos del cambio climático.

Lo anterior toma mayor importancia cuando la cantidad de incendios forestales por temporada, manifiestan un comportamiento al alza en las regiones más sub-húmedas como las regiones de Maule, Ñuble y Bio Bío, mientras que en la Región de Valparaíso existe una tendencia decreciente en la variable Incendios por temporada medida en (n° eventos/temporada) considerando que la temporada de incendios se extiende desde noviembre del año en curso a marzo del siguiente año, es decir 5 meses. Esto debido a la menor existencia de material combustible en las zonas más semiáridas del área de estudio, debido al efecto de las escasas precipitaciones y altas temperaturas que inducen una menor disponibilidad de biomasa combustible.

Realizar pronósticos a mayor escala pueden contribuir a la construcción de instrumentos de planificación y políticas nacionales, pero no para el desarrollo de planes de adaptación al cambio climático local, donde la situación climatológica dista de las proyecciones nacionales, tal como lo ha demostrado la presente investigación.

BIBLIOGRAFIA

- Alae-Carew, C., Nicoleau, S., Bird, F. A., Hawkins, P., Tuomisto, H. L., Haines, A., ... & Scheelbeek, P. F. (2020). The impact of environmental changes on the yield and nutritional quality of fruits, nuts and seeds: a systematic review. *Environmental Research Letters*, 15(2), 023002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab5cc0>
- Alvarez-Maldini, C., Acevedo, M., Dumroese, R. K., González, M., & Cartes, E. (2020). Intraspecific variation in drought response of three populations of *Cryptocarya alba* and *Persea lingue*, two native species from Mediterranean central Chile. *Frontiers in Plant Science*, 11, 1042. <https://doi.org/10.3390/land10010071>
- Amiro, B. D., Chen, J. M., & Liu, J. (2000). Net primary productivity following forest fire for Canadian ecoregions. *Canadian Journal of Forest Research*, 30(6), 939-947.
- Arroyo, M. T., Marquet, P. A., Marticorena, C., Cavieres, L. A., Squeo, F. A., Simonetti Zambelli, J. A., ... & Massardo, F. (2006). El hotspot chileno, prioridad mundial para la conservación. Diversidad de ecosistemas, ecosistemas terrestres.
- Arroyo, M. T., Robles, V., Tamburrino, Í., Martínez-Harms, J., Garreaud, R. D., Jara-Arancio, P., ... & Castro, K. (2020). Extreme drought affects visitation and seed set in a plant species in the central Chilean Andes heavily dependent on hummingbird pollination. *Plants*, 9(11), 1553. <https://doi.org/10.3390/plants9111553>
- Baron Zagal, M. Y. (2022). Impactos del cambio de cobertura de suelo en la hidrología de la cuenca del río Bío Bío en el periodo 1850-2014 mediante simulaciones hidrológicas y reconstrucción dendrocronológica.
- Barrenechea, F. (2020) Atlas de amenazas y desastres en Chile. Ediciones UBO.
- Becerra, P., Smith-Ramírez, C., & Arellano, E. (2018). Evaluación de técnicas pasivas y activas para la recuperación del bosque esclerófilo de Chile central. *Corporación Nacional Forestal: Santiago, Chile*.
- Benayas, R., José, M., & Scheiner, S. M. (2002). Plant diversity, biogeography and environment in Iberia: patterns and possible causal factors. *Journal of Vegetation Science*, 13(2), 245-258.

- Boeken, B. R. (2018). Competition for microsites during recruitment in semiarid annual plant communities. *Ecology*, 99(12), 2801-2814. <https://doi.org/10.1002/ecy.2484>
- Börgel, R. (1975). Geomorfología de Chile.
- Buckeridge, K. M., & Grogan, P. (2008). Deepened snow alters soil microbial nutrient limitations in arctic birch hummock tundra. *applied soil ecology*, 39(2), 210-222. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2007.12.010>
- Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2) <https://www.cr2.cl/>
- Chelli S, Wellstein C, Campetella G, Canullo R, Tonin R, Zerbe S, Gerdol R (2017) Respuesta al cambio climático de la vegetación en zonas climáticas de Italia. *Clim Res* 71:249-262. <https://doi.org/10.3354/cr01443>
- Chidiak, M., & Gutman, V. Cambio climático: incentivos, inversión y reducción de emisiones. *DESARROLLO SOSTENIBLE*.
- Cifuentes, L. A., & Meza, F. J. (2008). Cambio climático: consecuencias y desafíos para Chile.
- CONAF,(2019). Catastro de Vegetación. <http://www.conaf.cl/nuestros-bosques/bosques-en-chile/catastro-vegetacional/>
- COP25, C. C., Rojas, M., Aldunce, P., Farías, L., González, H., Marquet, P. A., ... & Vicuña, S. (2019). Evidencia científica y cambio climático en Chile: resumen para tomadores de decisiones.
- Cox, R. L., & Underwood, E. C. (2011). The importance of conserving biodiversity outside of protected areas in Mediterranean ecosystems. *PloS one*, 6(1), e14508.
- Díaz-Pacheco, J., Yanes, A., López-Díez, A., Máyer, P., & Dorta, P. (2019). Relación entre episodios de lluvia intensa y daños producidos por inundaciones en áreas turísticas costeras de clima árido: el Sur de Tenerife (1980-2018). X Jornadas de Geomorfología Litoral. Libro de ponencias, 17-30.
- Durán Gárate, L. P. (2005). Evaluación de la producción y productividad en biomasa aérea de Boldo (*Peumus boldus* Mol.) en un bosque esclerófilo de la comuna de María Pinto, Provincia de Melipilla, Región Metropolitana.[Tesis].
- Eckstein, D., Künzel, V., Schäfer, L., & Wings, M. (2019). Global climate risk index 2020. *Bonn: Germanwatch*.

