



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

**PROPUESTA DE REQUISITOS NORMATIVOS DE DURABILIDAD DE
HORMIGONES. CONSIDERACIONES DEL CAMBIO CLIMÁTICO Y DE
VIDA ÚTIL**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

RICARDO ANDRÉS VARGAS CALDERÓN

PROFESORA GUÍA:
CARMEN MUÑOZ EFFA

PROFESORES DE LA COMISIÓN:
PEDRO LEIVA SANTANDER
ADOLFO OCHOA LLANGATO

SANTIAGO DE CHILE
2022

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
POR: RICARDO ANDRÉS VARGAS CALDERÓN
FECHA: 2022
PROF. GUÍA: CARMEN MUÑOZ EFFA

PROPUESTA DE REQUISITOS NORMATIVOS DE DURABILIDAD DE HORMIGONES. CONSIDERACIONES DEL CAMBIO CLIMÁTICO Y DE VIDA ÚTIL

El objetivo principal de este trabajo de tesis es realizar, de ser necesaria, una propuesta de requisitos normativos de durabilidad de hormigones, analizando los efectos que trae consigo el cambio climático y sus consecuencias en los agentes de ataque externos del hormigón (Congelación-deshielo, ataque por sulfatos, ataque por corrosión de la armadura) planteado en un futuro de 25-50 años.

Al relacionar el cambio climático y sus consecuencias con los agentes de ataque externos del hormigón, se observan correlaciones entre los agentes de ataque externos del hormigón y tres factores climáticos clave: La temperatura (máximas, mínimas, promedio, días de hielo y días de escarcha), la humedad relativa (máxima y mínima) y las precipitaciones (acumuladas).

Se utilizan tres plataformas nacionales para la obtención de los datos actuales y dos de ellas para obtener las proyecciones a futuro con las consecuencias del cambio climático, sin embargo, los datos de sólo una de ellas (Explorador de amenazas climáticas, ARCLIM) son considerados en los resultados. Además, de los datos actuales de niveles de cloruro, dióxido de carbono y sulfato atmosféricos no se encontraron proyecciones que involucren el cambio climático.

Finalmente, debido al cambio climático, como proyección promedio entre los años 2035 y 2065, a nivel nacional aumentan las temperaturas mínimas, medias y máximas, los niveles de humedad relativa se mantienen estables y con variaciones porcentuales de -2 a +2%, las lluvias acumuladas ven aumentados sus niveles en el sector sur de Chile a lo largo del año, sin embargo, en el sector norte y altiplánico disminuyen en la temporada de verano.

En conclusión, el ataque externo de congelación-deshielo disminuye sus probabilidades de producirse, principalmente por el aumento de temperaturas. Para la sulfatación y la corrosión de la armadura no se lograron realizar estimaciones futuras al no tener proyecciones de datos futuros asociados al cambio climático. Es por esto que la realización de una propuesta de modificación de la normativa actual se concluye como no necesaria de parte de la congelación-deshielo e insuficiente información para los otros agentes de ataque.

*Sin importar el problema que te abrume,
siempre habrá una luz de salida para un buen final.*

Agradecimientos

Hay tanto que agradecer en este hermoso y doloroso camino, que no hay pro donde empezar. Como dicen que la familia es lo primero, comencare por la familia de sangre:

Mi madre, Cecilia Calderón, que siempre me ha apoyado, desde su forma de ser, a ser siempre mejor y lograr mis objetivos. Quizás no fuimos tan cercanos el uno con el otro, debido a la separación de mis viejos, pero siempre me recordó de mil maneras lo mucho que me ama.

Mi viejo, Ricardo Vargas, ayayay! tanto dolor que me causaste al final de este camino que estuve a punto no querer terminarlo y lo alargué lo más que pude. Lamento de todo corazón que no puedas estar ahora que estoy a punto de terminar y no puedas ver lo que juntos logramos. Gracias totales porque soy quien soy gracias a ti, a tus retos y tus sonrisas. A tus sacrificios y las veces que te quedaste sin comer para tener mis materiales para el colegio. Lo diste todo y hoy solo puedo decir muchas gracias. Te extraño, pero sé que la vida continua y el éxito que pueda tener es gracias a ti y mi mami.

Bueno, ahora hay que pasar de lo sad, secarse las lagrimitas y sonreír. Gracias a todos y todas las hermosas personas que conocí en este camino, partiendo por mis panas de la casa, los cabros con los que pasé horas en la chancha, destacando al Dante porque hasta hoy, siempre amigos. Mención honrosa a quienes espero tener hasta el último de mis días: el Vladen y el Nayo, ustedes saben cuánto los quiero y las felicidades que hemos tenido.

Pasando por bachi hice muchos amigos y amigas, pasé por muchos grupos diferentes y tengo cariño guardado en mi corazón por todos y cada uno de ellos. Si me pongo a nombrar a cada persona que fue importante, se me acabará el espacio, pero cada carrete, cada junta de estudio durante esos 2 años de bachi saben de quienes hablo y lo bien que lo pasamos. Mención honrosa a quienes por cosas de la vida sigo viendo y pasando buenos momentos: Ile y Berni.

Desde la entrada a beauchef encontré mi segunda familia y ojala con quienes pueda seguir conviviendo hasta el final. Agradezco cada día la presencia de los cucarachos en mi vida, el Pocho, Juanca, Aiyon, Jose, Gabsy, el Javi, Bruno, Nacho, Joaco, la Piru. Entre todos son un pilar fundamental y con quienes sé que puedo dar la vida si fuera necesario. Los tkm.

Agradezco a las personas que conocí en civil, al grupito de los coronados; que gran manera de carretear, jugar a la pelota y pasarla bien. Tengo que hacer una mención honrosa aquí al Mati Boche sólo porque vive cerca y apaña a todas este maldito. También conocí personas muy lindas como la Clau y la Karla que siempre están presentes.

Finalmente, agradezco también a mi familia, mis hermanas Maggy y Paty que siempre están apoyando a pesar de vivir ocupadas. A mi hermano Mati que siempre apaña a todas cada vez que nos necesitamos y nos cuidamos el uno al otro. Y cada persona de mi familia que me ha apoyado aunque sea con un "tu puedes".

Para terminar, la persona que me ha aguantado estos últimos 3 años y me ha dado de su amor incondicional. Quien ha sacado lo mejor de mi y me ha permitido crecer de una manera que yo ni pensé que pasaría. Una mujer maravillosa y capaz de todo lo que pase por su mente: La Coni. Palabras me sobran para decirte lo mucho que te amo y lo agradecido que estoy de cada minuto a tu lado. Eres tan fuerte que no logras verlo tu misma, pero algún día todas tus fortalezas y perseverancias darán frutos. Te amo.

Gracias a cada persona que nombre y cada una que por espacio no puedo nombrar. Todos aportan su granito de arena para que en un futuro cercano (espero) yo pueda decir que soy Ingeniero Civil y recorrí un camino maravilloso.

PD: Lamento si olvidé a alguien, pero como siempre, estoy haciendo esto a minutos de la entrega. Ya todos me conocen y siempre hago las cosas así (de verdad espero cambiar algún día este mal hábito).

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo general	2
1.2.2. Objetivos específicos	2
1.3. Alcances	2
1.4. Resultados esperados	2
2. Marco Teórico	4
2.1. Cambio climático	4
2.2. El hormigón	8
2.2.1. La durabilidad del hormigón	9
2.2.2. Vida útil	10
2.3. Agentes de ataque afectados por el cambio climático	11
2.3.1. Congelación y Deshielo	11
2.3.2. Ataque por sulfatos	13
2.3.3. Ataque por corrosión de la armadura	13
2.3.3.1. Carbonatación	14
2.3.3.2. Ataque por cloruros	14
3. Antecedentes	16
3.1. Normativa Chilena	16
3.1.1. Congelación y deshielo	16
3.1.2. Ataque por sulfatos	17
3.1.3. Ataque por corrosión de la armadura	18
3.2. Zonificación chilena respecto a grados de exposición	18
3.2.1. Congelación y deshielo	19
3.2.2. Ataque externo por sulfatos	20
3.2.3. Ataque de agentes que provocan corrosión	22
3.3. Programas/plataformas interactivas a utilizar	23
3.3.1. Mapas de corrosión atmosféricos	23
3.3.2. Explorador de Amenazas Climáticas - ARCLIM	24
4. Metodología	26
4.1. Obtención de datos actuales	26
4.2. Obtención de proyecciones de datos	27
4.3. Análisis de agentes de ataque respecto a las variaciones generadas a futuro	27
4.3.1. Congelación y deshielo	27

4.3.2.	Ataque por sulfatos	28
4.3.3.	Ataque por corrosión de la armadura	28
4.4.	Nueva zonificación para futuro	28
4.5.	Propuesta de normativa	29
5.	Resultados	30
5.1.	Congelación y deshielo	30
5.1.1.	Arica y Parinacota	31
5.1.2.	Valparaíso	32
5.1.3.	Magallanes	33
5.1.4.	Zonificación de grados de exposición en futuro - Congelación-deshielo	33
5.2.	Ataque por sulfatos	34
5.2.1.	Arica y Parinacota	35
5.2.2.	Región Metropolitana	36
5.2.3.	Ñuble	37
5.2.4.	Magallanes	38
5.2.5.	Norte grande y altiplano chileno	39
5.2.6.	Norte chico	39
5.2.7.	Chile central	40
5.2.8.	Sur	40
5.2.9.	Magallanes y antártica chilena	41
5.2.10.	Arica	41
5.2.11.	Tarapacá	42
5.2.12.	Ñuble	42
5.3.	Ataque por corrosión de la armadura	43
5.3.1.	Arica	43
5.3.2.	Atacama	44
5.3.3.	Bío bío	44
5.3.4.	Norte grande y altiplano chileno	45
5.3.5.	Norte chico	45
5.3.6.	Chile central	46
5.3.7.	Sur	46
5.3.8.	Magallanes y antártica chilena	47
5.4.	Estimaciones futuras de CO_2	47
5.4.1.	Zonificación de grados de exposición en futuro - Carbonatación	49
	Análisis de resultados	51
	Conclusiones	54
	Bibliografía	56
	Anexos	58
A.	Congelación y Deshielo	59
A.1.	Tarapacá	60
A.2.	Antofagasta	61
A.3.	Atacama	62

A.4. Coquimbo	63
A.5. Región Metropolitana	64
A.6. O'higgins	65
A.7. Maule	66
A.8. Ñuble	67
A.9. Bío Bío	68
A.10. Araucanía	69
A.11. De los ríos	70
A.12. De los lagos	71
A.13. Aysén	72
B. Sulfatación	74
B.1. Tarapacá	75
B.2. Antofagasta	76
B.3. Atacama	77
B.4. Coquimbo	78
B.5. Valparaíso	79
B.6. O'higgins	80
B.7. Maule	81
B.8. Bío Bío	82
B.9. Araucanía	83
B.10. De los ríos	84
B.11. De los lagos	85
B.12. Aysén	86
B.13. Niveles de humedad para carbonatación	86
B.14. Tarapacá	87
B.15. Antofagasta	87
B.16. Valparaíso	88
B.17. Región Metropolitana	88
B.18. O'higgins	89
B.19. Maule	89

Índice de Tablas

2.1.	Resistencias de materiales típicamente utilizados en construcción. Fuente: Elaboración propia.	8
2.2.	Acciones que inciden directamente en las estructuras	10
3.1.	Requisitos del hormigón sometido a la acción de congelación y deshielo. Fuente: NCh170-2016.	16
3.2.	Grados de exposición por sulfatos. Fuente: NCh170-2016.	17
3.3.	Requisitos del hormigón en contacto con sulfatos. Fuente: NCh170-2016.	17
3.4.	Grados de exposición que provocan corrosión. Fuente: NCh170-2016.	18
3.5.	Requisitos del hormigón según grado de exposición. Fuente: NCh170-2016.	18
3.6.	Zonificación correspondiente al ataque externo por Sulfatos. Fuente: Vilches Hernández, 2020.	20
5.1.	Grados de exposición de cada región de Chile para el agente de ataque externo "Congelación y deshielo". Fuente: (Elaboración propia).	34
5.2.	Grados de exposición presente y futuro de carbonatación debido a la presencia de CO_2 atmosférico, utilizando las estimaciones de dióxido de carbono. Fuente: (Elaboración propia).	50
A.1.	Promedio de la variación porcentual mensual de lluvias acumuladas en cada región de Chile, entre el periodo actual [1980-2010] y la proyección futura RCP 8.5 [2035-2065].	72
A.2.	Promedio de la variación porcentual mensual de cantidad de ciclos congelación-deshielo en cada región de Chile, entre el periodo actual [1980-2010] y la proyección futura RCP 8.5 [2035-2065].	73

Índice de Ilustraciones

2.1.	Emisiones antropógenas anuales totales de GEI por gases, 1970-2010. Fuente: (IPCC, 2014).	5
2.2.	Emisiones antropógenas totales de CO_2 , con proyecciones futuras que incluyen los 4 escenarios. Fuente: (IPCC, 2014).	6
2.3.	Proyección del aumento anual de la temperatura media en superficie para RCP2,6 y 8,5. Fuente: (IPCC, 2014).	7
2.4.	Proyección del aumento anual del nivel medio del mar para RCP2,6 y 8,5. Fuente: (IPCC, 2014).	7
2.5.	Proyección de la variación anual de las precipitaciones para RCP2,6 y 8,5. Fuente: (IPCC, 2014).	8
3.1.	Zonificación Nacional para determinar el Grado de Exposición por la Acción de Ciclos de Congelación y Deshielo. Fuente: Peyresblanques A., Ignacio, 2019. . .	19
3.2.	Zonificación correspondiente al ataque externo por Sulfatos, representado en forma gráfica. Fuente: (Elaboración propia en base a datos de E. Vilches, 2020)	21
3.3.	Zonificación de ataques externos que provocan corrosión en acero durante 12 meses. Fuente: Proyecto INNOVA: Construcción de mapas de corrosividad atmosférica de Chile.	22
3.4.	Plataforma interactiva del proyecto INNOVA. Fuente: Proyecto INNOVA: Construcción de mapas de corrosividad atmosférica de Chile.	23
3.5.	Imagen referencial del explorador de amenazas climáticas, ARCLIM. Fuente: Plataforma virtual Atlas de Riesgo Climático: Explorador de Amenazas.	25
5.1.	Promedios de (a) precipitaciones y (b) cantidad de ciclos mensuales de las provincias de la región de Arica y Parinacota en el presente [1980-2010] y el futuro RCP 8.5 [2035-2065]. Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos del Explorador de Amenazas Climáticas.	31
5.2.	Promedios de (a) precipitaciones y (b) cantidad de ciclos mensuales de las provincias de la región de Valparaíso en el presente [1980-2010] y el futuro RCP 8.5 [2035-2065]. Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos del Explorador de Amenazas Climáticas.	32
5.3.	Promedios de (a) precipitaciones y (b) cantidad de ciclos mensuales de las provincias de la región de Magallanes en el presente [1980-2010] y el futuro RCP 8.5 [2035-2065]. Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos del Explorador de Amenazas Climáticas.	33
5.4.	Promedios de (a) humedad relativa y (b) temperatura media mensual de las provincias de la región de Arica y Parinacota en el presente [1980-2010] y el futuro RCP 8.5 [2035-2065]. Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos del Explorador de Amenazas Climáticas.	35

5.5.	Promedios de (a) humedad relativa y (b) temperatura media mensual de las provincias de la región Metropolitana en el presente [1980-2010] y el futuro RCP 8.5 [2035-2065]. Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos del Explorador de Amenazas Climáticas.	36
5.6.	Promedios de (a) humedad relativa y (b) temperatura media mensual de las provincias de la región de Ñuble en el presente [1980-2010] y el futuro RCP 8.5 [2035-2065]. Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos del Explorador de Amenazas Climáticas.	37
5.7.	Promedios de (a) humedad relativa y (b) temperatura media mensual de las provincias de la región de Magallanes en el presente [1980-2010] y el futuro RCP 8.5 [2035-2065]. Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos del Explorador de Amenazas Climáticas.	38
5.8.	Niveles de SO_2 [$mg/m^2 - dia$] en las zonas del altiplano chileno y el norte grande. Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos del Mapa de corrosión atmosférica de Chile, proyecto INNOVA.	39
5.9.	Niveles de SO_2 [$mg/m^2 - dia$] en la zona del norte chico chileno. Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos del Mapa de corrosión atmosférica de Chile, proyecto INNOVA.	39
5.10.	Niveles de SO_2 [$mg/m^2 - dia$] en la zona de Chile central. Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos del Mapa de corrosión atmosférica de Chile, proyecto INNOVA.	40
5.11.	Niveles de SO_2 [$mg/m^2 - dia$] en la zona sur de Chile. Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos del Mapa de corrosión atmosférica de Chile, proyecto INNOVA.	40
5.12.	Niveles de SO_2 [$mg/m^2 - dia$] en la zona extremo sur de Chile. Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos del Mapa de corrosión atmosférica de Chile, proyecto INNOVA.	41
5.13.	Emisiones, absorciones y balance de CO_2 [kt] en la región de Arica. Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos del inventario regional del 4° informe bienal de actualización de Chile sobre el cambio climático.	41
5.14.	Emisiones, absorciones y balance de CO_2 [kt] en la región de Tarapacá. Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos del inventario regional del 4° informe bienal de actualización de Chile sobre el cambio climático.	42
5.15.	Emisiones, absorciones y balance de CO_2 [kt] en la región de Ñuble. Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos del inventario regional del 4° informe bienal de actualización de Chile sobre el cambio climático.	42
5.16.	Humedad relativa mensual [%] en la región de Arica. Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos del Explorador de Amenazas Climáticas.	43
5.17.	Humedad relativa mensual [%] en la región de Atacama. Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos del Explorador de Amenazas Climáticas.	44
5.18.	Humedad relativa mensual [%] en la región de Bío bío. Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos del Explorador de Amenazas Climáticas.	44
5.19.	Cantidad de días al mes en que la temperatura mínima es menor a $0^\circ c$, como promedio de las provincias que componen el altiplano chileno y el norte grande. Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos del Explorador de Amenazas Climáticas.	45