- Espinoza, F. V. (2018). *Evaluación participativa de prácticas de adaptación al aumento en las temperaturas, olas de calor y lluvias extremas* (Doctoral dissertation, Universidad De Chile).
- Fortes, J. A., Silva, J. L. A., & Mardones, D. Z. (2020). Análisis vegetacional del bosque nativo en la región mediterránea de la zona central de Chile: zona de estudio valle de Colliguay. *Investigaciones Geográficas*, (59), 105-119. <https://doi.org/10.5354/0719-5370.2020.55371>
- Fuenzalida, H, Villagran, C., Bernal, P., Fuentes, E., Santibañez, F., Peña, H., ... & Rutllant, J. (1989). Cambio climático global y eventuales efectos en Chile. *Ambiente y Desarrollo*, 2, 37-42.
- Garreaud, R. (2011) Cambio Climático: Bases Físicas e Impactos en Chile. *Revista Tierra Adentro – INIA*. (93) http://dgf.uchile.cl/rene/PUBS/inia_RGS_final.pdf
- Godfree, R. C, N. Knerr, D. Godfree, J. Busby, B. Robertson y F. Encinas-Viso (2019). «Historical reconstruction unveils the risk of mass mortality and ecosystem collapse during pancontinental megadrought». *Proceedings of the National Academy of Sciences* 116(31): 15.580-15.589. doi: 10.1073/pnas.1902046116.
- Gómez, E. G. (2022). *La inteligencia de los bosques: Un viaje científico al corazón del bosque: estrategias, biología e historias del fabuloso ecosistema donde reinan los árboles*. Guadalmazán.
- González, M., Jurado, E., González, S., Aguirre, O., Jiménez, C.J., Navar, J., (2003) Cambio Climático Mundial: Origen y Consecuencias. *Ciencia UANL*. Vol VI(3), 377-385. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/402/40260313.pdf>
- Guevara-Ochoa, C., Medina-Sierra, A., & Vives, L. (2020). Spatio-temporal effect of climate change on water balance and interactions between groundwater and surface water in plains. *Science of the Total Environment*, 722, 137886. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137886>
- Henríquez, C., Aspee, N., & Quense, J. (2016). Zonas de catástrofe por eventos hidrometeorológicos en Chile y aportes para un índice de riesgo climático. *Revista de Geografía Norte Grande*, (63), 27-44.
- Hernández, G. (2021). Emisiones de gases de efecto invernadero y sectores clave en Colombia. *El Trimestre Económico*, vol. LXXXVIII (350), 523-550. doi: 10.20430/ete.v88i350.857

- Hernández-García, M. A., Granados-Sánchez, D., & Sánchez-González, A. (2003). Productividad de los ecosistemas en las regiones áridas. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 9(2), 113-123.
- Hoffmann, A., & Armesto, J. (2018). El clima nuestro de cada día.
<https://library.fes.de/pdf-files/bueros/chile/15512.pdf>
- IPCC (2019) Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. Documento consultado en <https://www.ipcc.ch/srocc/>
- Jiménez-Muñoz, J. C., Mattar, C., Barichivich, J., Santamaría-Artigas, A., Takahashi, K., Malhi, Y., ... & Schrier, G. V. D. (2016). Record-breaking warming and extreme drought in the Amazon rainforest during the course of El Niño 2015–2016. *Scientific reports*, 6(1), 1-7.
- Jiang, X., Rauscher, S. A., Ringler, T. D., Lawrence, D. M., Williams, A. P., Allen, C. D., Steiner, A. L., Cai, D. M., & McDowell, N. G. (2013). Projected Future Changes in Vegetation in Western North America in the Twenty-First Century, *Journal of Climate*, 26(11), 3671-3687. doi: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00430.1>
- Klausmeyer, K. R., & Shaw, M. R. (2009). Climate change, habitat loss, protected areas and the climate adaptation potential of species in Mediterranean ecosystems worldwide. *PloS one*, 4(7), e6392.
- Lobos, F., & Araos, J. (2021). VALORACIÓN DE LA MEGASEQUÍA EN LA PROVINCIA DE CACHAPOAL, CHILE, MEDIANTE PRODUCTOS MODIS. *Revista Geográfica de Chile Terra Australis*, 57(1), 44-52. <https://doi.org/10.23854/07199562.2021571.Lobos44>
- Luebert, F., & Plischoff, P. (2005). Sobre los límites del bosque valdiviano en Chile. *Chloris Chilensis*, 8(1), 8-10.
- Martínez Castillo, V. (2016). Caracterización de la cubierta vegetal e identificación de sectores susceptibles a degradación en la Reserva Nacional Altos de Lircay, comuna de San Clemente, Región del Maule.
- McWethy, D. B., Pauchard, A., García, R. A., Holz, A., González, M. E., Veblen, T. T., ... & Currey, B. (2018). Landscape drivers of recent fire activity (2001-2017) in south-central Chile. *PloS one*, 13(8), e0201195. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0201195>
- Meli, P., Holl, K. D., Rey Benayas, J. M., Jones, H. P., Jones, P. C., Montoya, D., & Moreno Mateos, D. (2017). A global review of past land use, climate, and

active vs. passive restoration effects on forest recovery. *Plos one*, 12(2), e0171368. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0171368>

- Ministerio de Agricultura – Ministerio de Medio Ambiente (2013) Plan de adaptación al cambio climático del sector silvoagropecuario. Santiago de Chile. https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2019/07/plan_CC_Silvoagropecuario.pdf
- Ministerio de Medio Ambiente de Chile. Atlas de Riesgo Climático <https://arclim.mma.gob.cl/>
- Ministerio de Medio Ambiente. (2022). Política Pública Regional Para La Conservación De La Biodiversidad De La Región Del Biobío.
- Montenegro, G., Ginocchio, R., Segura, A., Keely, J. E., & Gomez, M. (2004). Fire regimes and vegetation responses in two Mediterranean-climate regions. *Revista chilena de historia natural*, 77(3), 455-464.
- Ngao, J., Epron, D., Brechet, C., & Granier, A. (2005). Estimating the contribution of leaf litter decomposition to soil CO₂ efflux in a beech forest using ¹³C-depleted litter. *Global Change Biology*, 11(10), 1768-1776.
- Paez, M. M., Villagrán, C., Stutz, S., Hinojosa, F., & Villa, R. (1997). Vegetation and pollen dispersal in the subtropical-temperate climatic transition of Chile and Argentina. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 96(1-2), 169-181.
- Panel Internacional sobre Cambio Climático – IPCC (2019) <https://www.ipcc.ch/languages-2/spanish/>
- Peña-Rojas, K., Donoso, S., Gangas, R., Durán, S., & Ilabaca, D. (2018). Efectos de la sequía en las relaciones hídricas, crecimiento y distribución de biomasa en plantas de *Peumus boldus* Molina (Monimiaceae) cultivadas en vivero. *Interciencia*, 43(1), 36-42.
- Pérez, C. A., & Armesto, J. J. (2018). Coupling of microbial nitrogen transformations and climate in sclerophyll forest soils from the Mediterranean Region of central Chile. *Science of the Total Environment*, 625, 394-402. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.306>
- Pinto, F. (2019) Cambio climático en Chile: del desafío global a la oportunidad local. Fundación Friedrich-Ebert-Stiftung en Chile.
- Pizarro, R., Sangüesa, C., Vallejos, C., Mendoza, R., Pino, J., Berríos, Á., ... & Iroumé, A. (2019). Antecedentes de la relación masa forestal y disponibilidad hídrica en Chile.

- Pliscoff, P., Zanetta, N., Hepp, J., & Machuca, J. (2017). Efectos sobre la flora y vegetación del evento de precipitación extremo de agosto 2015 en Alto Patache, Desierto de Atacama, Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*, (68), 91-103. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022017000300091>
- Pozo Torres, G. J. (2021). Estimación de la productividad primaria neta aérea y capacidad de carga ganadera en pastizales de la finca Salinas comuna Olón, provincia de Santa Elena (Bachelor's thesis, La Libertad: Universidad Estatal Península de Santa Elena, 2021.).
- Reyes, R., Razeto Migliaro, J., Barreau, A., & Müller-Using, S. (2020). *Hacia una socioecología del bosque nativo en Chile*. Social Ediciones.
- Rodriguez, M., Mance, H., Barrera, X., García, C. (2015) *Cambio climático: lo que está en juego*. Universidad de Los Andes. <https://library.fes.de/pdf-files/bueros/kolumbien/12047.pdf>
- Rodríguez, M., y Mance, H. (2009). Cambio climático: lo que está en juego. Bogotá: Foro Nacional Ambiental.
- Rodríguez, R. M. V., Cruz, R. J., Meade, J. G. M., López, M. P. A., Caballero, C. M. M., & Yáñez, A. H. Sitios Prioritarios Para La Conservación De La Biodiversidad.
- Romero Sánchez, M. E. (2016). Escenarios de Cambio Climático en el sector forestal. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 7(37), 4-6.
- Rosas, M. L., Arango, G., & Andrade, G. (2002). Lineamientos para definir la vulnerabilidad y adaptabilidad de los ecosistemas continentales colombianos ante la Convención de Cambio Climático.
- Sherwood, S. C., Webb, M. J., Annan, J. D., Armour, K. C., Forster, P. M., Hargreaves, J. C., ... & Zelinka, M. D. (2020). An assessment of Earth's climate sensitivity using multiple lines of evidence. *Reviews of Geophysics*, 58(4), e2019RG000678.
- Siles, G., Rey, P. J., Alcántara, J. M., Bastida, J. M., & Herreros, J. L. (2010). Effects of soil enrichment, watering and seedling age on establishment of Mediterranean woody species. *Acta Oecologica*, 36(4), 357-364.
- Thornton, P. K., Ericksen, P. J., Herrero, M., & Challinor, A. J. (2014). Climate variability and vulnerability to climate change: a review. *Global change biology*, 20(11), 3313-3328. <https://doi.org/10.1111/gcb.12581>
- Universidad de Chile (2006) Estudio de la variabilidad climática en Chile para el siglo XXI. http://dgf.uchile.cl/PRECIS/articles-39442_pdf_Estudio_texto.pdf

- Vaglio Laurin, G., Vittucci, C., Tramontana, G., Ferrazzoli, P., Guerriero, L., & Papale, D. (2020). Monitoring tropical forests under a functional perspective with satellite-based vegetation optical depth. *Global Change Biology*, 26(6), 3402-3416. <https://doi.org/10.1111/gcb.15072>
- Xue, J., & Su, B. (2017). Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications. *Journal of sensors*, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/1353691>
- Yepes, A., & Buckeridge, M. S. (2011). Respuestas de las plantas ante los factores ambientales del cambio climático global: Revisión. *Colombia forestal*, 14(2), 213-232.
- Zepeda-Paulo, R. (2013). Dinámica espacio-temporal del bosque nativo y matorral esclerófilo y la industria vitivinícola: Una aproximación para la conservación en el Valle de Leyda, Región de Valparaíso. *Agronomic Engineer Thesis*. Available via <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2013/fifz.57d/doc/fifz.57d.pdf>.

ANEXO 1

PROCESAMIENTO DE IMÁGENES

Corrección radiométrica de Imágenes de satélite

Conversión de niveles digitales a radiancia

Algoritmo que transforma niveles digitales de imágenes satelitales en unidades de radiancia, medida como flujo de energía incidente a través de un ángulo sólido por unidad de área, en una dirección dada, (Congedo, 2016), a través de la relación :

$$L_{\lambda} = G_r \cdot Q_{cal} + B_r$$

donde :

L_{λ} = radiancia espectral, en el sensor en ($W m^{-2} st^{-1} \mu^{-1}$), para la banda λ

G_r = factor de reescalamiento de la banda, en [$(W m^{-2} st^{-1} \mu^{-1})/DN$],

B_r = factor aditivo de reescalamiento específico de la banda, en ($W m^{-2} st^{-1} \mu^{-1}$),

Q_{cal} = valor de pixel discretizados, y calibrados al producto estándar, en valores digitales (DN)

Conversión de radiancia a reflectancia de superficie

La reflectancia es la parte de la radiancia solar que alcanza la superficie terrestre y que luego se refleja de nuevo a la atmósfera. Es necesario luego convertir las imágenes con valores de radiancia a valores de reflectancia en el Techo de la Atmósfera (TOA), la cual combina la reflectancia de la superficie y la reflectancia atmosférica, para reducir la variabilidad dentro de la imagen a través de una

normalización de la irradiancia solar. Esta reflectancia (TOA), (ρ_λ) es la razón de la energía reflejada con respecto al total de la energía incidente y se calcula mediante la fórmula siguiente, (Congedo, 2016):

$$\rho_\lambda = (\pi \cdot L_\lambda \cdot d^2) / (E_{SUN\lambda} \cdot \cos\theta_s)$$

donde :

ρ_λ = reflectancia de superficie para la banda λ , medida en tanto por uno

π = constante matemática = 3,1416

L_λ = radiancia espectral en el sensor satelital, para la banda λ , en ($W\ m^{-2}\ st^{-1}\ \mu^{-1}$)

d^2 = distancia Tierra –Sol en unidades astronómicas (UA), 1 UA= 150 millones de km

$E_{SUN\lambda}$ = irradiancia solar media atmosférica, en ($W\ m^{-2}$), para la banda λ , a nivel del suelo

θ_s = ángulo zenital de elevación solar, en grados (°)

Corrección atmosférica de bandas del sensor

Los efectos de la atmósfera o error atmosférico de las imágenes (es decir la perturbación en los valores de reflectancia que varía con la longitud de onda) debe ser considerada o corregida, para medir la reflectancia en la superficie. Por tanto es necesario modelar y compensar el efecto de transmisividad de la energía al atravesar los gases atmosféricos. Por esto convertir la reflectancia de TOA a reflectancia al tope de la canopia o TOC en inglés, se le llama corrección atmosférica. Para corregir los errores atmosféricos se utilizará el método DOS1, de Chávez (1996), con el programa QGIS V:3.4 y el complemento Semi-Automatic Classification Plugin.