5.20.	Cantidad de días al mes en que la temperatura mínima es menor a 0°c, como promedio de las provincias que componen el norte chico chileno. Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos del Explorador de Amenazas Climáticas.	45
5.21.	Cantidad de días al mes en que la temperatura mínima es menor a 0°c, como promedio de las provincias que componen Chile central. Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos del Explorador de Amenazas Climáticas.	46
5.22.	Cantidad de días al mes en que la temperatura mínima es menor a 0°c, como promedio de las provincias que componen la zona sur de Chile. Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos del Explorador de Amenazas Climáticas.	46
5.23.	Cantidad de días al mes en que la temperatura mínima es menor a 0°c, como promedio de las provincias que componen la zona extremo sur de Chile. Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos del Explorador de Amenazas Climáticas.	47
5.24.	Estimación de niveles de CO_2 atmosférico mediante la utilización de una regresión cuadrática para las regiones de Antofagasta, Atacama, Maule, Bío bio y la Araucanía. Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos del inventario regional del 4° informe bienal de actualización de Chile sobre el cambio climático.	47
5.25.	Estimación de niveles de CO_2 atmosférico mediante la utilización de una regresión cuadrática para las regiones de Arica y Parinacota, Ñuble y Coquimbo. Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos del inventario regional del 4° informe bienal de actualización de Chile sobre el cambio climático.	48
5.26.	Estimación de niveles de CO_2 atmosférico mediante la utilización de una regresión cuadrática para las regiones de Tarapacá, O'higgins, Los ríos, Aysén y Magallanes. Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos del inventario regional del 4° informe bienal de actualización de Chile sobre el cambio climático.	48
5.27.	Estimación de niveles de CO_2 atmosférico mediante la utilización de una regresión cuadrática para las regiones de Valparaíso, Región Metropolitana y Los lagos. Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos del inventario regional del 4° informe bienal de actualización de Chile sobre el cambio climático.	49
A.1.	Promedios de (a) precipitaciones y (b) cantidad de ciclos mensuales de las provincias de la región de Tarapacá en el presente [1980-2010] y el futuro RCP 8.5 [2035-2065]	60
A.2.	Promedios de (a) precipitaciones y (b) cantidad de ciclos mensuales de las provincias de la región de Antofagasta en el presente [1980-2010] y el futuro RCP 8.5 [2035-2065]	61
A.3.	Promedios de (a) precipitaciones y (b) cantidad de ciclos mensuales de las provincias de la región de Atacama en el presente [1980-2010] y el futuro RCP 8.5 [2035-2065]	62
A.4.	Promedios de (a) precipitaciones y (b) cantidad de ciclos mensuales de las provincias de la región de Coquimbo en el presente [1980-2010] y el futuro RCP 8.5 [2035-2065]	63
A.5.	Promedios de (a) precipitaciones y (b) cantidad de ciclos mensuales de las provincias de la región Metropolitana en el presente [1980-2010] y el futuro RCP 8.5 [2035-2065]	64
A.6.	Promedios de (a) precipitaciones y (b) cantidad de ciclos mensuales de las provincias de la región de O'higgins en el presente [1980-2010] y el futuro RCP 8.5 [2035-2065]	65

A.7.	Promedios de (a) precipitaciones y (b) cantidad de ciclos mensuales de las provincias de la región del Maule en el presente [1980-2010] y el futuro RCP 8.5 [2035-2065]	66
A.8.	Promedios de (a) precipitaciones y (b) cantidad de ciclos mensuales de las provincias de la región de Ñuble en el presente [1980-2010] y el futuro RCP 8.5 [2035-2065]	67
A.9.	Promedios de (a) precipitaciones y (b) cantidad de ciclos mensuales de las provincias de la región del Bío Bío en el presente [1980-2010] y el futuro RCP 8.5 [2035-2065]	68
A.10.	Promedios de (a) precipitaciones y (b) cantidad de ciclos mensuales de las provincias de la región de la Araucanía en el presente [1980-2010] y el futuro RCP 8.5 [2035-2065]	69
A.11.	Promedios de (a) precipitaciones y (b) cantidad de ciclos mensuales de las provincias de la región De los ríos en el presente [1980-2010] y el futuro RCP 8.5 [2035-2065]	70
A.12.	Promedios de (a) precipitaciones y (b) cantidad de ciclos mensuales de las provincias de la región De los lagos en el presente [1980-2010] y el futuro RCP 8.5 [2035-2065]	71
A.13.	Promedios de (a) precipitaciones y (b) cantidad de ciclos mensuales de las provincias de la región de Aysén en el presente [1980-2010] y el futuro RCP 8.5 [2035-2065]	72
B.1.	Promedios de (a) humedad relativa y (b) temperatura media mensual de las provincias de la región de Tarapacá en el presente [1980-2010] y el futuro RCP 8.5 [2035-2065]	75
B.2.	Promedios de (a) humedad relativa y (b) temperatura media mensual de las provincias de la región de Antofagasta en el presente [1980-2010] y el futuro RCP 8.5 [2035-2065]	76
B.3.	Promedios de (a) humedad relativa y (b) temperatura media mensual de las provincias de la región de Atacama en el presente [1980-2010] y el futuro RCP 8.5 [2035-2065]	77
B.4.	Promedios de (a) humedad relativa y (b) temperatura media mensual de las provincias de la región de Coquimbo en el presente [1980-2010] y el futuro RCP 8.5 [2035-2065]	78
B.5.	Promedios de (a) humedad relativa y (b) temperatura media mensual de las provincias de la región de Valparaíso en el presente [1980-2010] y el futuro RCP 8.5 [2035-2065]	79
B.6.	Promedios de (a) humedad relativa y (b) temperatura media mensual de las provincias de la región de O'higgins en el presente [1980-2010] y el futuro RCP 8.5 [2035-2065]	80
B.7.	Promedios de (a) humedad relativa y (b) temperatura media mensual de las provincias de la región del Maule en el presente [1980-2010] y el futuro RCP 8.5 [2035-2065]	81
B.8.	Promedios de (a) humedad relativa y (b) temperatura media mensual de las provincias de la región del Bío Bío en el presente [1980-2010] y el futuro RCP 8.5 [2035-2065]	82

B.9.	Promedios de (a) humedad relativa y (b) temperatura media mensual de las provincias de la región de la Araucanía en el presente [1980-2010] y el futuro RCP 8.5 [2035-2065]	83
B.10.	Promedios de (a) humedad relativa y (b) temperatura media mensual de las provincias de la región De los ríos en el presente [1980-2010] y el futuro RCP 8.5 [2035-2065]	84
B.11.	Promedios de (a) humedad relativa y (b) temperatura media mensual de las provincias de la región De los lagos en el presente [1980-2010] y el futuro RCP 8.5 [2035-2065]	85
B.12.	Promedios de (a) humedad relativa y (b) temperatura media mensual de las provincias de la región de Aysén en el presente [1980-2010] y el futuro RCP 8.5 [2035-2065]	86
B.13.	Humedad relativa mensual [%] en la región de Tarapacá.	87
B.14.	Humedad relativa mensual [%] en la región de Antofagasta.	87
B.15.	Humedad relativa mensual [%] en la región de Valparaíso.	88
B.16.	Humedad relativa mensual [%] en la región Metropolitana.	88
B.17.	Humedad relativa mensual [%] en la región de O'higgins.	89
B.18.	Humedad relativa mensual [%] en la región del Maule.	89

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

En el marco y desarrollo del área de la construcción, el hormigón, el acero y la madera han sido los elementos más utilizados y fiables a lo largo del tiempo. Esto es debido a que estos elementos, distribuidos de forma adecuada, permiten resistir cargas estructurales bastante altas. Sin embargo, una de las características que permite destacar de sobremanera al hormigón es su capacidad de ser moldeado.

Es por esto último que el hormigón es el material preferido a utilizar en construcciones que requieren altos esfuerzos. Sin embargo, el foco de atención en cuanto a investigaciones siempre ha sido mejorar las resistencias que este tiene, es decir, que resista mayores cargas sin aumentar en gran cantidad sus dimensiones y peso. Un ejemplo de esto es la implementación de (la técnica o tecnología) hormigones pretensados, donde el hormigón es sometido a tensiones previas de compresión mediante la utilización de barras de acero, con el fin de resistir de mejor manera los esfuerzos de tensión. De esta manera, los hormigones presentan una mayor resistencia a las cargas de tracción (uno de sus puntos débiles), comparados con hormigones no pretensados.

Con este preámbulo, y desde el otro punto de vista, se localiza la necesidad de ahondar en las investigaciones de la durabilidad y vida útil del hormigón, mas no en sus resistencias. Es decir, localizar los factores que debilitan y disminuyen la vida útil de los hormigones actualmente, para así prevenirlo y adaptarlo. En este hilo, el cambio climático ha tomado una importancia significativa, pues dentro de sus consecuencias pueden existir las variaciones climáticas que influyen directamente en los agentes externos, que, a futuro, producen las fallas en la durabilidad de los hormigones, disminuyendo su vida útil.

El aumento de las temperaturas que ha generado últimamente el cambio climático es una consecuencia que, según el IPCC (siglas en inglés de Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático), seguirá ocurriendo y cada año de forma más acelerada si no se realizan esfuerzos para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero. Por lo tanto, entre otros aspectos, los ciclos de hielo y deshielo (uno de los agentes de ataque externos del hormigón), podrían tener modificaciones a futuro en muchas zonas de Chile donde este aumento de temperatura sea importante.

Así como los ciclos de hielo y deshielo, los demás agentes de ataque internos del hormigón pueden verse afectados directamente por las consecuencias del cambio climático.

Es por esto que se ha de focalizar la investigación de este trabajo en una proyección de los cambios generados por el cambio climático, en cuanto a cómo afectan la durabilidad y vida útil del hormigón, con el objetivo de prever posibles variaciones de los agentes de ataque externos del hormigón y prepararse para ello.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

- Proyectar las consecuencias que genera el cambio climático, en cuanto a los agentes de ataque externos del hormigón, con el fin de analizar y proponer una modificación a la normativa actual sobre su vida útil y durabilidad, en caso de ser necesario.

1.2.2. Objetivos específicos

- Revisar un modelo de cambio climático y los cambios generados en agentes externos para el hormigón.
- Modelar las consecuencias que genera el cambio climático en cuanto a los agentes de ataque externos para el hormigón.
- Revisar normativa actual chilena respecto a los parámetros de vida útil, durabilidad y agentes externos.
- Discernir si es necesario, o no, realizar una propuesta de modificaciones para adecuar la normativa sobre agentes de ataque externos del hormigón.

1.3. Alcances

Se busca proponer criterios que permiten adecuar las especificaciones de la norma a las consecuencias del cambio climático y enfatizar el ataque de agentes externos en cuanto a la durabilidad del hormigón, con el objetivo de hacer de la vida útil un parámetro a considerar en la normativa.

1.4. Resultados esperados

Establecimiento de una relación entre la durabilidad del hormigón y los agentes de ataque externos:

- CO_2
- Cloruros
- Sulfatos

- Congelación y deshielo

Establecimiento de una relación entre los agentes de ataque externo y los parámetros que pueden variar con el cambio climático, estos últimos son:

- Temperatura
- Humedad relativa
- Niveles de precipitación

Proyección de una visión a futuro lejano (50 años) de la trayectoria con mayores índices de emisiones de gases de efecto invernadero (peor escenario posible) de los parámetros recientemente mencionados debido al cambio climático.

Establecimiento de una nueva zonificación para los futuros respectivos.

Propuesta de consideración de adaptación de la normativa chilena, considerando la vida útil/Durabilidad como parámetro de salida.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Cambio climático

Desde 1950 el calentamiento del sistema climático alrededor del mundo ha sido evidente. A partir de esta fecha, se han observado disminuciones de los volúmenes de hielo y nieve, aumento del nivel del mar, aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero y el calentamiento de la atmósfera y el océano (IPCC, 2013).

Según el IPCC (2014), las emisiones de gases de efecto invernadero emitidas por el ser humano han ido en aumento desde la era preindustrial en post del crecimiento económico. Hoy en día, y cada año, los niveles de emisiones de gases de efecto invernadero son mayores que los años anteriores.

Una de las consecuencias de estas emisiones son las concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono, óxido nítrico, sulfatos y metano cuyos niveles superan excesivamente los niveles preindustriales. Estas emisiones de carácter antropógeno son la causa dominante del calentamiento observado a partir de la segunda mitad del siglo XX (p. 4).

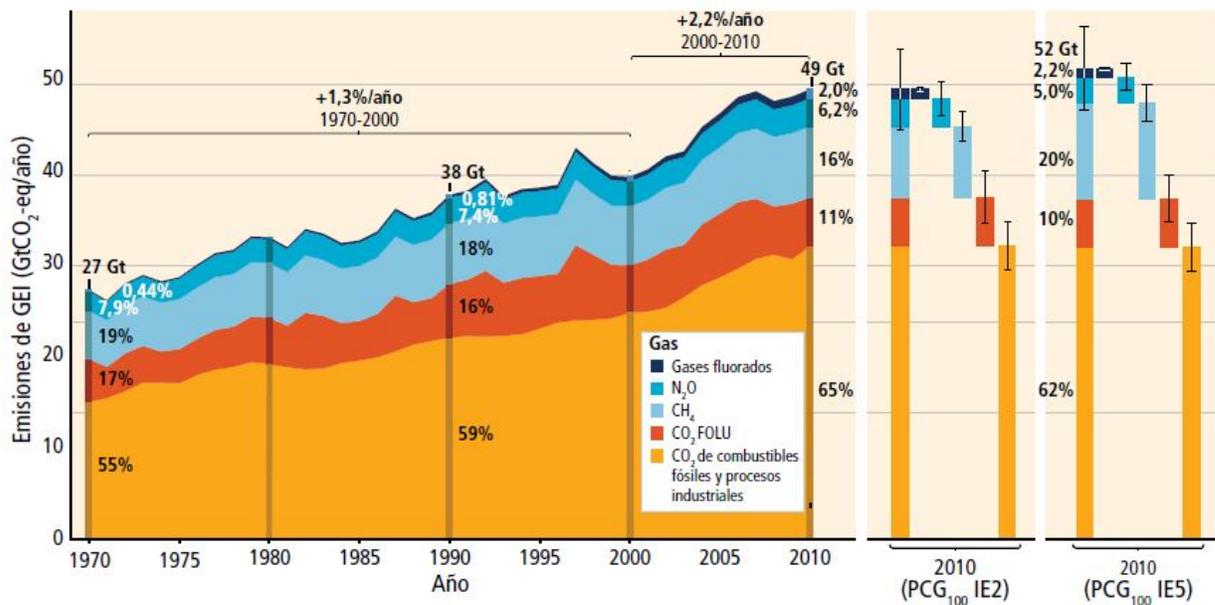


Figura 2.1: Emisiones antropogénicas anuales totales de GEI por gases, 1970-2010. Fuente: (IPCC, 2014).

De acuerdo con el IPCC (2013) el cambio climático se define como “Variación del estado del clima identificable (por ejemplo, mediante pruebas estadísticas) en las variaciones del valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante largos períodos de tiempo, generalmente decenios o períodos más largos.” (p. 188)

Los efectos y consecuencias del cambio climático deben ser consideradas en todo proyecto con duración mayor a 30 años. Según IPCC (2014) existe un 95 % de certeza de que la causa principal del calentamiento global es la actividad humana. Es por esto que la variabilidad de posibilidades, como resultado a largo plazo de los efectos del cambio climático, no están definidos con una certeza del 100 %.

Para realizar las proyecciones, se analizan los escenarios futuros de acuerdo con las trayectorias de concentración representativas (RCP de aquí en adelante). Ellas detallan las emisiones de contaminantes atmosféricos, las emisiones y las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero (GEI) y el uso del suelo, con el propósito de proyectar sus consecuencias para el sistema climático (IPCC, 2014). Las trayectorias incluyen un escenario de mitigación estricto, dos escenarios intermedios y un escenario con un nivel muy alto de emisiones de gases de efecto invernadero:

RCP 2.6, es un escenario cuya finalidad es mostrar la probabilidad de conservar el calentamiento global a menos de 2 °C por encima de las temperaturas preindustriales.

RCP 4.5, consistente en una trayectoria amigable con el medio ambiente, siendo representativa de escenarios intermedios respecto a políticas de mitigación.

RCP 6.0, consistente en una trayectoria donde se realizan escasos esfuerzos por mitigar las emisiones de GEI.

RCP 8.5, consistente en la trayectoria que presenta las emisiones de GEI más altas, donde no se realizan esfuerzos de mitigación (p. 61)

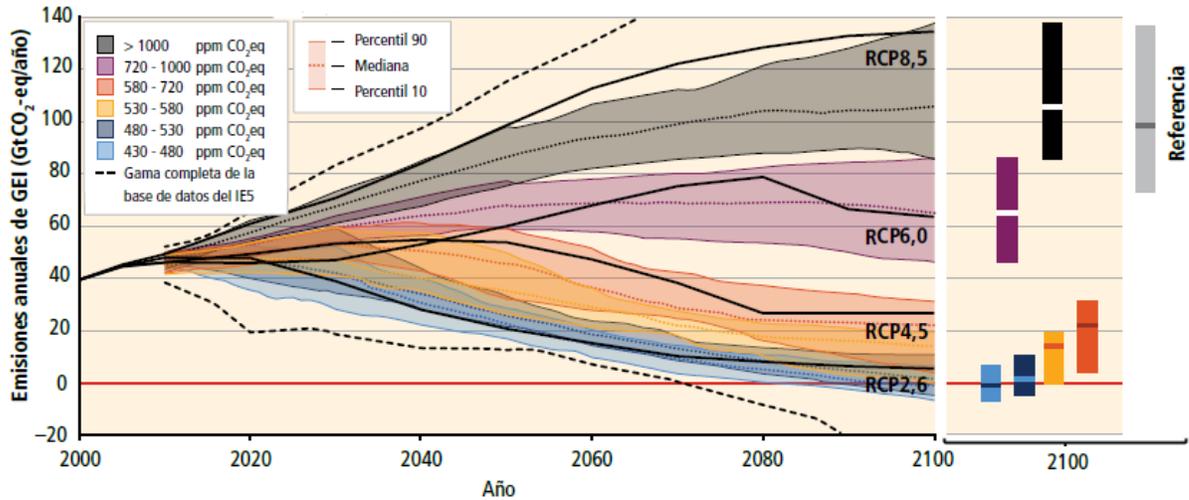


Figura 2.2: Emisiones antropógenas totales de CO_2 , con proyecciones futuras que incluyen los 4 escenarios. Fuente: (IPCC, 2014).