Método DOS1 (Dark Object Subtraction): o substracción de objeto oscuro es una familia de correcciones atmosféricas basadas en imagen. La suposición básica es que en la imagen algunos píxeles están completamente en sombra, y las radiancias recibidas por satélite se deben a la dispersión atmosférica (efecto bruma). Esta suposición es combinada con el hecho de que muy pocos elementos en la superficie de la Tierra tienen un color negro absoluto, por lo tanto, una reflectancia asumida de uno por ciento es mejor que un cero por ciento.

La exactitud de las técnicas basadas en imagen es generalmente menor que las correcciones basadas en medidas físicas, pero son muy útiles cuando no están disponibles mediciones atmosféricas, que puedan mejorar la estimación de la reflectancia de la superficie terrestre. Para el cálculo del efecto bruma (L_p), este método asume que, (Moran et al., 1992):

$$L_p = G_r \cdot DN_{min} + B_r - 0,01 \cdot [(E_{SUN\lambda} \cdot \cos\theta_s \cdot T_z) + E_{down}] \cdot (T_v / (\pi \cdot d^2))$$

y cuando algunas condiciones de borde son particulares, para:

T_v = transmitancia de la atmósfera en la dirección de visión = 1

T_z = transmitancia atmosférica en la dirección de iluminación = 1

E_{down} = irradiancia difusa descendente = 0

Se tiene finalmente que:

$$L_p = G_r \cdot DN_{min} + B_r - 0,01 \cdot [(E_{SUN\lambda} \cdot)] \cdot (1/(\pi \cdot d^2))$$

donde :

L_p = efecto bruma, en ($W \text{ m}^{-2} \text{ st}^{-1} \mu^{-1}$)

G_r = factor de reescalamiento de la banda, en $[(W\ m^{-2}\ st^{-1}\ \mu^{-1})/DN]$,

DN_{min} = nivel digital mínimo registrado en la imagen

B_r = factor aditivo de reescalamiento específico de la banda, en $(W\ m^{-2}\ st^{-1}\ \mu^{-1})$

$E_{SUN\lambda}$ = irradiancia solar media extra-atmosferica, en $(W\ m^{-2})$, para la banda λ , a nivel del suelo

θ_s = ángulo zenital de elevación solar, en grados ($^\circ$)

π = constante matemática = 3,1416

d^2 = distancia Tierra –Sol en unidades astronómicas (UA), 1 UA= 150 millones de km

La Tabla N° 1, identifica valores de irradiancia solar media extra-atmosferica, ($E_{SUN\lambda}$), en $(W\ m^{-2})$, para el satélite LANDSAT-5 y LANDSAT-7:

Banda N°	Irradiancia solar media	
	$E_{sun\lambda}$, (W m-2)	$E_{sun\lambda}$, (W m-2)
	LANDSAT-5 TM	LANDSAT-7 TM
1	1983	1970
2	1796	1842
3	1536	1547
4	1031	1044
5	220	225,7
6	-	-
7	83,44	82,06
8	-	1369

Tabla N° 1: Valores de Irradiancia solar media extra-atmosférica. Fuente: Chander, G., Markham, B.L., & D.L. Helder, (2009).

Y por tanto la reflectancia de la superficie terrestre a nivel de canopia, (ρ_{TOC}) está dada por:

$$\rho_{TOC} = [\pi \cdot (L_\lambda - L_p) \cdot d^2] / (E_{SUN\lambda} \cdot \cos\theta_s)$$

donde:

ρ_{TOC} = reflectancia de la superficie a nivel de canopia en tanto por uno.

L_p = efecto bruma, en ($\text{W m}^{-2} \text{ st}^{-1} \mu^{-1}$)

Corrección topográfica de imágenes satelitales

Modelo de Lambert

Con el objetivo de recuperar para el análisis de las imágenes las zonas que poseen sombras de origen topográfico, se realizó un procedimiento de realce de los valores de reflectancia, proporcional al nivel de sombra que poseen los pixeles, a través del Modelo de Lambert (Mariotto & Gutschick, 2010), fundamentado en la Ley del Coseno de acuerdo a la ecuación siguiente:

$$L_H = L_T (\cos\theta_s / \cos\theta_i)$$

donde :

L_H = reflectancia de una superficie horizontal (reflectancia normalizada o corregida), en (W m^{-2})

L_T = reflectancia observada de una superficie inclinada (imagen corregida radiométricamente), en (W m^{-2})

$\cos\theta_s$ = coseno del ángulo zenital, en grados ($^\circ$)

$\cos\theta_i$ = coseno del ángulo de incidencia solar sobre el terreno o raster de brillo en grados ($^\circ$)

Modelo de Lambert corregido por Minnaert

En 1940, Minnaert ajusta el Modelo de Lambert, a través de un factor de corrección constante K_α , para superficies anisotrópicas propias de diferentes cubiertas vegetales distribuidas en el paisaje. La constante K_α , se calcula para cada banda

espectral α , usando un modelo de iluminación, generado a través de un modelo digital de elevación. Además, se utilizó en la ecuación un factor de atenuación de la constante K_α que permite captar los niveles de realce al tipo de uso del suelo o especies vegetales, que se estén analizando, (Muñoz et al, 2014), de acuerdo a la relación:

$$L_H = L_T (\cos\theta_s / \cos\theta_i)^{K_\alpha}$$

donde :

K_α = constante de Minnaert para cada banda α

A su vez, aplicando logaritmos a la ecuación anterior se tiene el valor de K_α :

$$K_\alpha = (\text{Log}L_T - \text{Log}L_H) / (\text{Log}(\cos\theta_i / \cos\theta_s))$$

$$0 < K_\alpha < 1$$

Modelo de Lambert-Minnaert, aplicado para corrección de sombras

El Modelo de Lambert –Minnaert, permite ajustes para reducir las sombras de la imagen, a través de un filtro que reduce el brillo:

$$L_H = L_T (\cos\theta_s / \text{Brillo-f})^{K_\alpha - m}$$

donde :

Brillo-f = raster de brillo, filtrado con Low Pass de matriz 5x5.

m = valor experimental = 0.8

La Tabla N° 2 muestra los valores del factor de atenuación K_α , asociados a cada imagen, identificados en la etapa de selección de imágenes; Figura N° 4:

Tipo de Imagen	Codigo de Imagen	Factor de Atenuación
		K_{α}
LANDSAT-5	001085-19860204	0.50
LANDSAT-5	001086-19861221	0.45
LANDSAT-5	233083-19861230	0.45
LANDSAT-5	233085-19861230	0.45
LANDSAT-5	233086-19861011	0.40
LANDSAT-8	LC08-L1TP-001085-20191216-20191226-01-T1	0.45
LANDSAT-8	LC08-L1TP-001086-20191216-20191226-01-T1	0.45
LANDSAT-8	LC08-L1TP-233083-20200110-20200114-01-T1	0.45
LANDSAT-8	LC08-L1TP-233085-20200110-20200114-01-T1	0.45
LANDSAT-8	LC08-L1TP-233086-20200110-20200114-01-T1	0.45

Tabla N° 2. Imágenes LANDSAT-5, LANDSAT-8 y factores de atenuación, K_{α}

Fuente: Elaboración propia

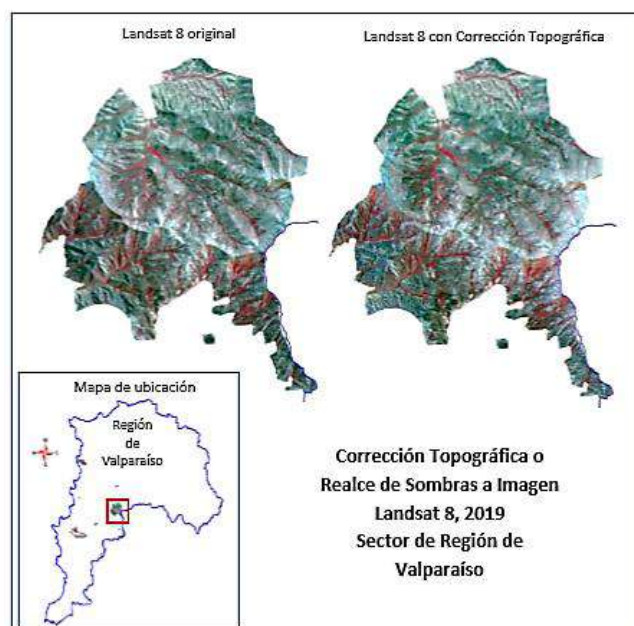


Figura N° 4 : Aplicación de una corrección topográfica, para reducir sombras a una imagen LANDSAT-8 en un sector de la Región de Valparaíso. Se consideró $K_{\alpha} = 0.45$, como factor de atenuación. Fuente: Elaboración propia.

Calculo del Índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas-NDVI

El NDVI es un estimador del vigor de la vegetación y se estima a través de la ecuación siguiente, aplicado a cada una de las imágenes seleccionadas :

$$\text{NDVI} = (\text{Ic} - \text{R}) / (\text{R} + \text{Ic})$$

donde:

Ic = valor de banda del infrarojo cercano, en (nm)

R = valor de banda del rojo, en (nm)

ANEXO N°2
DATOS METEOROLÓGICOS

Promedio temperaturas mínimas por estación climática (Grados Celsius)

ESTACIÓN	VERANO				PRIMAVERA				OTOÑO				INVIERNO			
	85' - 90'	91' - 00'	01' - 10'	11' - 20'	85' - 90'	91' - 00'	01' - 10'	11' - 20'	85' - 90'	91' - 00'	01' - 10'	11' - 20'	85' - 90'	91' - 00'	01' - 10'	11' - 20'
RIO JUNCAL EN JUNCAL DGA	s/i	s/i	s/i	10,07	s/i	s/i	s/i	4,06	s/i	s/i	s/i	5,93	s/i	s/i	s/i	-0,087
CANAL COLORADO EN BOCATOMA DGA	s/i	s/i	s/i	12,87	s/i	s/i	s/i	7,67	s/i	s/i	s/i	8,93	s/i	s/i	s/i	5,461
ALICAHUE(DGA)	11,97	11,58	11,07	10,21	8,11	8,10	7,34	6,21	9,04	9,49	8,24	7,42	5,59	5,51	5,06	3,621
VILCUYA DGA	12,51	11,40	11,80	11,54	7,91	6,42	6,92	5,56	8,29	7,97	7,62	7,25	4,79	3,92	4,52	3,176
QUILLOTA DGA	11,13	10,50	10,19	9,71	8,63	7,79	7,09	6,48	8,00	8,37	7,04	7,01	5,53	4,95	4,69	3,674
LOS AROMOS DGA	10,12	11,82	11,14	11,13	7,32	8,45	7,59	7,54	7,39	9,77	8,00	8,12	5,06	5,62	5,18	4,233
LAGO PEUELAS DGA	10,40	9,90	10,81	10,03	7,69	7,20	7,64	7,08	7,25	8,00	8,05	7,28	5,58	4,57	5,35	4,188
LLIU-LLIU EMBALSE DGA	11,67	11,11	11,57	11,34	9,21	8,05	8,28	7,80	8,55	9,27	9,02	9,13	6,22	6,04	6,19	5,567
RIO ACONCAGUA EN CHACABUQUITO DGA	s/i	s/i	12,15	11,96	s/i	s/i	7,83	7,32	s/i	s/i	8,09	7,79	s/i	s/i	4,69	3,242
PORTILLO DGA	s/i	s/i	6,70	7,06	s/i	s/i	-0,17	0,55	s/i	s/i	2,30	2,93	s/i	s/i	-3,38	-2,775

Región de Valparaíso

ESTACION	VERANO				PRIMAVERA				OTOÑO				INVIERNO			
	85' - 90'	91' - 00'	01' - 10'	11' - 20'	85' - 90'	91' - 00'	01' - 10'	11' - 20'	85' - 90'	91' - 00'	01' - 10'	11' - 20'	85' - 90'	91' - 00'	01' - 10'	11' - 20'
POTRERO GRANDE DGA	8,29	8,13	8,77	9,41	5,12	4,69	4,80	4,91	4,27	4,97	4,26	4,33	2,16	2,00	2,04	1,32
TALCA UC DGA	11,72	11,80	12,04	13,09	7,67	7,65	7,57	8,26	7,14	7,89	6,93	7,22	4,57	4,15	4,06	4,39
ANCOA EMBALSE DGA	10,12	10,14	11,21	12,08	6,11	6,28	7,32	7,76	6,21	6,98	8,80	7,94	3,31	3,09	5,58	6,53
DIGUA EMBALSE DGA	10,43	10,19	10,01	10,05	6,29	6,32	5,44	5,02	5,88	6,83	5,88	5,41	3,43	3,21	2,79	2,40
PARRAL DGA	11,24	11,37	12,12	10,85	7,44	7,45	7,63	4,89	6,84	7,97	8,20	6,30	4,29	4,58	5,47	3,43
PENCAHUE DGA	12,01	11,50	11,40	11,04	6,49	7,21	6,88	6,47	7,15	7,88	7,07	6,51	3,93	4,84	4,94	4,06
RIO CLARO EN RAUQUEN DGA	s/i	12,77	13,24	13,50	s/i	9,42	9,19	8,72	s/i	8,47	9,10	7,98	s/i	5,16	6,38	5,30
LO AGUIRRE DGA	s/i	7,30	8,29	8,92	s/i	2,50	1,73	2,21	s/i	4,27	6,00	4,62	s/i	-2,17	-1,03	-1,82
RIIO MAULE EN ARMERILLO DGA	s/i	s/i	13,89	14,01	s/i	s/i	9,25	8,79	s/i	s/i	8,43	10,45	s/i	s/i	6,35	5,66
RIO MELADO EN EL SALTO DGA	s/i	s/i	11,21	11,82	s/i	s/i	5,70	6,28	s/i	s/i	6,48	6,66	s/i	s/i	2,43	2,23