De acuerdo con el IPCC (2014) en cuanto a las consecuencias del cambio climático, independiente del escenario de emisiones, las temperaturas en la superficie aumentarán cada vez más a lo largo del siglo XXI. Las eventualidades que tenían menor frecuencia, aumentarán sus ocurrencias y duraciones, esto es; olas de calor, lluvias intensas y extremas, etc. A nivel marítimo, el océano se acidificará, aumentará su temperatura y su nivel medio global (p. 62)

En las figuras 2.3, 2.4 y 2.5 se mostrarán el escenario más amigable y el menos amigable con el medio ambiente; RCP 2.6 y RCP 8.5, para algunas de las consecuencias del cambio climático generadas a modo global, con el fin de ejemplificar y visualizar los cambios producidos:

- Aumento de la temperatura terrestre

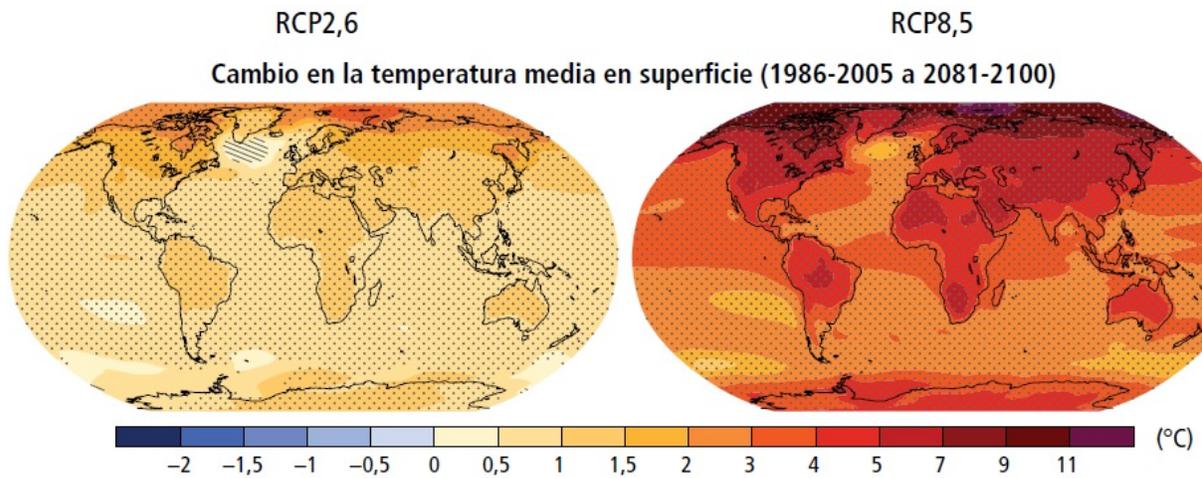


Figura 2.3: Proyección del aumento anual de la temperatura media en superficie para RCP2,6 y 8,5. Fuente: (IPCC, 2014).

- Aumento del nivel del mar

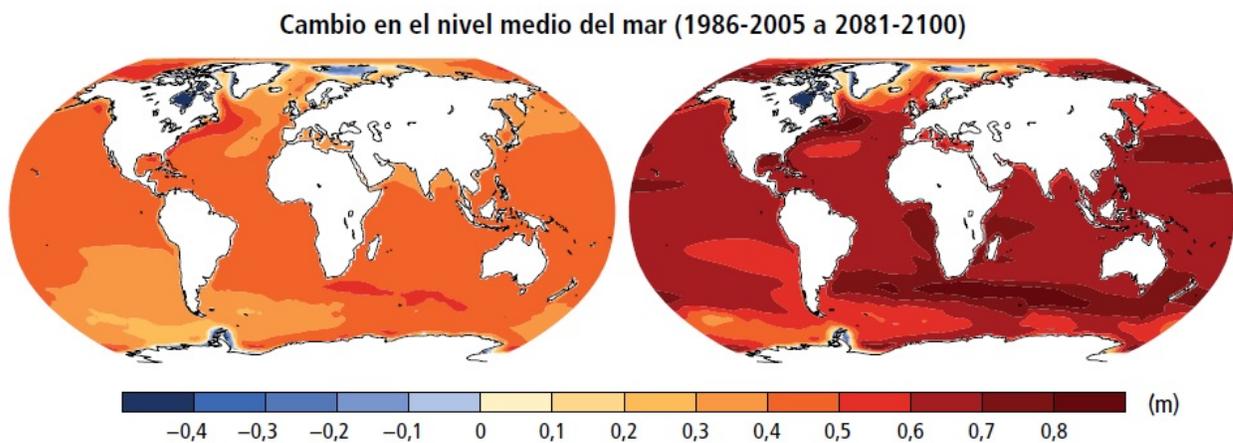


Figura 2.4: Proyección del aumento anual del nivel medio del mar para RCP2,6 y 8,5. Fuente: (IPCC, 2014).

- Disminución/aumento de precipitaciones

Cambio en la precipitación media (1986-2005 a 2081-2100)

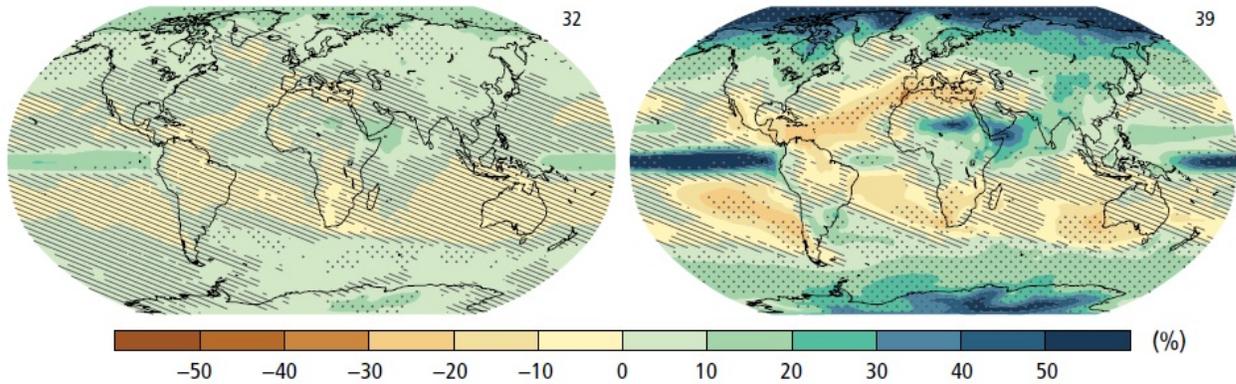


Figura 2.5: Proyección de la variación anual de las precipitaciones para RCP2,6 y 8,5. Fuente: (IPCC, 2014).

2.2. El hormigón

En el área de construcción se utilizan diversos materiales de acuerdo con los requerimientos que tenga la estructura.

Uno de los aspectos más importantes a la hora de construir es la resistencia en conjunto de la estructura, y por ende, de los materiales que la componen y su distribución. Es por esto que, a modo resumen, se muestran a continuación las resistencias típicas de los materiales comúnmente utilizados en construcción:

Tabla 2.1: Resistencias de materiales típicamente utilizados en construcción.
Fuente: Elaboración propia.

Material	Resistencia a la compresión [Kg/cm ²]	Resistencia a la tracción [Kg/cm ²]	Resistencia a la flexión [Kg/cm ²]	Resistencia al corte [Kg/cm ²]
Hormigón	200 - 350	30 - 60	4 - 55	70 - 280
Acero	3500 - 4900	5600 - 7200	2500 - 4500	3200 - 4200
Ladrillo	80 - 250	100	16	50 - 152
Madera blanda (pino)	180 - 260	760 - 800	280 - 330	60 - 150
Madera dura (abarco)	280 - 370	980 - 1040	500 - 560	250
Adobe	25 - 35	3 - 5	21	0.4

Entre los materiales más destacados por su resistencia se encuentran el hormigón, el acero y la madera. Pero, de estos tres materiales, el hormigón tiene las menores resistencias, por lo tanto, ¿qué lo hace tan útil?. Su trabajabilidad.

Según la empresa Melón (2016) la trabajabilidad es la "Facilidad del hormigón o mortero fresco de ser mezclado, colocado, compactado y terminado sin que se produzca segregación.", es decir refiere a la facilidad que tiene el hormigón fresco de ser manipulado y moldeado, lo que le propicia una gran ventaja frente a los otros materiales. Esta capacidad de ser moldeado es adquirida por el hormigón fresco gracias a su composición, ya que según el Instituto Nacional de Normalización (2016), el hormigón es un "material constituido por la mezcla de

cemento, áridos y agua, con o sin la incorporación de aditivos y adiciones, que desarrolla sus propiedades por hidratación del cemento” (p. 4). A pesar de esto, aún queda una arista que resolver: sus resistencias.

El hormigón tiene muy buenas resistencias a la compresión y es mayormente usado para resistir estas solicitaciones, pero sus resistencias a tracción y flexión están entre las más bajas de la tabla 2.1; a pesar de ello, tiene la capacidad de unificarse con otro de los materiales presentes, el acero, formando así el *Hormigón armado*.

El hormigón armado consta de una matriz de barras de acero (tensado o no) incorporado de manera ordenada y de previa en la pasta de hormigón, con el fin de trabajar de manera conjunta en la resistencia a las solicitaciones. De esta manera, el hormigón absorbe las resistencias a compresión y la matriz de acero se encarga y/o ayuda con las resistencias a tracción y flexión de la estructura.

Estas resistencias suceden cuando el hormigón armado y sus componentes están en condiciones óptimas y sin deterioro; es decir, cuando la durabilidad del hormigón armado no ha sido afectada.

2.2.1. La durabilidad del hormigón

Según la normativa chilena NCh170-2016 la durabilidad es la ”capacidad de una estructura o elemento de hormigón de resistir, las condiciones físicas y químicas a las que va a estar expuesta, durante la vida útil para la que fue proyectada” (p. 4), sin embargo, la definición que se utilizará a lo largo de este trabajo es la que se proponen en la revista Materiales de Construcción, debido a que incluye los efectos del cambio climático en ella. Según J. M. Mendoza-Rangel y P. Castro-Borges (2009), la definición de durabilidad sería la siguiente:

Capacidad de un material de construcción, elemento o estructura de hormigón de resistir las acciones físicas, químicas, biológicas y ambientales vinculadas al efecto del cambio climático global con su entorno durante un tiempo determinado previsto desde el proyecto, manteniendo su serviceabilidad y conservando su forma original, propiedades mecánicas y condiciones de servicio. (pp. 119-120)

De acuerdo con estos autores (Mendoza-Rangel y Castro-Borges, 2009) la conservación de esta característica depende principalmente de los siguientes factores:

Tabla 2.2: Acciones que inciden directamente en las estructuras

Físicas	Químicas	Mecánicas	Biológicas	Ambientales
Radiación térmica	Sulfatos	Tracción axial	Microorganismos	Ciclos hielo - Deshielo
Radiación nuclear	Sales de magnesio y amonio	Compresión axial	Hongos	Derretimiento de capas subterráneas de hielo
Fuego	Ataque ácido y básico	Flexión y corte	Bacterias	Viento
Humedad	Lixiviación por aguas puras	Flexión compuesta		Lluvias
Aerosoles	Efecto de agua de mar	Torsión		Inundaciones
Sales	Reacción álcali-agregado	Impacto		Tormentas
Ácidos	Ataque CO ₂ (<i>carbonatación</i>)			Erosión costera
Alcalis	Ataque de cloruros			Huracanes
Abrasión				Radiación solar
Erosión				Temperaturas elevadas
Cavitación				Temperaturas bajas
Agua				Ambientes secos
Sismos				Ambiente húmedo sin congelamiento
Movimiento por vehículos o instalaciones				Ambiente húmedo con congelamiento y agentes descongelantes
Ciclos de mojado y secado				Ambiente marino
Cristalización salina				
Efectos combinados				

Nota. De “Validez de los conceptos y modelos vigentes de vida de servicio de estructuras de hormigón ante los efectos del cambio climático global. Situación actual”, por J. M. Mendoza-Rangel & P. Castro-Borges, 2009, Materiales de Construcción Vol. 59, 296, 117-124, p. 120.

En conjunto, todas y cada una de las acciones indicadas en la tabla perjudican la durabilidad del hormigón en mayor o menor medida. Si cualquiera de estas acciones (o un conjunto de ellas, actuando más de alguna a la vez o algunas de ellas, una luego de otra) actúa en el hormigón, tendrá como consecuencia que la vida útil de la estructura disminuya. De esta manera, se procede a dar la definición de vida útil.

2.2.2. Vida útil

Según la normativa ISO 15686-1 (2000), la vida útil de una estructura se define como “el periodo después de la construcción o/e instalación durante el cual el edificio y sus partes cumplen o exceden los requerimientos de rendimiento para lo cual fueron diseñados y construidos; por lo que es necesario hacer uso de mantenimiento correctivo significativo y de reparaciones y remplazos de los materiales y componentes constructivos” (p.3); sin embargo, al igual que con la durabilidad, la definición que se utilizará a lo largo de este trabajo es la que se proponen en la revista Materiales de Construcción, debido a que incluye los efectos del cambio climático en ella. Según J. M. Mendoza-Rangel & P. Castro-Borges (2009), la definición de vida útil sería la siguiente:

Es el periodo de tiempo durante el cual el desempeño de un material, elemento o estructura de hormigón conserva los requerimientos de proyecto en términos de seguridad (resistencia mecánica y estabilidad, seguridad en caso de fuego, seguridad en uso), funcionalidad (higiene, salud y medio ambiente, protección contra el ruido y ahorro energético y confort térmico) y estéticos (deformaciones, agrietamientos, desconchamientos), con un mínimo de mantenimiento que permita controlar los efectos del cambio climático global en su entorno. (p. 121)

De esta forma se puede estimar la vida útil y la durabilidad de la estructura en función de las acciones que influyan durante su periodo de vida. Según la NCh170-2016 “la durabilidad del hormigón depende de sus propiedades y de la presencia de agentes internos o externos que generen ataque al elemento estructural” (p. 7). Por consiguiente, de manera específica, se señalan los agentes internos y externos que pueden generar estos ataques al elemento estructural:

Agentes internos:

- Contenido máximo de sulfatos.
- Contenido máximo de cloruros.
- Reacción árido álcali.

Agentes externos:

- Congelación y deshielo.
- Ataque externo de sulfatos.
- Ataque por agentes externos que provocan corrosión.

2.3. Agentes de ataque afectados por el cambio climático

El rol que juega el clima y el medio ambiente alrededor de los hormigones es directamente influyente en la presencia de agentes de ataque externos.

Al conocer los parámetros afectados por el cambio climático y los agentes que afectan a la durabilidad y vida útil del hormigón, es posible realizar relaciones que permitan describir cómo el cambio climático influye en los agentes de ataque (comúnmente los externos son más afectados por las condiciones ambientales y el clima) de dichas propiedades del hormigón, para las proyecciones de vida útil sobre 50 años.

2.3.1. Congelación y Deshielo

Según A. M. Aguirre & R. Mejía de Gutiérrez (2013):

Cuando la temperatura ambiental disminuye a valores por debajo de 0°C, el agua que se encuentra contenida en los poros del hormigón se congela, causando un incremento en volumen del orden del 9%. Como consecuencia, se presentan esfuerzos de tensión, que originan grietas y delaminación del hormigón, o en casos más graves, una completa desintegración. (p. 8).

Los factores que contribuyen a la resistencia del hormigón al congelamiento son la relación agua/cemento, el grado de saturación de los poros del hormigón, el curado, la proporción de aire incorporado y los áridos (p. 9).

Estos factores pueden ser manipulados durante la producción del hormigón, es decir, en su estado fresco y sin relevancia importante de las condiciones ambientales.

Las condiciones ambientales relevantes para producir eventos de ciclos de congelación y deshielo, según el comité de durabilidad ICH, son las siguientes:

Para la ocurrencia del deterioro por ciclos de congelación y deshielo, deben ocurrir en forma simultánea las siguientes condiciones:

1. Mínima temperatura que da inicio al proceso de congelación del agua: $T_{min} < -2^{\circ}C$.
2. Temperatura máxima mayor a $T_{max} > 0^{\circ}C$ durante el mismo día, que asegure que ocurrió el deshielo y con ello un ciclo de congelación y deshielo.
3. La "cantidad de ciclos anuales de congelación/deshielos (C)" necesarios, a partir del cual se considera la existencia de un deterioro acumulativo del hormigón (total de 250 ciclos), con lo cual:
 - Para Pavimentos, si $C > 10$ ciclos/año, al considerar 25 años de vida útil.
 - Para otras estructuras, si $C > 5$ ciclos/año, al considerar 50 años de vida útil.
4. "Precipitación mensual (P)" asociada a la obtención de un Grado de Saturación Crítico del hormigón mayor a un 90 %, requerido para que la ocurrencia de la expansión del agua al interior de los poros genere el deterioro de la matriz de cemento:
 - Saturación Nula **SN** si $P < 10\text{mm/mes}$
 - Saturación Baja **SB** si $10\text{mm/mes} < P < 50\text{mm/mes}$
 - Saturación Alta **SA** si $P > 50\text{mm/mes}$
5. En forma adicional la presencia de Nieve, la cual genera, por un lado, la condición de saturación del hormigón, y por otro, el uso de sales descongelantes en estructuras viales, como pavimentos, aceras, puentes y obras anexas sujetas a la acción de la salpicadura de sales, etc.

De esta manera, los factores ambientales relacionados directamente con la congelación y deshielo son:

- **Temperaturas mínima y máxima.**
- **Niveles de precipitación (agua).**
- **Niveles de precipitación (nieve).**

Las fórmulas a utilizar para realizar operaciones útiles al calcular los ciclos de congelación y deshielo son las siguientes:

$$D_{C-D} = FD - ID \quad (2.1)$$

Donde:

D_{C-D} : Número de días que presentan congelación y deshielo al año.

FD : Número de días en que la temperatura mínima es menor que $0^{\circ}C$ al año.

ID : Número de días en que la temperatura máxima es menor que $0^{\circ}C$ al año.

2.3.2. Ataque por sulfatos

De acuerdo con la definición de A. M. Aguirre & R. Mejía de Gutiérrez (2013):

Este fenómeno se genera cuando el hormigón se encuentra expuesto a aguas subterráneas, lagos, pozos o suelos que contienen iones sulfatos. Estos pueden penetrar el hormigón y reaccionar con los componentes de la matriz cementicia causando reacciones químicas expansivas.

El ataque por sulfatos se manifiesta con una pérdida progresiva de la resistencia de la pasta de cemento debido a la pérdida de cohesión entre los productos de hidratación. Además, los productos expansivos generan agrietamientos en el hormigón; cuando esto sucede la permeabilidad del hormigón incrementa, permitiendo así la entrada de otros agentes que pueden acelerar el deterioro.

Bajo condiciones particulares — presencia de CO_2 , alta humedad relativa (>95%) y bajas temperaturas — los sulfatos pueden reaccionar con el hidróxido de calcio y el silicato cálcico hidratado (C-S-H) y producir taumasita. Este fenómeno genera una pérdida completa de la resistencia del hormigón. (pp. 10-11)

Nuevamente, fuera de las condiciones ambientales, la relación agua/cemento, y por consiguiente, la permeabilidad inicial del hormigón, juega un rol importante y es clave para ayudar a reducir la permeabilidad y el ingreso de agentes que dañen al hormigón armado.