ARMERILLO DGA	s/i	s/i	s/i	12,59	s/i	s/i	s/i	7,59	s/i	s/i	s/i	8,56	s/i	s/i	s/i	4,47
LAGUNA DE TORCA DGA	s/i	s/i	s/i	11,49	s/i	s/i	s/i	7,68	s/i	s/i	s/i	8,60	s/i	s/i	s/i	5,83
CURICO DGA	11,45	11,65	12,04	12,69	7,36	7,52	9,35	7,56	6,73	7,54		7,39	3,97	3,94	s/i	1,43
CONSTITUCION DGA	s/i	s/i	s/i	13,54	s/i	s/i	s/i	9,49	s/i	s/i	s/i	10,51	s/i	s/i	s/i	7,66
RIO CIPRECES EN DESAGUE LAGUNA LA INVERNADA DGA	s/i	s/i	s/i	12,37	s/i	s/i	s/i	5,96	s/i	s/i	s/i	7,79	s/i	s/i	s/i	2,06
RIO CLARO EN SAN CARLOS DGA	s/i	s/i	s/i	12,74	s/i	s/i	s/i	7,65	s/i	s/i	s/i	8,58	s/i	s/i	s/i	4,00
LOS CONDORES DGA	s/i	s/i	s/i	6,43	s/i	s/i	s/i	-0,23	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	-3,85

Región del Maule

ESTACIÓN	VERANO				PRIMAVERA				OTOÑO				INVIERNO			
	85' - 90'	91' - 00'	01' - 10'	11' - 20'	85' - 90'	91' - 00'	01' - 10'	11' - 20'	85' - 90'	91' - 00'	01' - 10'	11' - 20'	85' - 90'	91' - 00'	01' - 10'	11' - 20'
CARACOL DGA	9,6	10,39	10,47	9,78	5,53	6,19	5,66	4,93	9,27	7,08	6,75	7,03	2,79	3,39	3,45	2,78
COIHUECO EMBALSE	7,7	8,42	8,70	9,34	6,43	5,59	5,53	4,57	7,71	5,57	5,09	5,67	4,63	3,38	3,81	2,29
PARQUE NAHUELBUTA	s/i	s/i	6,01	7,34	4,74	4,98	5,40	4,80	6,79	6,46	7,23	6,18	2,37	2,89	3,29	2,59
DIGUILLIN	9,0	9,08	10,94	10,51	s/i	s/i	1,60	3,74	s/i	s/i	3,37	4,59	s/i	s/i	-0,30	0,19
ALTO MALLINES	s/i	s/i	8,23	8,48	s/i	s/i	2,44	1,74	s/i	s/i	4,12	3,92	s/i	s/i	-0,55	-1,52
RIO BIO BIO EN LA CULEBRA	s/i	s/i	s/i	12,28	s/i	s/i	s/i	6,16	s/i	s/i	s/i	8,93	s/i	s/i	s/i	4,15
RIO HUEQUECURA AGUAS ARRIBA DE EMBALSE ANGOSTURA	s/i	s/i	s/i	9,51	s/i	s/i	s/i	5,46	s/i	s/i	s/i	5,81	s/i	s/i	s/i	2,43
QUILACO	8,0	8,12	9,68	11,21	5,09	5,45	5,79	6,52	3,47	5,89	6,02	7,12	3,23	3,20	3,91	3,74
CONTULMO	9,5	10,35	12,25	11,03	4,15	7,46	8,80	7,67	8,68	8,12	9,78	9,70	4,82	5,76	6,95	5,93

Regiones de Ñuble y Biobío

Promedio temperaturas máximas por estación climática (Grados Celsius)

ESTACIÓN	VERANO				PRIMAVERA				OTOÑO				INVIERNO			
	85' - 90'	91' - 00'	01' - 10'	11' - 20'	85' - 90'	91' - 00'	01' - 10'	11' - 20'	85' - 90'	91' - 00'	01' - 10'	11' - 20'	85' - 90'	91' - 00'	01' - 10'	11' - 20'
RIO JUNCAL EN JUNCAL DGA	s/i	s/i	s/i	20,61	s/i	s/i	s/i	14,43	s/i	s/i	s/i	15,93	s/i	s/i	s/i	9,44
RIO ACONCAGUA EN RIO BLANCO DGA	s/i	s/i	s/i	27,80	s/i	s/i	s/i	20,80	s/i	s/i	s/i	22,84	s/i	s/i	s/i	16,19
CANAL COLORADO EN BOCATOMA DGA	s/i	s/i	s/i	29,35	s/i	s/i	s/i	21,75	s/i	s/i	s/i	22,56	s/i	s/i	s/i	16,81
ALICAHUE(DGA)	26,6	26,10	27,59	27,61	20,7	20,93	21,90	22,15	20,5	22,22	23,12	23,87	16,87	16,63	17,17	17,66
VILCUYA DGA	28,4	28,37	29,48	29,78	21,8	21,79	23,09	22,94	22,4	22,45	23,96	24,62	16,19	16,19	16,76	17,08
QUILLOTA DGA	25,6	26,41	26,68	26,97	21,5	21,98	22,29	22,47	21,8	22,75	22,78	23,51	17,59	17,50	17,69	18,22
LOS AROMOS DGA	23,9	24,68	26,86	25,88	19,9	20,61	21,69	21,41	19,9	20,79	22,43	22,63	16,78	17,05	17,42	17,83
LAGO PEÑUELAS DGA	23,1	23,56	23,35	22,40	18,6	19,02	18,97	18,40	19,5	20,44	20,19	19,71	15,24	15,56	15,05	14,92
LLIU-LLIU EMBALSE DGA	26,79	27	27,64	27,87	21,26	21,58	22,29	22,12	22,19	22,59	23,38	23,82	16,64	16,86	17,07	17,51
RIO ACONCAGUA EN CHACABUQUITO DGA	s/i	s/i	29,14	29,28	s/i	s/i	23,13	23,67	s/i	s/i	23,52	23,27	s/i	s/i	17,74	17,70
PORTILLO DGA	s/i	s/i	14,41	14,74	s/i	s/i	7,6	8,01	s/i	s/i	10,23	10,16	s/i	s/i	3,07	4,00