En conclusión, para el ataque por sulfatos, los factores ambientales que pueden variar su impacto, positiva o negativamente para el hormigón, son:

- **Temperatura mínima**
- **Niveles de CO_2 atmosférico.**
- **Niveles de humedad relativa.**

2.3.3. Ataque por corrosión de la armadura

La corrosión es un proceso químico de oxido-reducción, donde la capa exterior de la armadura de acero se destruye. Para dar inicio a la corrosión, es necesario que tanto agua como oxígeno penetren la capa de hormigón (que hasta ahora, le proporciona una cubierta y protección física al acero) y permanezcan en contacto con la armadura de refuerzo. Sin embargo, para que esto ocurra, primeramente los agentes agresivos (CO_2 y Cloruros) deben ingresar a la matriz cementicia (este proceso se acelera cuando se presentan grietas físicas, ataque por cloruros o carbonatación) y llegar hasta la armadura de refuerzo. Cabe destacar, que para que el proceso de oxido-reducción ocurra, también deben estar presentes moléculas de agua y oxígeno en la superficie del acero (A. M. Aguirre & R. Mejía de Gutiérrez, 2013).

La corrosión como tal, no es un proceso que se dé por razones climáticas directamente. Además, nuevamente la razón agua/cemento, además del nivel de recubrimiento y la calidad

del hormigón, juega un papel importante como protector del acero. Sin embargo, se presentan 2 fenómenos que pueden destruir esta protección del acero, es decir, al hormigón, generando reacciones internas que terminan en una corrosión de la armadura. Estos dos fenómenos son los siguientes:

2.3.3.1. Carbonatación

Se le denomina carbonatación al proceso donde ingresa CO_2 atmosférico al hormigón, cuya consecuencia principal es la disminución del PH (aproximadamente con un valor de 13 previo a este proceso) a niveles menores a 10 y, mediante reacciones químicas en el hormigón, la producción de yeso, gel de alúmina y $CaCO_3$.

Los factores que contribuyen tanto positiva como negativamente a la carbonatación son detallados por A. M. Aguirre & R. Mejía de Gutiérrez (2013) como prosigue:

Los factores relacionados al hormigón que afectan la capacidad de resistir la propagación del CO_2 son: un inadecuado proceso de curado y una mala compactación, es decir, hormigones más permeables sufren una carbonatación más rápida. Dado esta situación, a relaciones agua/cemento bajas se reduce la movilidad del CO_2 en el hormigón, limitando la carbonatación a la superficie.

Los factores ambientales más importantes son la humedad relativa; el proceso de difusión del CO_2 no se producirá en hormigones que están totalmente saturados de agua y el CO_2 en hormigones totalmente secos no reacciona, es por ello que la humedad relativa ideal para propiciar el fenómeno está entre el 50 y el 70 %. La concentración de CO_2 en la atmósfera puede variar desde 0,03 % para ambientes rurales y más del 0,1 % para ambientes urbanos, estos últimos tienen una mayor incidencia para que se presente la carbonatación y, por último, un incremento de temperatura podría acelerar notablemente la velocidad de carbonatación. (p. 18)

2.3.3.2. Ataque por cloruros

El ataque por cloruros hacia el hormigón tiene 2 posibles fuentes: las internas, provenientes del proceso de producción del hormigón (áridos contaminados, presencia de agua de mar o agua contaminada, cemento y/o aditivos con alto contenido de cloruros), y las externas, causadas por el uso de sales de deshielo, exposición a ambientes marinos, uso y deposición de sustancias químicas que puedan atacar al hormigón, etc.

El ataque por cloruros se caracteriza por el ingreso de iones cloruros al hormigón en forma de iones enlazados y iones libres. Éste último, con consecuencias graves para el acero, ya que los iones pueden difundirse hasta alcanzar el acero y, al sobrepasar las concentraciones críticas, destruir la capa pasiva del acero, para dar paso a la corrosión (A. M. Aguirre & R. Mejía de Gutiérrez, 2013, pp. 19-20).

La normativa chilena NCh170 no presenta límites sobre los niveles de concentración de iones cloruro que ingresen de manera externa al hormigón; esto puede deberse a que sólo una parte de los cloruros que ingresan de manera externa, son perjudiciales.

Es necesario diferenciar el ingreso de cloruros por ambiente marino con el ingreso por utilización de sales, ya que el ambiente marino es más dependiente de las condiciones ambientales (humedad relativa, vientos); en cambio, en la utilización de sales descongelantes, dependerá de cuánta sal se emplea (factor humano) y su periodicidad (factor ambiental) que se verá influido por la cantidad de heladas (temperatura bajo 0) en el año (Instituto Mexicano del transporte, 2001, p. 40-43).

Finalmente, los factores ambientales que pueden modificar a futuro los niveles de ataque que provocan corrosión de la armadura son:

- **Temperatura**
- **Niveles de CO_2 atmosférico.**
- **Niveles de humedad relativa.**
- **Niveles de Cl^- atmosférico-marino.**

Capítulo 3

Antecedentes

3.1. Normativa Chilena

Actualmente, los hormigones y su desarrollo están sujetos a la normativa chilena NCh170-2016, de acuerdo con sus requisitos generales. Con respecto a lo que en este informe se requiere, la clasificación y grados de exposición para ataques de agentes externos son las siguientes:

3.1.1. Congelación y deshielo

Tabla 3.1: Requisitos del hormigón sometido a la acción de congelación y deshielo. Fuente: NCh170-2016.

Grado de exposición		Mínimo grado de resistencia especificado	Aire total MPa	Dn mm
F0	Hormigón no expuesto a congelación y deshielo	Sin restricción	Sin restricción	Sin restricción
F1	Hormigón expuesto a congelación y deshielo y ocasionalmente expuesto a humedad	G30	6 5 4,5	10 20 40
F2	Hormigón expuesto a congelación y deshielo y en contacto continuo con humedad	G30	7,5 6 5,5	10 20 40
F3	Hormigón expuesto a congelación y deshielo y en contacto continuo con humedad y expuesto a productos químicos descongelantes	G35	7,5 6 5,5	10 20 40

3.1.2. Ataque por sulfatos

Tabla 3.2: Grados de exposición por sulfatos. Fuente: NCh170-2016.

Grado		Contenido máximo SO_4	
		Soluble en el suelo % en peso	Disuelto en agua ppm
S0	No agresivo	$< 0,10$	< 150
S1	Moderada	$0,10 \leq SO_4 < 0,20$	$150 \leq SO_4 < 1500$ Agua de mar
S2	Severa	$0,20 \leq SO_4 < 2,00$	$1500 \leq SO_4 < 10000$
S3	Muy severa	$SO_4 > 2,00$	$SO_4 > 10000$

Tabla 3.3: Requisitos del hormigón en contacto con sulfatos. Fuente: NCh170-2016.

Grado de exposición	Mínimo grado de resistencia especificada	Dosis mínima de cemento, kg/m^3	Profundidad de penetración de agua, según NCh2262, mm
S0	G17	–	–
S1	G25	320	≤ 40
S2	G30	340	≤ 30
S3	G35	360	≤ 20

3.1.3. Ataque por corrosión de la armadura

Tabla 3.4: Grados de exposición que provocan corrosión. Fuente: NCh170-2016.

Grado		Agente externo	Exposición en condiciones de servicio
C0	No agresivo	No aplica	Hormigón seco o protegido de la humedad ambiental
C1	Leve	CO_2	Hormigón húmedo expuesto a altas concentraciones de CO_2
C2-A	Moderado	Cloruro	Hormigón sumergido completamente en agua que contiene cloruro
C2-B	Severo	Cloruro	Hormigón húmedo expuesto a aire salino
C2-C	Muy severo	Cloruro	Hormigón expuesto a ciclos de humedad y a una fuente externa de cloruro proveniente de productos descongelantes, sal, agua salobre, agua de mar o salpicaduras del mismo origen

Tabla 3.5: Requisitos del hormigón según grado de exposición. Fuente: NCh170-2016.

Grado de exposición	Mínimo grado de resistencia especificada MPa	Dosis mínima de cemento kg/m^3	Profundidad de penetración de agua, según NCh2262 mm
C0	G17	–	–
C1	G17	270	≤ 50
C2-A	G20	300	≤ 40
C2-B	G25	330	≤ 30
C2-C	G35	360	≤ 20

3.2. Zonificación chilena respecto a grados de exposición

Ahora que se conocen los grados de exposición asignados por la NCh170-2016, las figuras 2.1, 2.2 y 2.7 ilustrarán cómo se distribuyen dichos grados de exposición, de acuerdo con las condiciones ambientales de cada sector a lo largo de Chile.

3.2.1. Congelación y deshielo

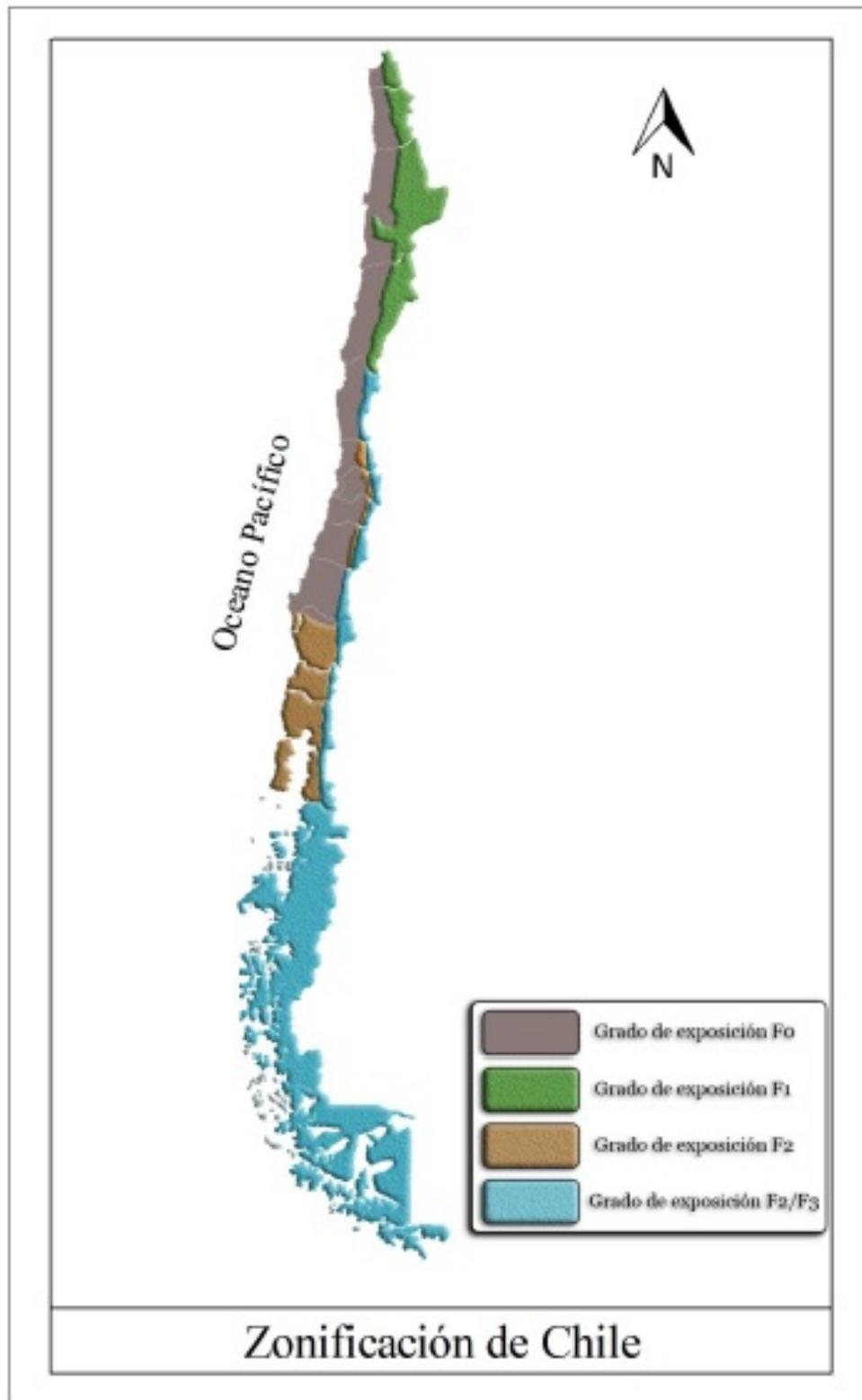


Figura 3.1: Zonificación Nacional para determinar el Grado de Exposición por la Acción de Ciclos de Congelación y Deshielo. Fuente: Peyresblanques A., Ignacio, 2019.

3.2.2. Ataque externo por sulfatos

Tabla 3.6: Zonificación correspondiente al ataque externo por Sulfatos.
Fuente: Vilches Hernández, 2020.

Región	Grado de exposición		
	Costa	Centro	Cordillera
XV	S1	S0	S1
I	S1	S0	S1
II	S1	S0	S2
III	S1	S0	S1
IV	S1	S0	S1
V	S1	S0	S1
METROPOLITANA	S1	S0	S1
VI	S1	S0	S1
VII	S1	S0	S2
VIII	S1	S0	S2
IX	S2	S0	S3
XIV	S2	S0	S3
X	S3	S3	S3
XI	S1	N/A	S2
XII	S1	N/A	S0

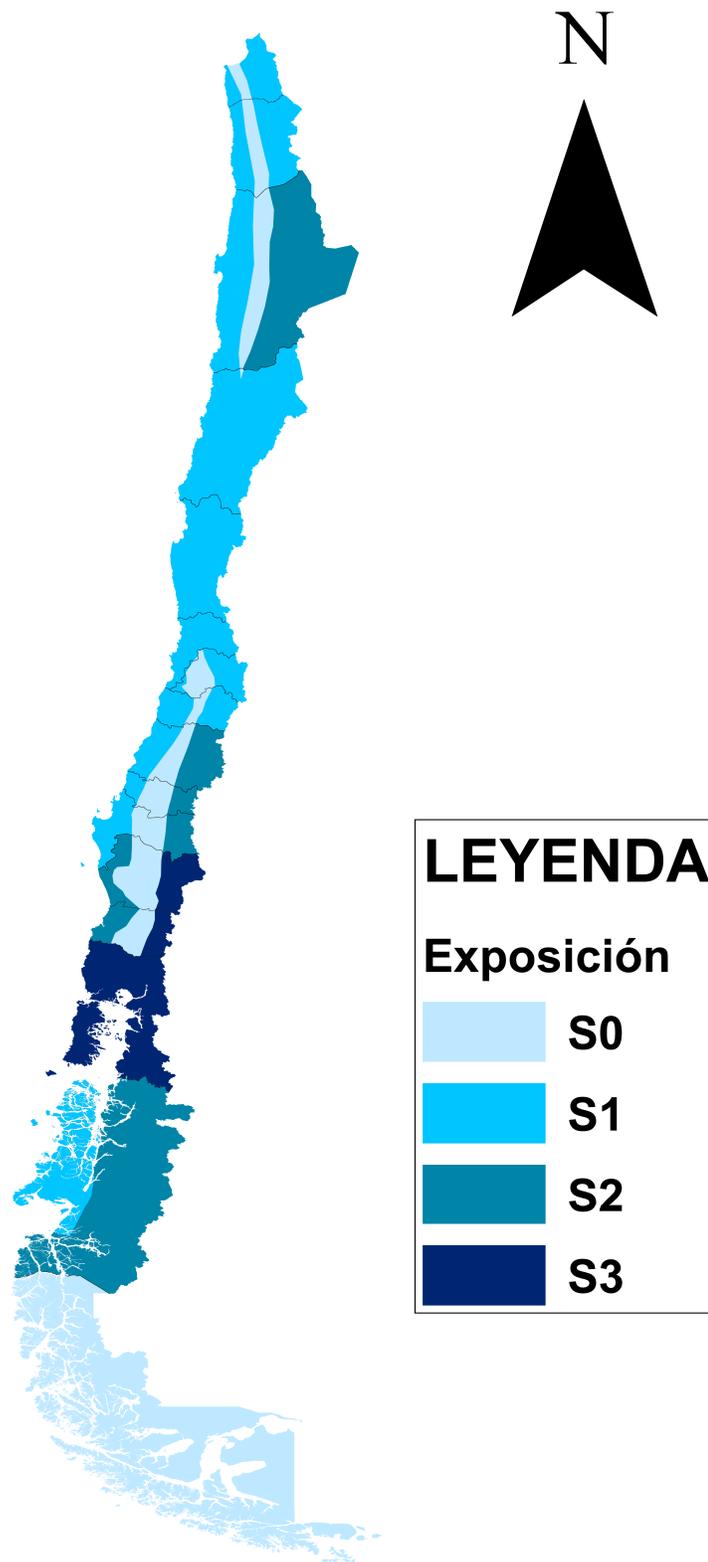


Figura 3.2: Zonificación correspondiente al ataque externo por Sulfatos, representado en forma gráfica. Fuente: (Elaboración propia en base a datos de E. Vilches, 2020)

3.2.3. Ataque de agentes que provocan corrosión

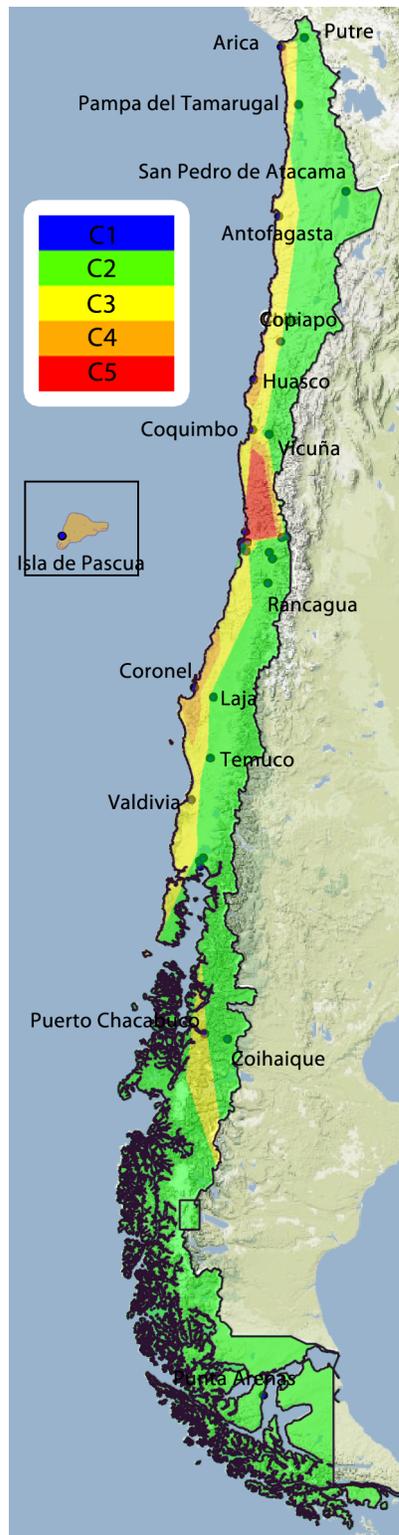


Figura 3.3: Zonificación de ataques externos que provocan corrosión en acero durante 12 meses. Fuente: Proyecto INNOVA: Construcción de mapas de corrosividad atmosférica de Chile.

3.3. Programas/plataformas interactivas a utilizar

3.3.1. Mapas de corrosión atmosféricos

La Pontificia Universidad Católica de Valparaíso mediante la realización del Proyecto INNOVA buscó construir mapas de corrosividad atmosférica de Chile para diferentes metales y aleaciones; estos son: acero, acero galvanizado, aluminio y cobre.

El objetivo de este proyecto es construir dichos mapas haciendo una clasificación del territorio chileno en diferentes zonas geográficas con base en la agresividad atmosférica, según ISO 9223, considerando datos meteorológicos existentes y midiendo in situ la contaminación atmosférica por cloruro y dióxido de azufre, además se mide el tiempo de humidificación y las velocidades de corrosión de cada metal.

Para la realización de las mediciones se dispusieron de 31 estaciones a lo largo y ancho de Chile (incluidos Isla de Pascua y la Antártica chilena), especificando para cada estación su latitud, su longitud, altura y distancia al mar. Las mediciones se realizan en cada estación sin una periodicidad definida, comenzando en 2010 y terminando en 2013.



Figura 3.4: Plataforma interactiva del proyecto INNOVA. Fuente: Proyecto INNOVA: Construcción de mapas de corrosividad atmosférica de Chile.

Además de medir y entregar los datos anteriormente descritos, la plataforma también es capaz de realizar mapas de corrosividad por tiempo de corrosión cada 3 meses (3, 6, 9 y así hasta 36 meses) y por agresividad cada 1, 2 o 3 años para los 4 metales.

Finalmente, la página web que permite ingresar a la plataforma de forma directa es la siguiente: <http://www.mapadecorrosionatmosfericadechile.cl>

3.3.2. Explorador de Amenazas Climáticas - ARCLIM

El Explorador de Amenazas Climáticas del Atlas de Riesgo Climático (ARCLIM) es una herramienta que entrega visualizaciones y datos climáticos de Chile. Esta plataforma genera una previsualización de un mapa con las regiones/provincias/comunas de Chile y su respectiva variación entre el presente (un promedio de valores entre 1980 y 2010) y el futuro proyectado bajo el escenario RCP8.5 (un promedio de valores proyectados entre 2035 y 2065).

Las simulaciones climáticas futuras utilizan 35 modelos globales para su desarrollo, a los cuales se les aplica un escalamiento para aumentar la resolución en una grilla a escala nacional. Las simulaciones fueron corregidas con el objetivo de ser representativas de las condiciones promedio y no de ser representativas con lo observado cada día. Finalmente, para la grilla nacional, se cuenta con el promedio de 25 modelos climáticos con aproximadamente $5 \times 5 \text{ km}^2$ de resolución.

Los datos de salida que se pueden obtener mediante la utilización de la plataforma son 9 variables atmosféricas principales y el comportamiento del clima en base a ellas. Estas son, con algunos ejemplos:

- Calor
 - Amplitud térmica.
 - Temperatura media.
 - Número de días sobre 30°C .
- Frío
 - Días de escarcha.
 - Días de hielo.
 - Promedio de temperatura mínima diaria.
- Humedad
 - Humedad relativa max., min. y media.
 - Humedad específica.
- Precipitación
 - Precipitación máxima diaria.
 - Precipitación acumulada.
 - Frecuencia de sequía.
- Lluvia
 - Lluvia máxima diaria.
 - Lluvia acumulada.
- Nieve

- Nieve máxima diaria.
- Nieve acumulada.
- Presión
 - Presión atmosférica media.
- Viento
 - Viento zonal medio.
 - Viento meridional medio.
 - Viento máximo diario.
- Insolación
 - Insolación solar máxima y mínima diaria.
 - Insolación solar diaria.

Cada uno de estos datos pueden ser obtenidos mediante la plataforma en distribuciones territoriales (promedio de valores por comuna, provincias o regiones) y divisiones temporales (mensuales, anuales o trimestrales), las cuales son seleccionadas previamente antes de poder pre-visualizar los resultados.

Una vez seleccionadas las distribuciones, se visualiza el mapa con los promedios actuales y futuros; a su lado, el mismo mapa con la diferencia entre estos dos últimos y al costado derecho de la plataforma es posible descargar los archivos con los datos.

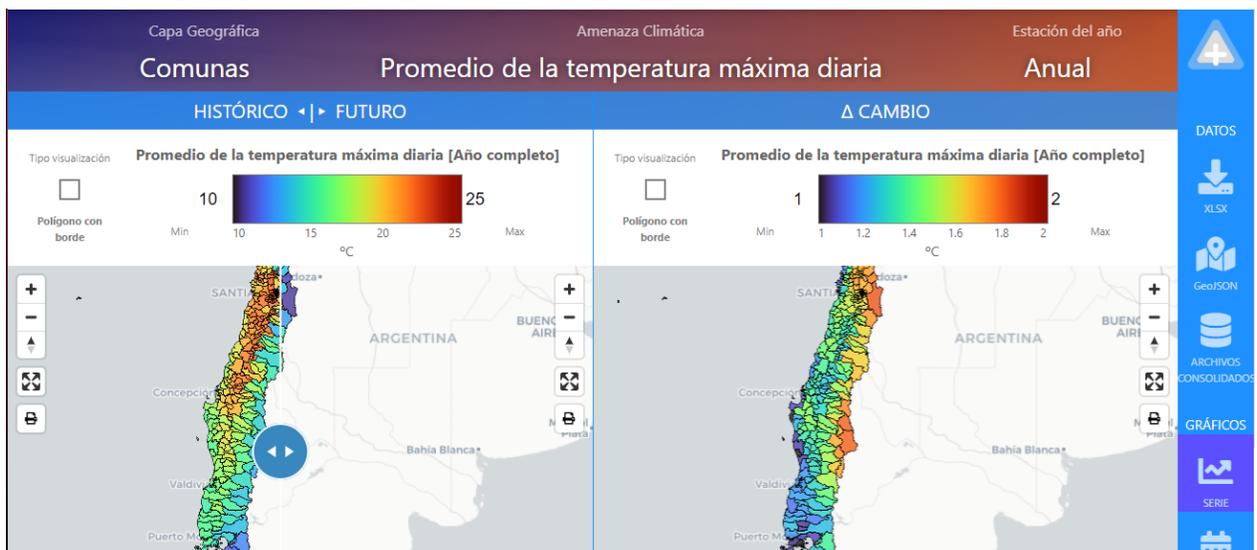


Figura 3.5: Imagen referencial del explorador de amenazas climáticas, AR-CLIM. Fuente: Plataforma virtual Atlas de Riesgo Climático: Explorador de Amenazas.

Finalmente, la página web que permite ingresar a la plataforma de forma directa es la siguiente: <https://arclim.mma.gob.cl/amenazas/>

Capítulo 4

Metodología

El objetivo principal de la realización de este trabajo de tesis es realizar proyecciones de las consecuencias que genera el cambio climático, en cuanto afecte a la durabilidad y vida útil del hormigón, para así proponer, de ser necesario, una modificación a la normativa actual sobre durabilidad y vida útil de hormigones.

Para esto es necesario, primeramente, revisar la bibliografía adecuada con el objetivo de localizar qué parámetros del clima y las condiciones atmosféricas afectan directamente a la durabilidad y vida útil del hormigón, estos son:

- Temperatura (mínimas, promedio y máximas)
- Humedad relativa
- Precipitaciones
- Niveles de CO_2 atmosférico
- Niveles de SO_2 atmosférico
- Niveles de Cl^- atmosférico

Una vez localizados los parámetros involucrados, se debe hacer una evaluación del impacto que tienen en el hormigón a través del análisis de cómo afectan a los agentes de ataque del hormigón. Además, es necesario revisar cómo la normativa actual se refiere a estos parámetros y los niveles y grados de importancia.

Con esto, Los pasos a seguir para cumplir el objetivo principal son los siguientes:

4.1. Obtención de datos actuales

Se debe realizar una recopilación de los datos de temperatura mínima y máxima, humedad relativa, precipitaciones, niveles de CO_2 atmosférico, niveles de SO_2 atmosférico y niveles de Cl^- atmosférico actuales. Para realizar esta tarea se utilizarán dos plataformas/páginas web para la obtención de datos y un informe proporcionado por el Ministerio de Medio Ambiente de Chile.

Para la obtención de los datos actuales se utiliza la plataforma proporcionada por el ministerio del medio ambiente: El Atlas de Riesgo Climático (ARCLIM) y su Explorador de Amenazas Climáticas. Esta plataforma entrega valores de un promedio de 30 años (1980 a 2010), subdividido entre los meses del año.

Los datos a obtener desde esta página son: **días de hielo, días de escarcha, humedad relativa, Temperatura promedio y Lluvia acumulada**. Estos datos son entregados como promedios de los 30 años para cada mes del año, entregando un valor por cada comuna de Chile. A partir de estos valores, se promedian las comunas pertenecientes a cada región de Chile para graficar posteriormente sus resultados.

Para la obtención de datos de CO_2 se utiliza la información entregada por el Ministerio del Medio Ambiente mediante el 4° Informe Bienal de actualización de Chile sobre Cambio Climático, a través de las bases de datos del inventario regional. Este inventario contiene los datos de emisiones y absorciones de CO_2 , emisiones de CH_4 , N_2O , SF_6 , entre otros, para cada región de Chile desde 1990 hasta 2018.

Para la obtención de datos de Cl^- se utiliza el mapa de corrosión atmosférica de Chile proporcionado por el proyecto INNOVA, donde se registraron los niveles de Cl^- atmosférico y SO_2 atmosférico para cuatro metales, a través de 31 estaciones dispuestas a lo largo y ancho de Chile entre los años 2010 y 2013.

4.2. Obtención de proyecciones de datos

Para la proyección de estos datos en el futuro se seguirán el peor escenario de entre las cuatro trayectorias de concentración representativas, el escenario RCP 8.5. A través del Explorador de Amenazas Climáticas de ARCLIM se obtienen los datos de promedio futuro (promedio de los datos entre 2035 y 2065) y promedios regionales de las variables anteriormente descritas, en el escenario de más altas emisiones de GEI, RCP 8.5.

No hay datos de las proyecciones de CO_2 y Cl^- a nivel nacional. Sin embargo, para el CO_2 es posible analizar las proyecciones a nivel mundial en el escenario 8.5.

4.3. Análisis de agentes de ataque respecto a las variaciones generadas a futuro

Una vez se tengan disponibles los datos en presente y futuro de los parámetros antes nombrados, se procede a graficar para cada región de Chile, los promedios mensuales de dichos parámetros en el presente y el futuro proyectado.

4.3.1. Congelación y deshielo

Se compara la cantidad de eventos que podrían tener congelación y deshielo, de acuerdo con las condiciones ambientales expuestas en este documento (página 12) de acuerdo con el ICH. Esto es:

- Calcular la cantidad de días que cumplen con la temperatura de congelación y deshielo, utilizando la ecuación 2.1.
- Calcular la cantidad de días donde la precipitación supere los 50 mm/mes y sean coincidentes con los días que se cumple un ciclo de congelación y deshielo.

4.3.2. Ataque por sulfatos

Para cuantificar un aumento o disminución en la tasa de ataques por sulfatos se debe:

- Calcular y analizar el cambio en los niveles de CO_2 atmosférico.
- Calcular la variación de meses con humedad relativa sobre 95 %.
- Calcular la cantidad de días donde la temperatura es baja y coincidente con los otros parámetros.
- Calcular y analizar los cambios en los niveles de Sulfatos presentes a nivel atmosférico.

4.3.3. Ataque por corrosión de la armadura

Para que se produzca el proceso de carbonatación y posterior corrosión de la armadura se deben cumplir ciertos estándares de humedad, niveles de CO_2 y temperatura; el proceso es el siguiente:

- Analizar el cambio que habrá sobre los niveles de humedad relativa entre el 50 y el 70 %.
- Calcular el aumento/disminución de las concentraciones de CO_2 atmosférico.
- Calcular el cambio en la temperatura mínima, cuyo aumento generaría una aceleración de la velocidad de carbonatación.

Para el proceso de ataque por cloruros, también se deben cumplir ciertos estándares de variación climático; estos son:

- Analizar el cambio que habrá sobre los niveles de humedad relativa, donde sólo afectarán niveles altos (sobre 70 %).
- Calcular el aumento/disminución de las concentraciones de Cl_- atmosférico.
- Calcular el cambio en la cantidad de días donde la temperatura mínima es menor que $0^\circ C$, cuyo aumento generaría un aumento de heladas y, por consiguiente, una mayor utilización de sales de deshielo.

4.4. Nueva zonificación para futuro

Con todos los cálculos realizados en cuanto a la variación de ataques de agentes externos en la actualidad y el futuro, se procede a realizar una nueva zonificación adaptada a las proyecciones futuras, a lo largo de todo Chile.

4.5. Propuesta de normativa

Analizar de manera crítica los valores proyectados y su influencia en cuanto a sobrepasar los límites de las zonificaciones actuales. De esta manera, generar una propuesta de normativa que incluya las variaciones que genera el cambio climático en un plazo de 50 años, de ser necesaria.

Capítulo 5

Resultados

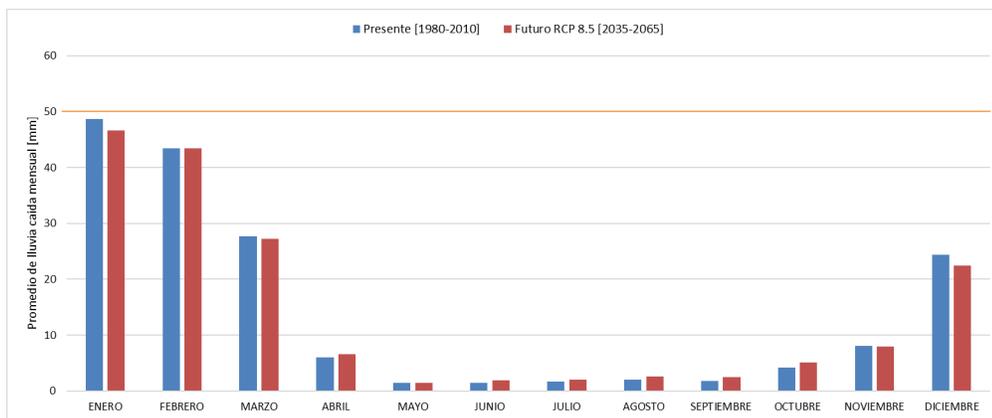
Los resultados se dispondrán de manera que correspondan a cada agente de ataque externo del hormigón, de acuerdo con los parámetros analizados en presente [promedio 1980-2010] y comparados con la proyección a futuro [promedio 2035-2065], con RCP 8.5.

5.1. Congelación y deshielo

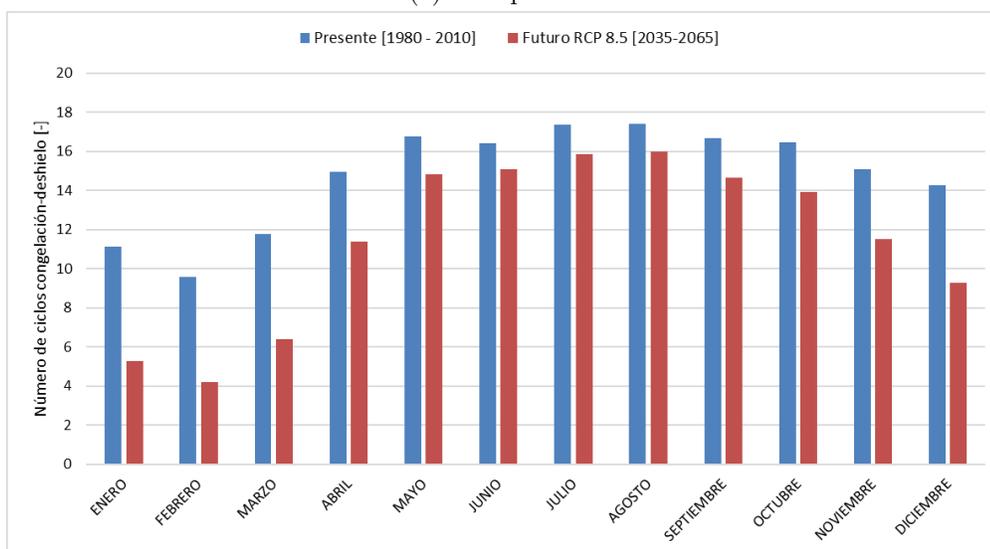
Para el análisis de congelación y deshielo se calcula el número de ciclos de congelación y deshielo que sufre el hormigón en cada región. Esto es, calcular la cantidad de veces que la temperatura disminuyó bajo 0°C y luego aumentó sobre 0°C el mismo día, en conjunción con niveles de saturación altos (precipitación acumulada sobre 50 mm. por mes).

Para la obtención clara de estos resultados, se analiza y calcula por separado cada mes del año en cada una de las regiones de Chile. A continuación se muestran algunos resultados relevantes, sin embargo, los resultados de cada región se encuentran en la sección de anexos.