Región de Valparaíso

ESTACIÓN	VERANO				PRIMAVERA				OTOÑO				INVIERNO			
	85' - 90'	91' - 00'	01' - 10'	11' - 20'	85' - 90'	91' - 00'	01' - 10'	11' - 20'	85' - 90'	91' - 00'	01' - 10'	11' - 20'	85' - 90'	91' - 00'	01' - 10'	11' - 20'
POTRERO GRANDE DGA	27,6	27,8	29,0	28,6	20,2	20,4	20,6	20,50	19,9	20,5	21,5	20,52	13,4	13,6	13,0	12,03
TALCA UC DGA	28,9	29,2	29,1	29,9	21,3	21,5	21,3	22,18	20,8	21,4	21,4	20,78	13,6	14,2	12,9	13,54
COLORADO DGA	27,2	26,6	24,9	26,5	19,5	19,6	19,1	s/i	19,4	19,8	20,4	21,21	13,4	13,4	12,7	13,56
ANCOA EMBALSE DGA	27,8	27,2	26,5	25,8	20,0	19,6	19,2	s/i	19,7	20,2	21,0	19,43	13,6	13,8	13,6	s/i
DIGUA EMBALSE DGA	27,9	27,5	28,1	27,2	19,6	19,3	19,3	18,79	19,3	19,7	20,3	17,91	12,7	12,8	11,8	11,11
PARRAL DGA	28,5	28,0	28,6	30,2	20,2	19,9	20,3	21,24	20,1	20,4	21,7	20,99	12,9	13,3	13,4	13,28
PENCAHUE DGA	31,2	30,6	31,8	30,4	21,7	22,3	23,0	22,51	21,8	22,6	24,0	22,56	13,3	14,9	13,6	14,06
RIO CLARO EN RAUQUEN DGA	s/i	29,0	29,6	29,5	s/i	21,7	21,7	21,56	s/i	21,2	21,4	21,68	s/i	14,1	14,0	13,52
LO AGUIRRE DGA	s/i	18,4	20,0	20,0	s/i	9,7	11,4	s/i	s/i	14,0	13,9	14,25	s/i	4,6	6,2	s/i

RIIO MAULE EN ARMERILLO DGA	s/i	s/i	25,9	26,8	s/i	s/i	19,3	19,65	s/i	s/i	19,4	19,80	s/i	s/i	13,6	13,49
RIO MELADO EN EL SALTO DGA	s/i	s/i	27,6	27,0	s/i	s/i	20,5	20,85	s/i	s/i	20,4	21,99	s/i	s/i	11,7	13,02
ARMERILLO DGA	s/i	s/i	s/i	26,8	s/i	s/i	s/i	20,10	s/i	s/i	s/i	21,46	s/i	s/i	s/i	14,98
LAGUNA DE TORCA DGA	s/i	s/i	s/i	23,7	s/i	s/i	s/i	19,71	s/i	s/i	s/i	19,57	s/i	s/i	s/i	15,66
CURICO DGA	s/i	s/i	s/i	23,8	s/i	s/i	s/i	23,86	s/i	s/i	s/i	21,95	s/i	s/i	s/i	14,25
CONSTITUCION DGA	s/i	s/i	s/i	21,7	s/i	s/i	s/i	17,71	s/i	s/i	s/i	18,06	s/i	s/i	s/i	14,78
RIO CIPRECES EN DESAGUE LAGUNA LA INVERNADA DGA	s/i	s/i	s/i	25,8	s/i	s/i	s/i	17,98	s/i	s/i	s/i	18,21	s/i	s/i	s/i	11,16
RIO CLARO EN SAN CARLOS DGA	s/i	s/i	s/i	26,9	s/i	s/i	s/i	19,16	s/i	s/i	s/i	19,98	s/i	s/i	s/i	13,50
LOS CONDORES DGA	s/i	s/i	s/i	18,0	s/i	s/i	s/i	8,49	s/i	s/i	s/i	10,63	s/i	s/i	s/i	2,65

Región del Maule

ESTACIÓN	VERANO				PRIMAVERA				OTOÑO				INVIERNO			
	85' - 90'	91' - 00'	01' - 10'	11' - 20'	85' - 90'	91' - 00'	01' - 10'	11' - 20'	85' - 90'	91' - 00'	01' - 10'	11' - 20'	85' - 90'	91' - 00'	01' - 10'	11' - 20'
CARACOL DGA	25,52	25,60	26,12	25,10	18,64	18,82	18,54	18,81	19,50	19,05	19,79	20,33	12,56	12,13	12,02	11,62
COIHUECO EMBALSE DGA	28,72	28,66	29,47	29,43	20,22	20,54	20,27	21,20	20,42	20,38	20,36	21,20	13,73	13,34	13,23	12,42
DIGUILLIN DGA	25,29	24,48	24,51	25,11	17,70	17,26	16,52	17,11	18,65	18,68	18,75	19,60	12,88	12,34	11,29	11,62
PARQUE NAHUEL BUTA DGA	s/i	s/i	20,84	21,29	s/i	s/i	14,99	15,14	s/i	s/i	16,90	16,01	s/i	s/i	9,47	8,74
ALTO MALLINES	s/i	s/i	s/i	19,35	s/i	s/i	10,71	10,86	s/i	s/i	13,15	13,04	s/i	s/i	8,61	5,71
RIO BIOBIO EN LA CULEBRA DGA	s/i	s/i	s/i	25,16	s/i	s/i	s/i	17,58	s/i	s/i	s/i	18,86	s/i	s/i	s/i	11,88
RIO HUEQUECURA AGUAS ARRIBA EMBALSE ANGOSTURA DGA	s/i	s/i	s/i	25,67	s/i	s/i	s/i	17,82	s/i	s/i	s/i	17,92	s/i	s/i	s/i	11,82
QUILACO DGA	27,84	27,11	27,44	28,58	20,17	19,86	19,41	20,63	20,42	20,12	18,09	20,41	14,36	13,25	12,72	12,87
CONTULMO DGA	s/i	s/i	s/i	23,87	19,11	17,67	16,93	17,54	s/i	18,67	s/i	20,56	14,66	14,02	12,91	12,66

Regiones de Ñuble y Biobío

Precipitación media acumulada por estación climática (mm)