5.1.1. Arica y Parinacota



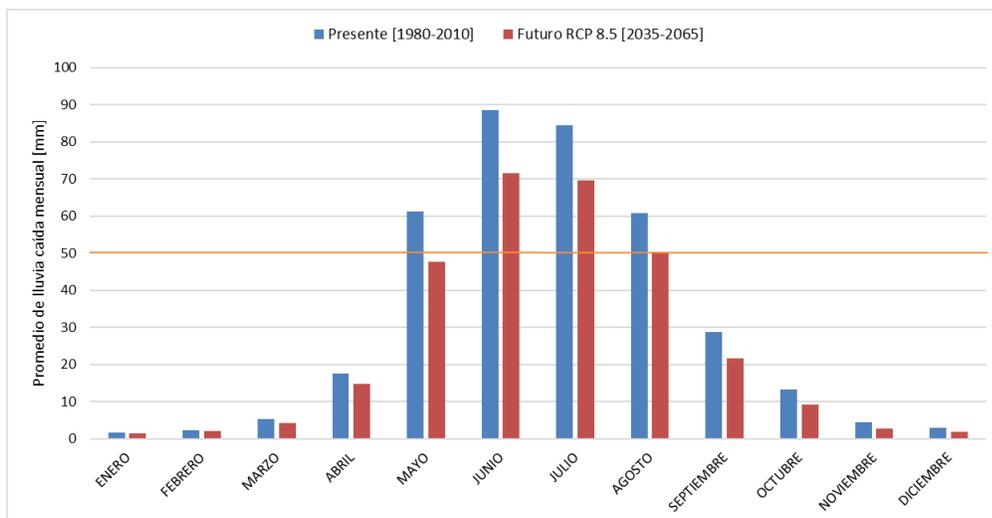
(a) Precipitación



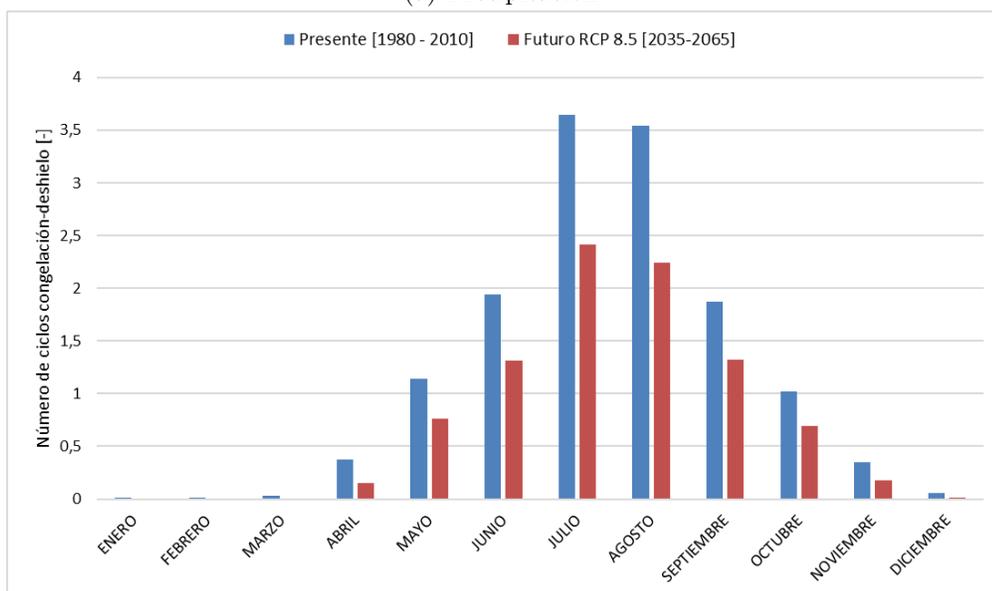
(b) Ciclos Congelación-Deshielo

Figura 5.1: Promedios de (a) precipitaciones y (b) cantidad de ciclos mensuales de las provincias de la región de Arica y Parinacota en el presente [1980-2010] y el futuro RCP 8.5 [2035-2065]. Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos del Explorador de Amenazas Climáticas.

5.1.2. Valparaíso



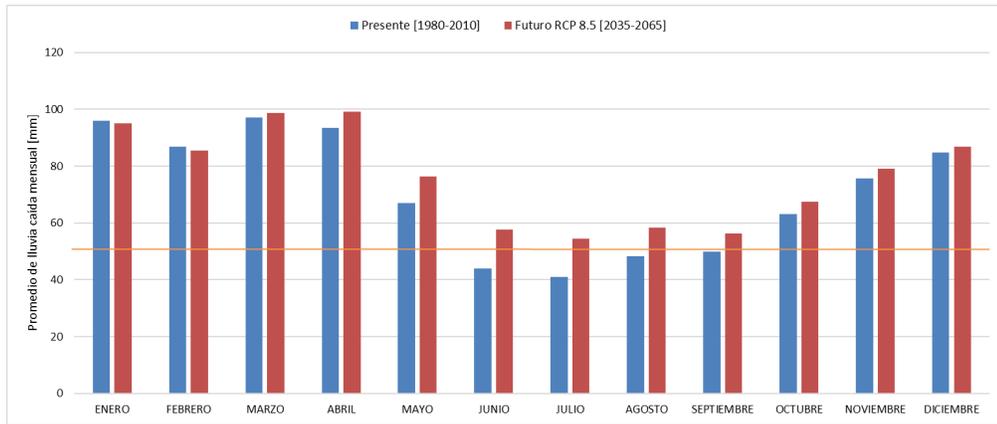
(a) Precipitación



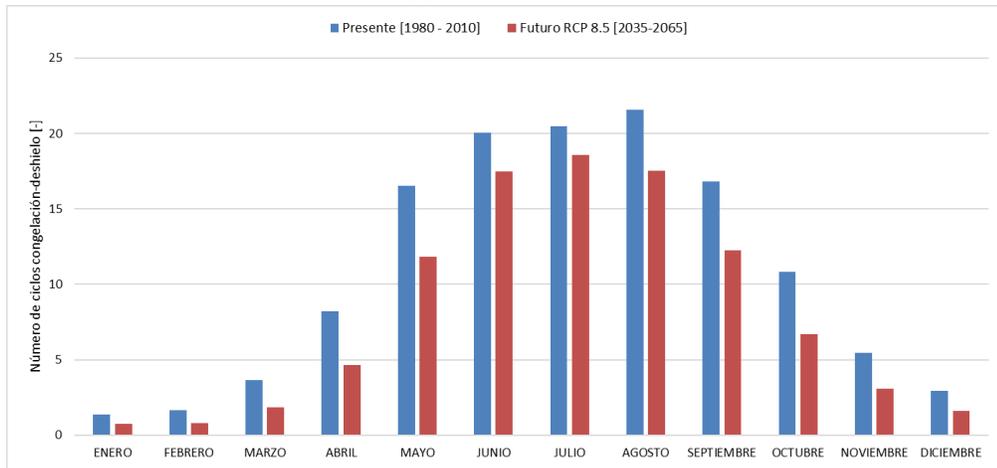
(b) Ciclos Congelación-Deshielo

Figura 5.2: Promedios de (a) precipitaciones y (b) cantidad de ciclos mensuales de las provincias de la región de Valparaíso en el presente [1980-2010] y el futuro RCP 8.5 [2035-2065]. Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos del Explorador de Amenazas Climáticas.

5.1.3. Magallanes



(a) Precipitación



(b) Ciclos Congelación-Deshielo

Figura 5.3: Promedios de (a) precipitaciones y (b) cantidad de ciclos mensuales de las provincias de la región de Magallanes en el presente [1980-2010] y el futuro RCP 8.5 [2035-2065]. Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos del Explorador de Amenazas Climáticas.

5.1.4. Zonificación de grados de exposición en futuro - Congelación-deshielo

Finalmente, debido a que se cuenta con todos los datos. Se muestran los resultados del cambio de grado de exposición que hay entre el período considerado como presente (1980-2010) y futuro (2035-2065) para cada región de Chile.

Tabla 5.1: Grados de exposición de cada región de Chile para el agente de ataque externo Congelación y deshielo". Fuente: (Elaboración propia).

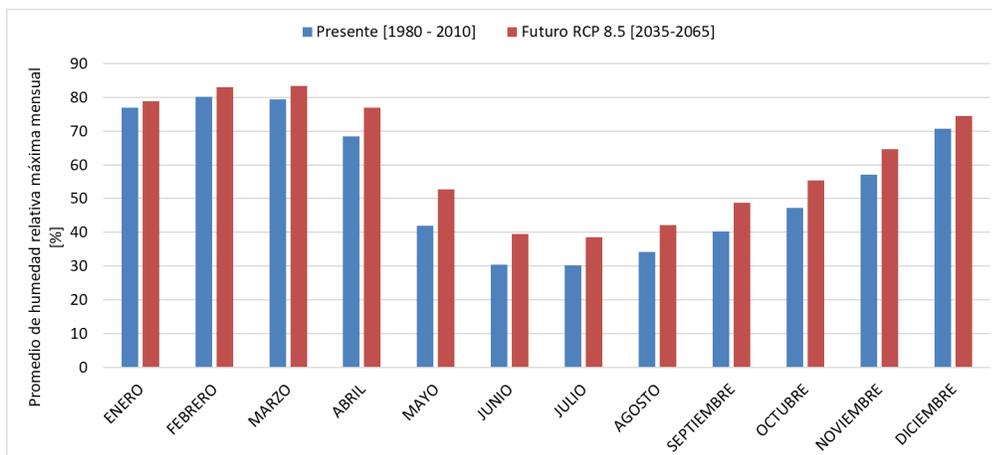
REGIÓN	Grado de exposición 1980-2010	Grado de exposición 2035-2065	Meses de cambio
ANTOFAGASTA	F0/F1	F0/F1	
ARICA Y PARINACOTA	F0/F1	F0/F1	
ATACAMA	F0	F0	
AYSÉN	F2	F2	
COQUIMBO	F0/F1	F0/F1*	SEPT
LA ARAUCANÍA	F1/F2	F1/F2*	DIC-MAR
LOS LAGOS	F2	F2	
LOS RÍOS	F2	F1/F2*	FEB
MAGALLANES	F2/F3	F2/F3*	JUN-JUL-AGO-SEPT
ÑUBLE	F1/F2	F1/F2	
TARAPACÁ	F0/F1	F0/F1*	MAR
VALPARAÍSO	F0/F1/F2	F0/F1/F2*	OCT-MAY
DEL BIOBÍO	F1/F2	F1/F2	
O'HIGGINS	F0/F1/F2	F0/F1/F2*	NOV-SEPT
DEL MAULE	F0/F1/F2	F0/F1/F2*	FEB-ABR
METROPOLITANA	F0/F1/F2	F0/F1/F2	

Nota. Los valores con un símbolo de "*" son aquellos que presentan una variación en algunos de sus meses.

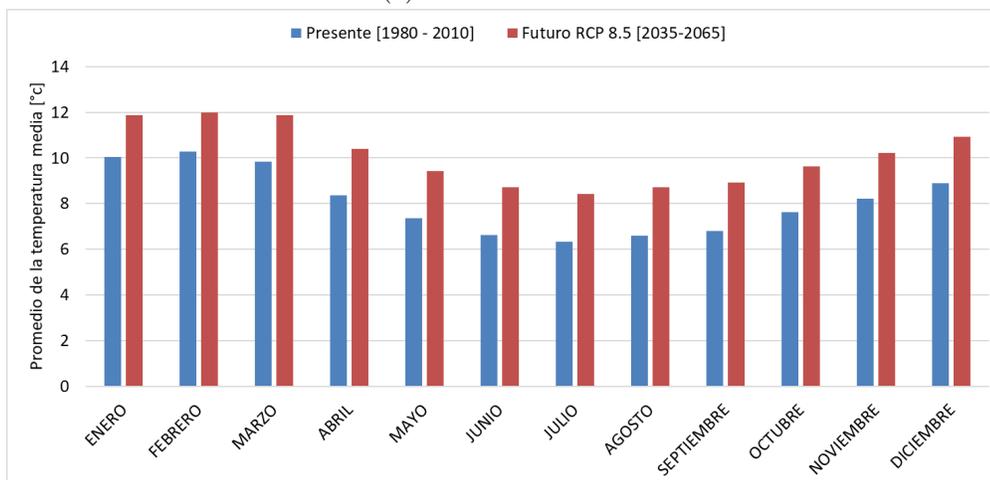
5.2. Ataque por sulfatos

Para el análisis de ataque por sulfatos se analiza la variación de los promedios de temperatura, con un enfoque en aquellas temperaturas que disminuyan en el futuro, en conjunción con el cumplimiento de tener al menos un 95 % de humedad relativa en el mismo mes, donde se analiza el promedio de valores máximos de humedad relativa mensual por región.

5.2.1. Arica y Parinacota



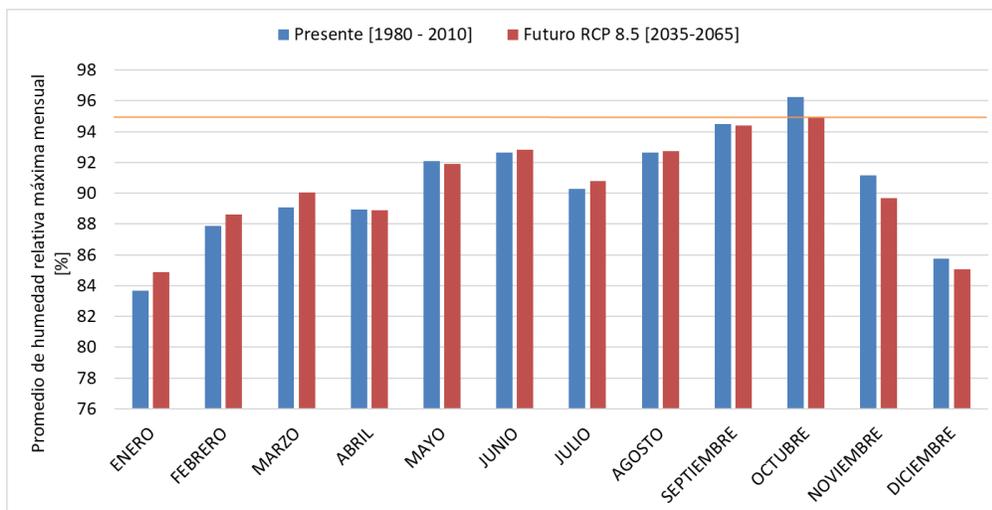
(a) Humedad relativa



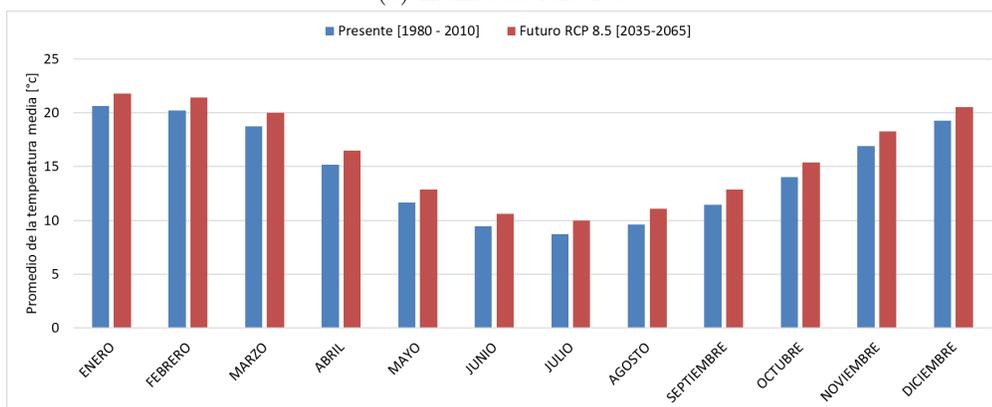
(b) Temperatura media

Figura 5.4: Promedios de (a) humedad relativa y (b) temperatura media mensual de las provincias de la región de Arica y Parinacota en el presente [1980-2010] y el futuro RCP 8.5 [2035-2065]. Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos del Explorador de Amenazas Climáticas.

5.2.2. Región Metropolitana



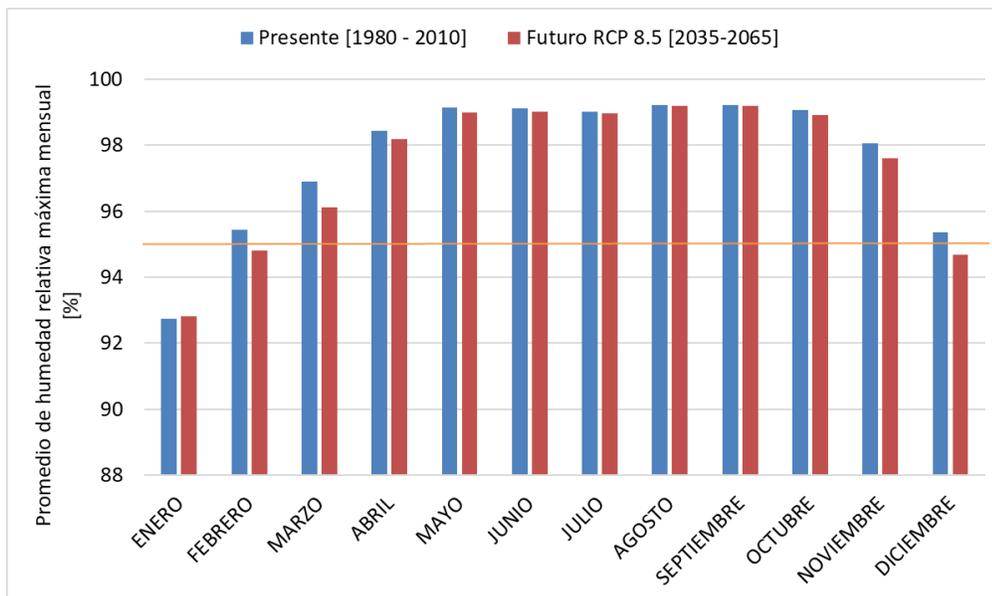
(a) Humedad relativa



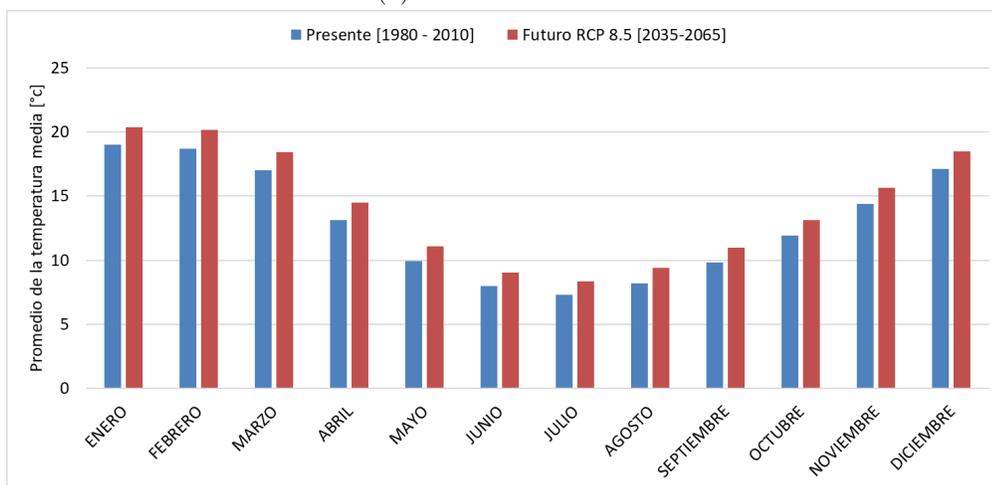
(b) Temperatura media

Figura 5.5: Promedios de (a) humedad relativa y (b) temperatura media mensual de las provincias de la región Metropolitana en el presente [1980-2010] y el futuro RCP 8.5 [2035-2065]. Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos del Explorador de Amenazas Climáticas.