ESTACIÓN	85' - '90	91' - 00'	01' - 10'	11' - 20'
ALGARROBO	s/i	s/i	s/i	243,40
ALICAHUE	233,85	199,02	254,33	143,24
CANAL COLORADO EN BOCATOMA	s/i	s/i	s/i	212,37
CASABLANCA	431,67	342,74	376,88	207,69
CATEMU	221,30	236,84	237,83	166,25
CERRILLOS DE LEYDA	338,92	394,78	437,51	252,89
CERRO COLORADO ARMADA	s/i	s/i	s/i	368,52
COLLIGUAY	536,72	569,54	591,38	403,42
EL COBRE	269,90	294,63	319,16	224,32
EL TARTARO	96,40	212,10	235,13	127,00
ESTERO QUINTERO EN VALLE VERDE	s/i	s/i	115,75	214,87
ESTERO RABUCO	316,05	368,39	346,03	250,73
FUNDO LAS DOS PUERTAS	169,50	381,27	448,67	279,89
JAHUEL	43,30	218,81	226,44	122,84
LA MOSTAZA	249,93	261,31	284,65	165,30
LAGO PEUELAS	515,40	600,70	602,69	437,83
LAGUNA DE ZAPALLAR	290,70	267,12	253,87	192,18
LAGUNILLAS	380,90	333,60	366,71	216,92
LAS PATAGUAS	299,77	302,95	297,48	186,24
LAS PIEDRAS	s/i	393,96	328,50	293,09
LAS SALINAS	s/i	s/i	s/i	133,01
LLIU LLIU EMBALSE	429,13	503,01	453,30	264,37
LO ROJAS	336,88	341,92	383,90	241,16
LOS ANDES	188,02	221,43	237,43	143,42
LOS AROMOS	303,75	380,46	361,83	274,61
MINA CERRO NEGRO	271,78	248,32	286,10	186,16
QUEBRADA ALVARADO	105,80	416,68	448,05	271,57
QUILLOTA	284,97	280,20	337,10	182,86
RIECILLOS	327,75	457,68	524,43	222,40
RIO ACONCAHUA EN CHACABUQUITO	s/i	199,75	260,62	135,49
RIO ACONCAHUA EN RIO BLANCO	s/i	s/i	s/i	192,95
RIO ACONCAHUA EN ROMERAL	s/i	132,50	240,06	163,42
RIO ACONCAHUA EN SAN FELIPE	s/i	285,10	173,41	89,23
RIO ALICAHUE DEL COLLIGUAY	s/i	s/i	185,84	83,17
RIO JUNCAL EN JUNCAL	s/i	s/i	s/i	117,56
RIO MAIPO EN CABIMBAO	s/i	s/i	s/i	163,18
RODELILLO	363,15	441,75	473,70	251,10
SAN ANTONIO PTA PANUL	337,92	332,90	348,75	222,12
SAN FELIPE	181,47	190,90	225,56	117,58
TAPIHUE	194,20	375,74	390,61	267,29
VILCUYA	308,37	291,37	309,36	190,83

Región de Valparaíso

ESTACIÓN	85' - '90	91' - 00'	01' - 10'	11' - 20'
AGUA FRIA	s/i	948,51	1066,44	673,04
ANCOA EMBALSE	1154,78	1251,34	1311,25	981,17
ARMERILLOS	1657,05	1783,87	1871,60	1262,39
COLORADO	1009,68	1046,53	1159,43	855,50
CONSTITUCION	s/i	441,72	672,00	505,30
CURICO	463,05	554,23	570,86	393,34
DIGUA EMBALSE	998,53	1128,03	1152,63	816,70
EL ALAMO	s/i	607,36	730,14	550,11
EL DURAZNO	s/i	582,31	779,60	594,93
EL GUINDO	483,35	499,41	614,41	491,46
EL MANZANO	786,83	1052,56	1131,55	665,31
FUNDO EL RADAL	s/i	1349,02	1561,36	969,11
HORNILLO	1516,78	1667,16	1795,13	1054,76
HUAPI	722,73	682,85	791,72	607,98
JUAN AMIGO	s/i	1089,51	1266,80	936,64
LA ESTRELLA	s/i	476,32	577,15	429,73
LAGUNA DE TORCA	s/i	s/i	s/i	378,63
LIGUAY	695,40	781,51	713,29	505,84
LINARES	668,65	667,76	688,46	566,53
LONTUE	500,85	495,18	547,05	358,36
MELOZAL	557,00	585,94	581,79	431,85
MONTE OSCURO	s/i	1157,93	1220,70	746,31
NIRIVILO	649,32	593,72	707,56	481,56
PARRAL	715,55	731,31	758,16	554,13
PENCAHUE	384,30	515,89	556,81	387,59
POTRERO GRANDE	732,48	886,94	973,97	571,91
PUTU	s/i	524,74	702,94	581,41
QUELLA	524,42	560,06	520,89	393,72
RIO ANCOA EN EL MORRO	s/i	1491,15	1328,26	827,20
RIO CLARO EN RAUQUEN	s/i	347,50	525,21	386,12
RIO CLARO EN SAN CARLOS	s/i	s/i	s/i	1076,64
RIO LONGAVI EN LA QUIRIQUINA	s/i	s/i	1186,66	891,47
RIO MATAQUITO EN LICANTEN	s/i	s/i	641,69	423,39
RIO MAULE EN ARMERILLOS	s/i	s/i	1689,67	1157,87
RIO MAULE EN FOREL	s/i	s/i	784,01	558,74
RIO MELADO EN LA LANCHA DGAC	1495,75	1658,63	2351,15	s/i
SAN JAVIER	579,13	563,22	594,25	488,05
SAN RAFAEL	s/i	481,66	636,9	409,14
TALCA	497,05	493,67	522,47	389,16
VILCHES ALTO	s/i	1248,20	1463,71	1090,11
VILLA PRAT	s/i	484,91	421,06	334,14

ESTACIÓN	85' - '90	91' - 00'	01' - 10'	11' - 20'
LAS CRUCES	s/i	1320,21	1443,23	1109,24
MANGARRAL	s/i	612,53	712,01	563,40
SAN CARLOS DE PUREN	815,30	858,42	896,82	606,73
LOS ANGELES	712,90	804,62	867,04	662,89
LAJA	694,30	720,31	945,02	618,30
QUILACO	1011,18	1113,90	1017,17	862,02
TRUPAN	1002,10	1272,14	1227,55	1006,03
CARAMPANGUE	s/i	s/i	918,40	716,18
CERRO EL PADRE	1330,52	1534,77	1432,49	1264,68
DICHATO	772,23	697,59	766,34	642,89
QUILLAILEO	s/i	1312,74	1530,26	1417,76
TUCAPEL	1083,62	1203,50	1140,00	831,34
CONTULMO	745,33	1091,08	1064,50	816,12
LAS PATAGUAS	s/i	752,40	742,50	760,97
MULCHEN	833,22	950,06	970,92	789,78
PILGUEN	s/i	1041,94	1261,14	1042,48
RAFAEL	s/i	1100,79	994,93	1043,90

Regiones del Ñuble y Biobío