5.2.3. Ñuble



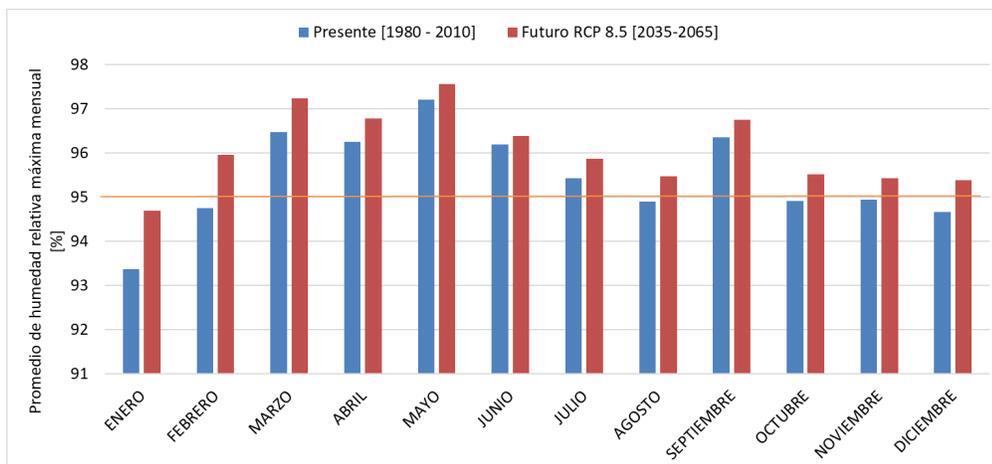
(a) Humedad relativa



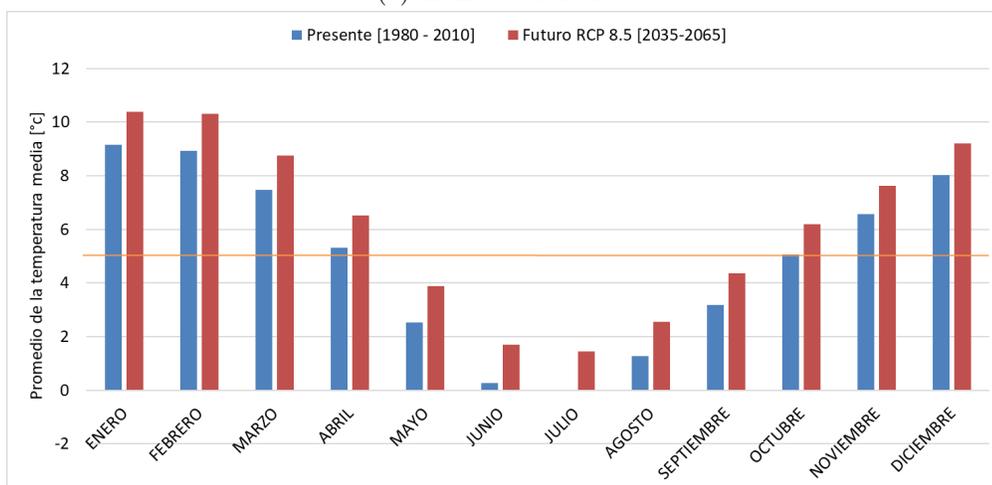
(b) Temperatura media

Figura 5.6: Promedios de (a) humedad relativa y (b) temperatura media mensual de las provincias de la región de Ñuble en el presente [1980-2010] y el futuro RCP 8.5 [2035-2065]. Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos del Explorador de Amenazas Climáticas.

5.2.4. Magallanes



(a) Humedad relativa



(b) Temperatura media

Figura 5.7: Promedios de (a) humedad relativa y (b) temperatura media mensual de las provincias de la región de Magallanes en el presente [1980-2010] y el futuro RCP 8.5 [2035-2065]. Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos del Explorador de Amenazas Climáticas.

Los niveles de SO_2 y CO_2 se muestran también como promedios mensuales en cada región de Chile.

Los niveles de sulfato atmosférico se muestran como promedio de un período de 3 años de toma de muestras a lo largo de Chile, analizando los promedios mensuales y por macrozona chilena:

5.2.5. Norte grande y altiplano chileno

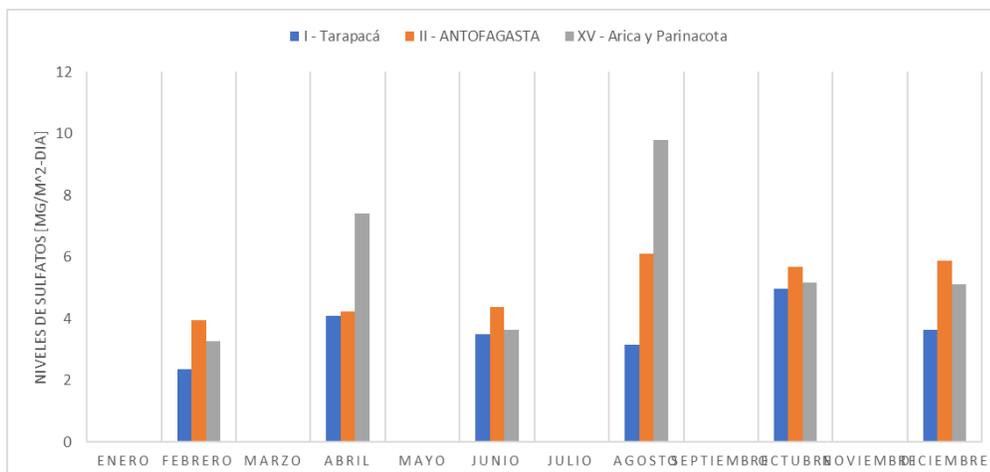


Figura 5.8: Niveles de SO_2 [$mg/m^2 - dia$] en las zonas del altiplano chileno y el norte grande. Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos del Mapa de corrosión atmosférica de Chile, proyecto INNOVA.

5.2.6. Norte chico

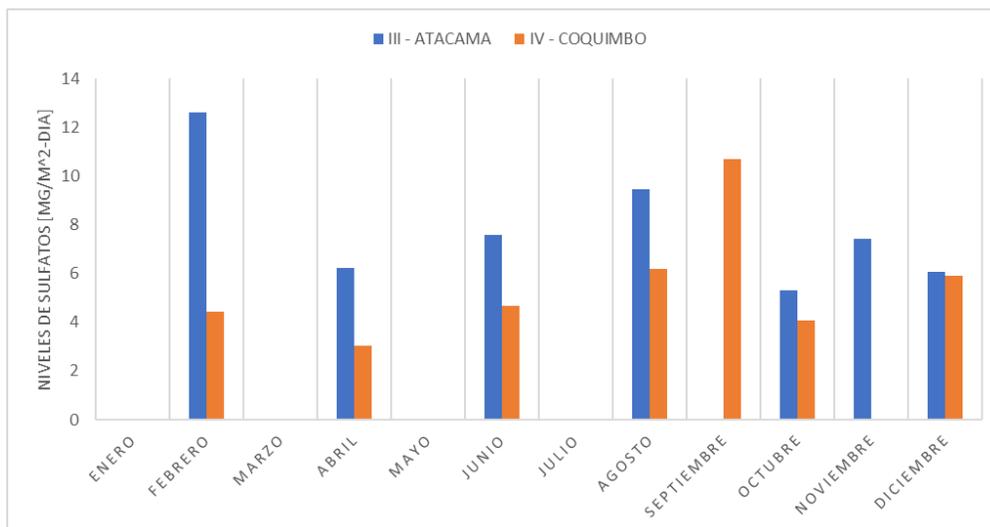


Figura 5.9: Niveles de SO_2 [$mg/m^2 - dia$] en la zona del norte chico chileno. Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos del Mapa de corrosión atmosférica de Chile, proyecto INNOVA.

5.2.7. Chile central

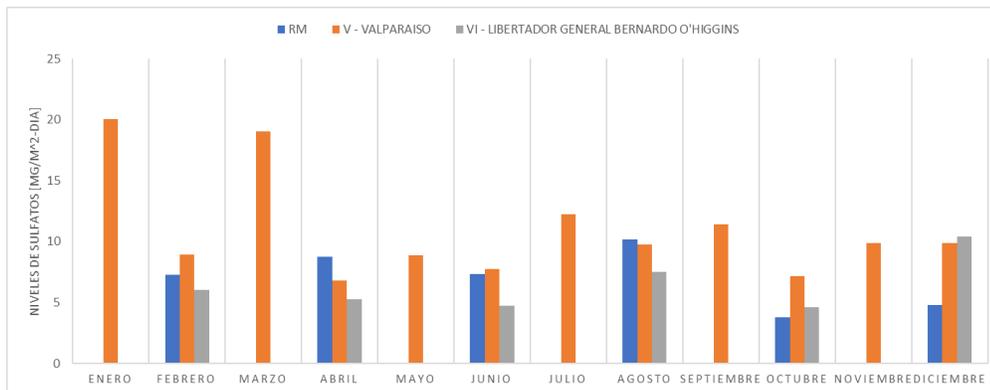


Figura 5.10: Niveles de SO_2 [$mg/m^2 - dia$] en la zona de Chile central. Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos del Mapa de corrosión atmosférica de Chile, proyecto INNOVA.

5.2.8. Sur

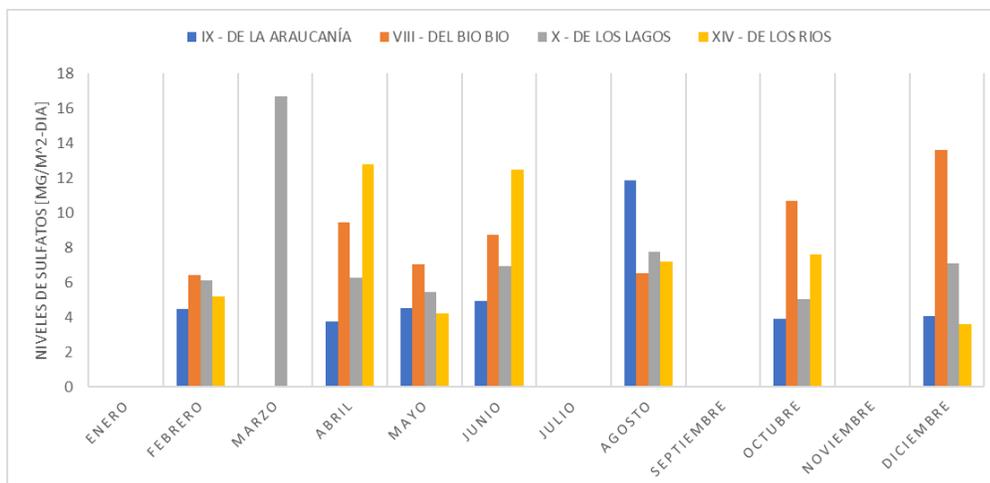


Figura 5.11: Niveles de SO_2 [$mg/m^2 - dia$] en la zona sur de Chile. Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos del Mapa de corrosión atmosférica de Chile, proyecto INNOVA.

5.2.9. Magallanes y antártica chilena

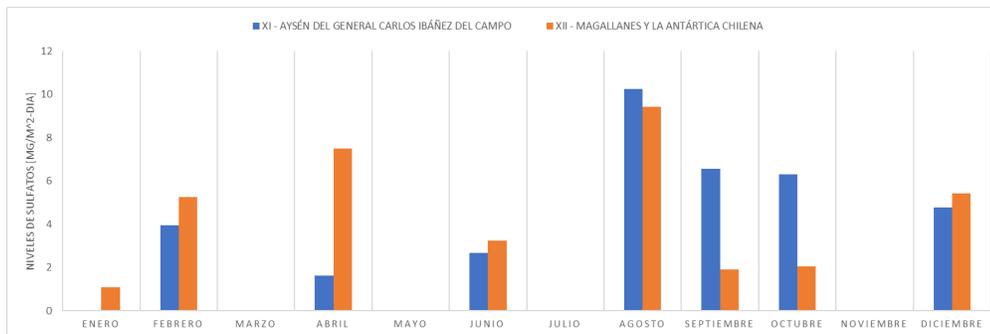


Figura 5.12: Niveles de SO_2 [$mg/m^2 - dia$] en la zona extremo sur de Chile. Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos del Mapa de corrosión atmosférica de Chile, proyecto INNOVA.

Finalmente, se muestran los niveles de las emisiones, absorciones y balance de CO_2 de las regiones más particulares de Chile como período presente desde 1900 hasta 2018.

5.2.10. Arica

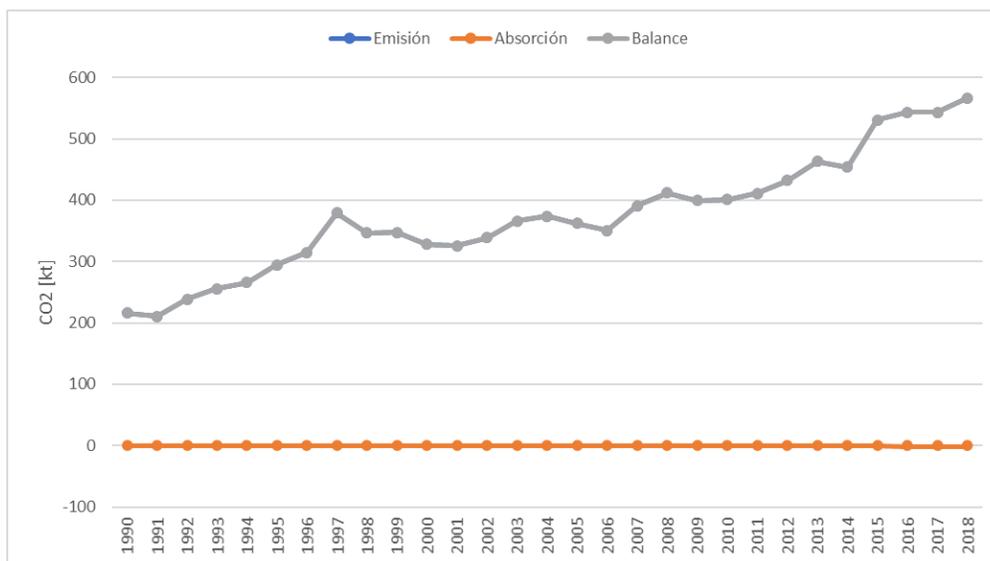


Figura 5.13: Emisiones, absorciones y balance de CO_2 [kt] en la región de Arica. Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos del inventario regional del 4° informe bienal de actualización de Chile sobre el cambio climático.

5.2.11. Tarapacá

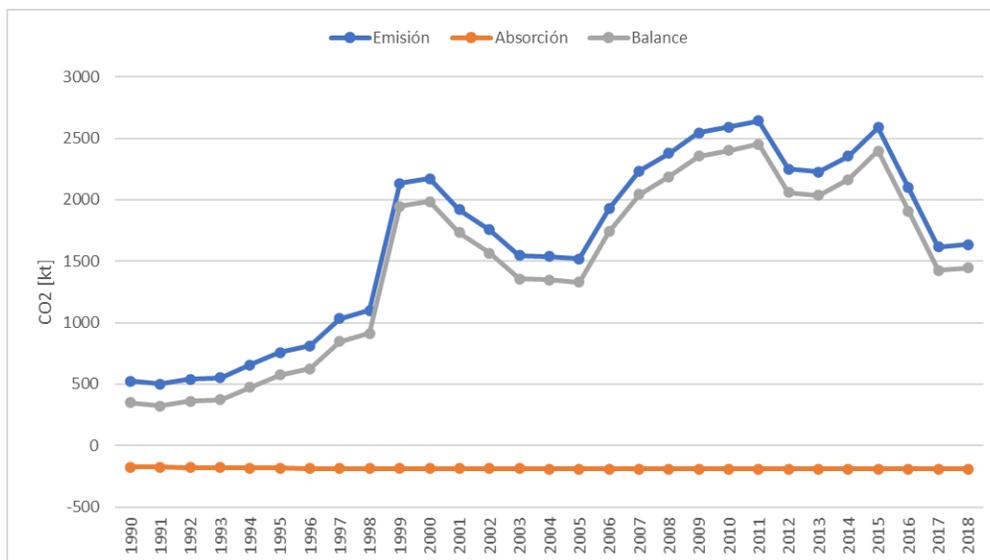


Figura 5.14: Emisiones, absorciones y balance de CO_2 [kt] en la región de Tarapacá. Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos del inventario regional del 4° informe bienal de actualización de Chile sobre el cambio climático.

5.2.12. Ñuble

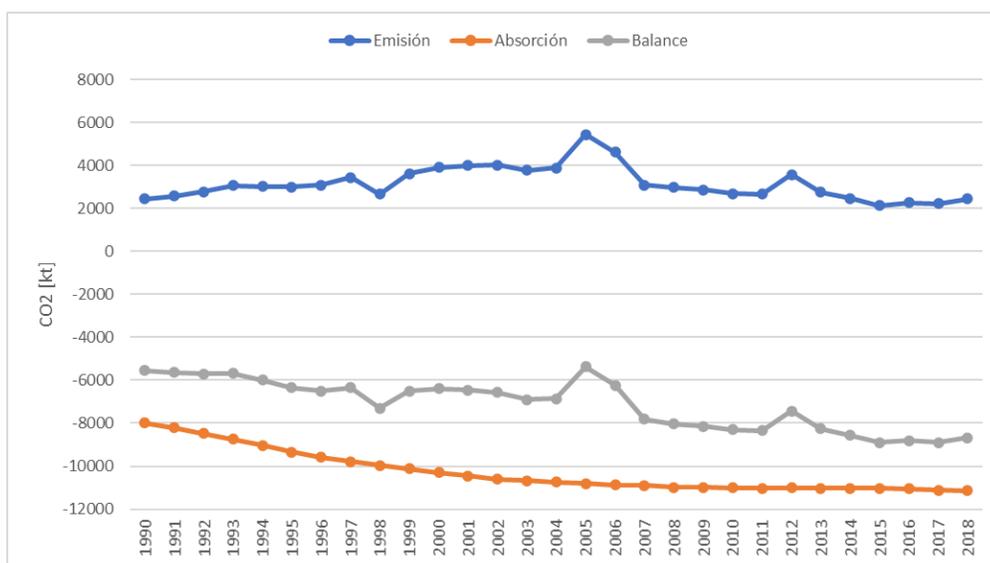


Figura 5.15: Emisiones, absorciones y balance de CO_2 [kt] en la región de Ñuble. Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos del inventario regional del 4° informe bienal de actualización de Chile sobre el cambio climático.

5.3. Ataque por corrosión de la armadura

Para el proceso de corrosión se analizan los dos factores que impulsan su ocurrencia: La carbonatación y el ataque por cloruros.

El proceso de carbonatación ocurre cuando la humedad relativa oscila entre el 50 y el 70 %, por lo tanto se muestran niveles de humedad de regiones características de su zona, demarcando con un recuadro amarillo la zona de posible ocurrencia de carbonatación.

5.3.1. Arica

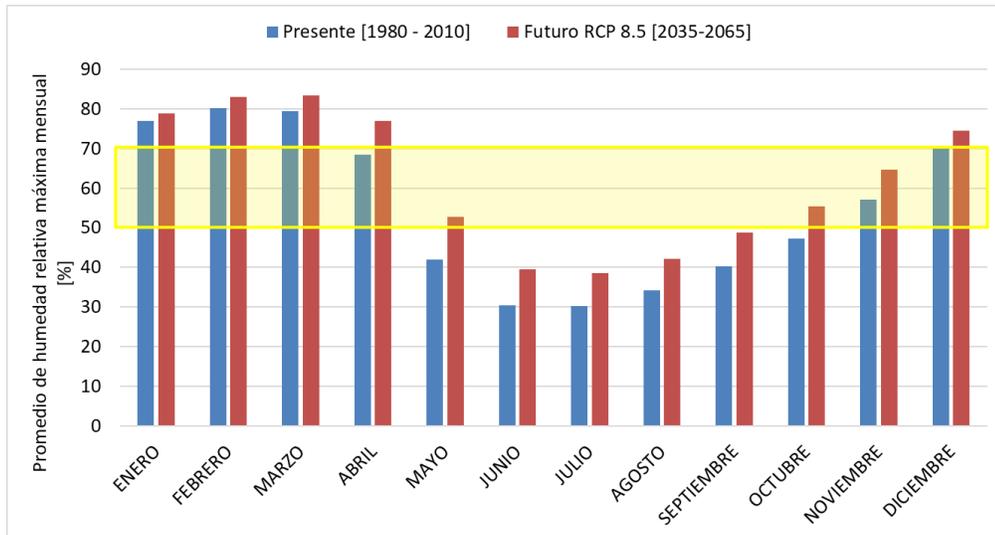


Figura 5.16: Humedad relativa mensual [%] en la región de Arica. Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos del Explorador de Amenazas Climáticas.

5.3.2. Atacama

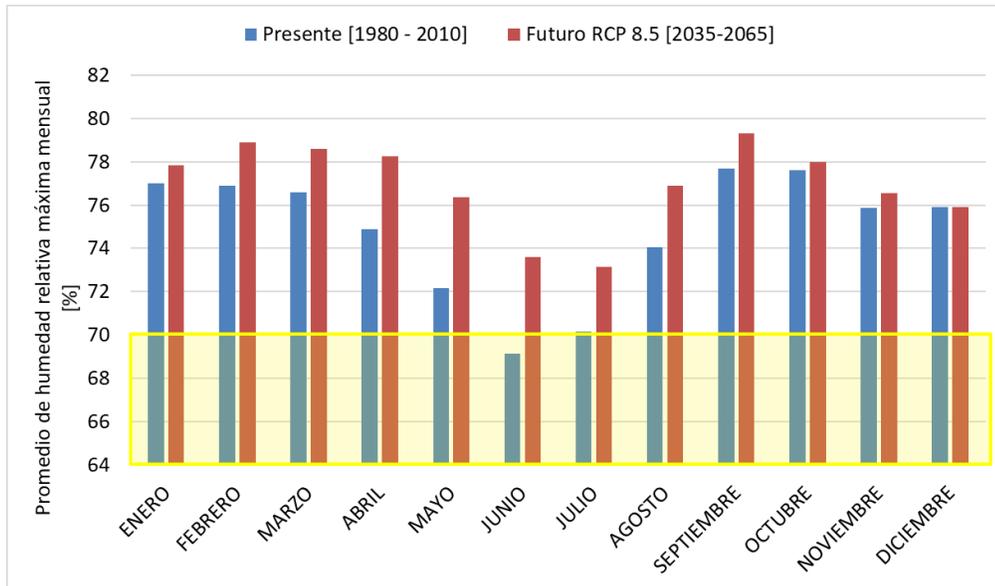


Figura 5.17: Humedad relativa mensual [%] en la región de Atacama. Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos del Explorador de Amenazas Climáticas.

5.3.3. Bío bío

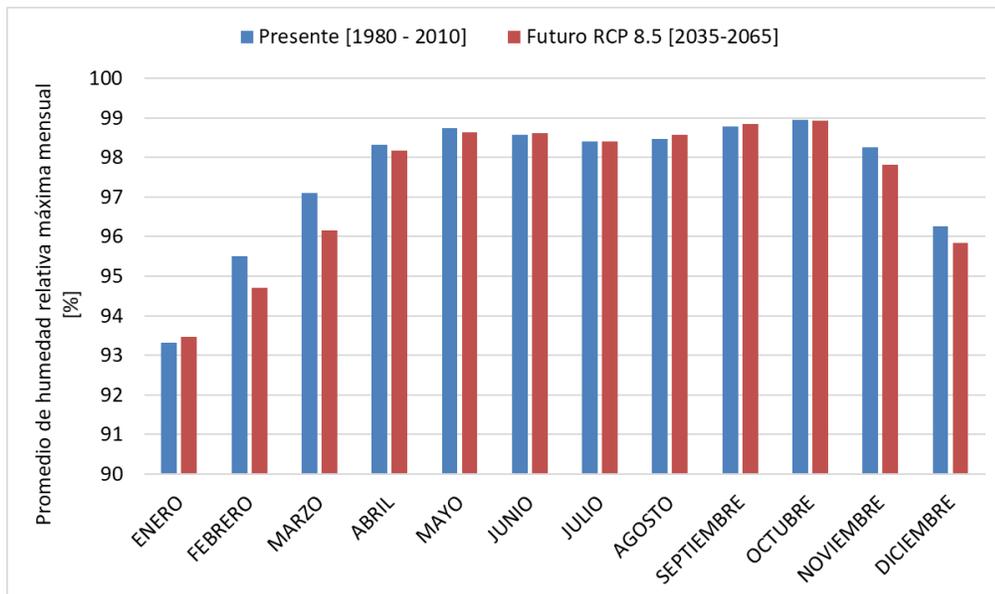


Figura 5.18: Humedad relativa mensual [%] en la región de Bío bío. Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos del Explorador de Amenazas Climáticas.

El ataque por cloruros ocurre principalmente en ambiente marino y en el empleo de sales descongelantes, las cuales se utilizan cuando las temperaturas descienden de 0°C. Es por esto, que se muestran la cantidad de días por mes que las temperaturas mínimas están debajo de 0°C, promediadas de acuerdo con cada macrozona chilena.

5.3.4. Norte grande y altiplano chileno

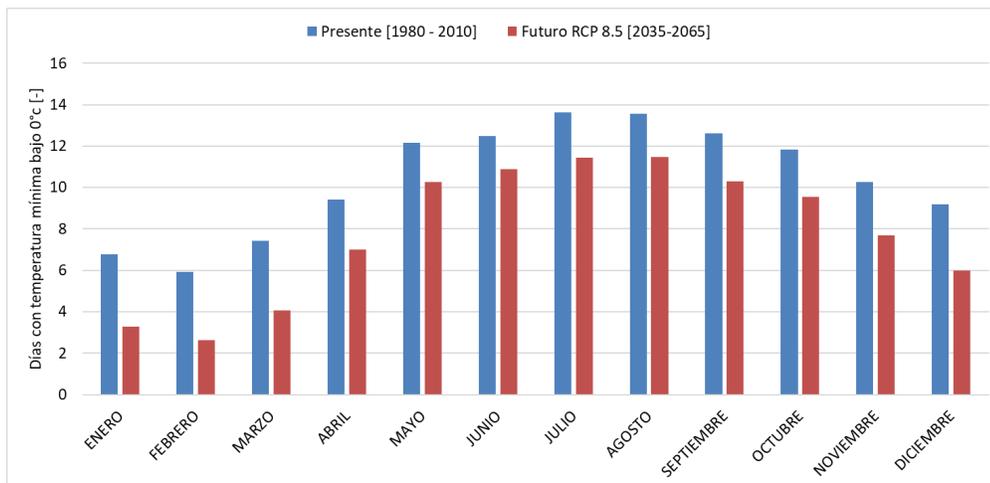


Figura 5.19: Cantidad de días al mes en que la temperatura mínima es menor a 0°C, como promedio de las provincias que componen el altiplano chileno y el norte grande. Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos del Explorador de Amenazas Climáticas.

5.3.5. Norte chico

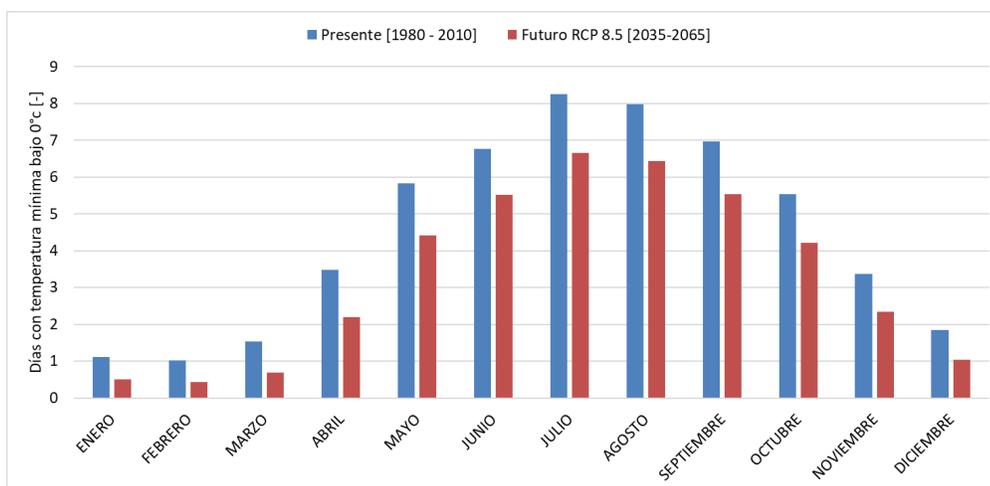


Figura 5.20: Cantidad de días al mes en que la temperatura mínima es menor a 0°C, como promedio de las provincias que componen el norte chico chileno. Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos del Explorador de Amenazas Climáticas.

5.3.6. Chile central

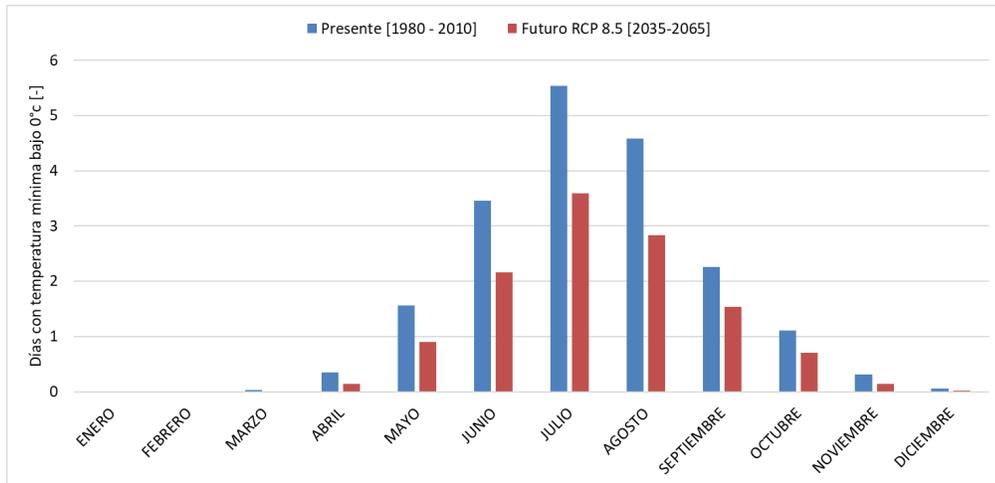


Figura 5.21: Cantidad de días al mes en que la temperatura mínima es menor a 0°C, como promedio de las provincias que componen Chile central. Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos del Explorador de Amenazas Climáticas.

5.3.7. Sur

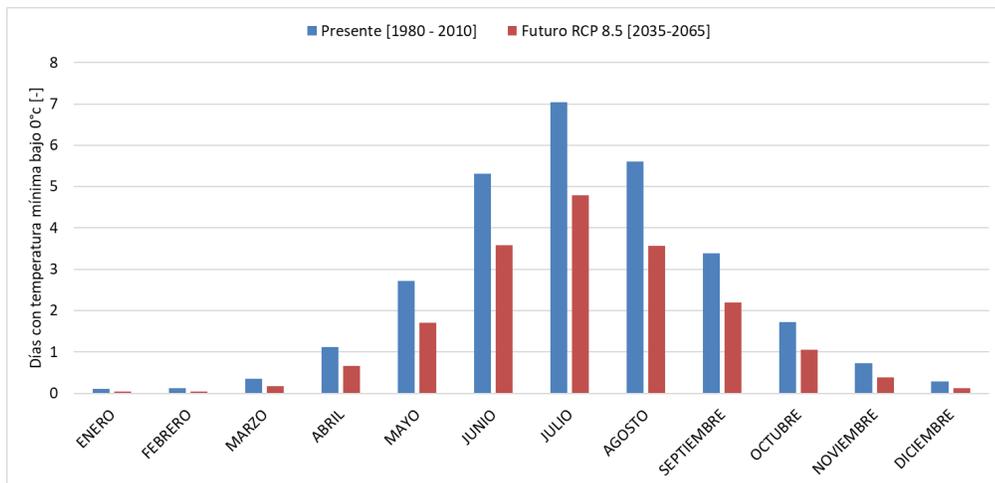


Figura 5.22: Cantidad de días al mes en que la temperatura mínima es menor a 0°C, como promedio de las provincias que componen la zona sur de Chile. Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos del Explorador de Amenazas Climáticas.

5.3.8. Magallanes y antártica chilena

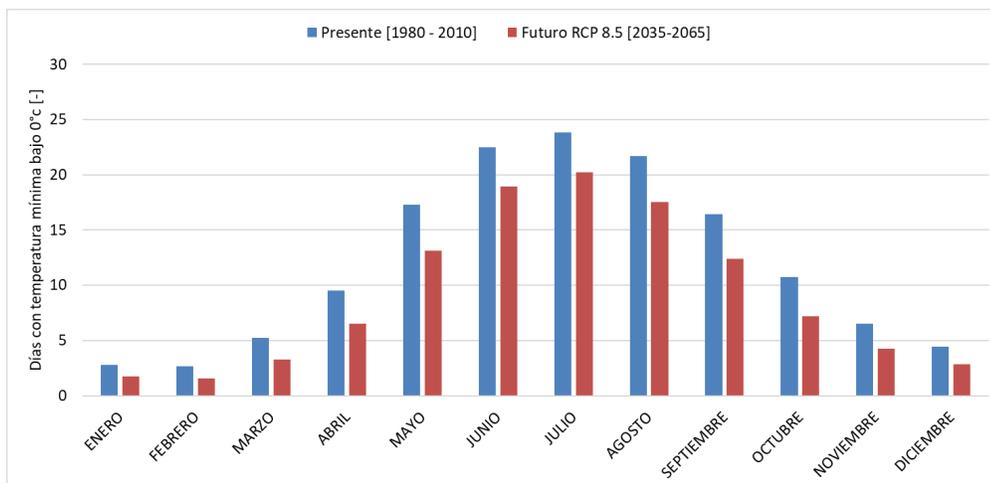


Figura 5.23: Cantidad de días al mes en que la temperatura mínima es menor a 0°C, como promedio de las provincias que componen la zona extremo sur de Chile. Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos del Explorador de Amenazas Climáticas.

5.4. Estimaciones futuras de CO_2

De forma complementaria, al no contar con proyecciones de CO_2 que involucren el cambio climático, se realizan estimaciones con regresión cuadrática (debido a que contaba con el mayor coeficiente de determinación) para un futuro hasta 2065.

Las estimaciones se organizan en un mismo gráfico con el objetivo de pertenecer a una escala parecida, sin otro objetivo.

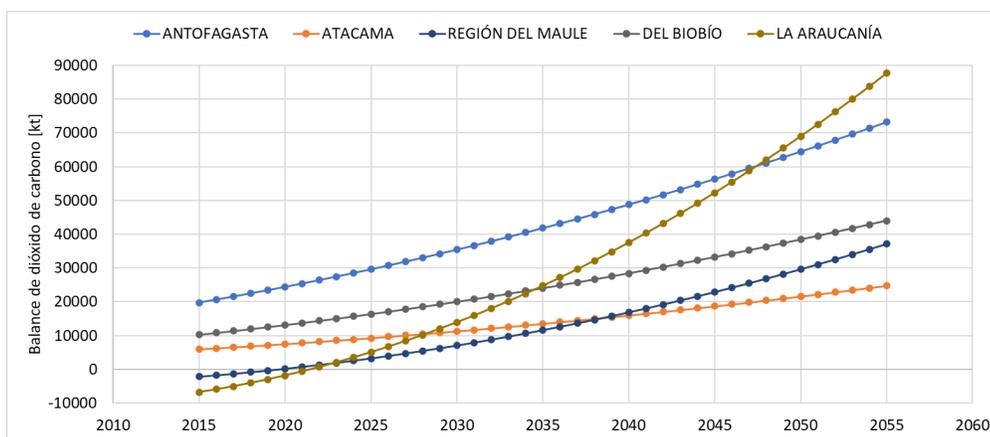


Figura 5.24: Estimación de niveles de CO_2 atmosférico mediante la utilización de una regresión cuadrática para las regiones de Antofagasta, Atacama, Maule, Bío bio y la Araucanía. Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos del inventario regional del 4° informe bienal de actualización de Chile sobre el cambio climático.

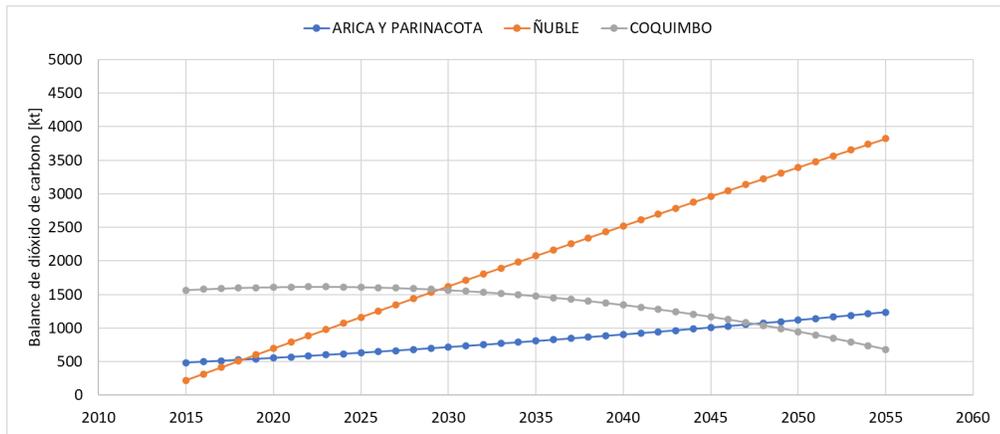


Figura 5.25: Estimación de niveles de CO_2 atmosférico mediante la utilización de una regresión cuadrática para las regiones de Arica y Parinacota, Ñuble y Coquimbo. Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos del inventario regional del 4° informe bienal de actualización de Chile sobre el cambio climático.

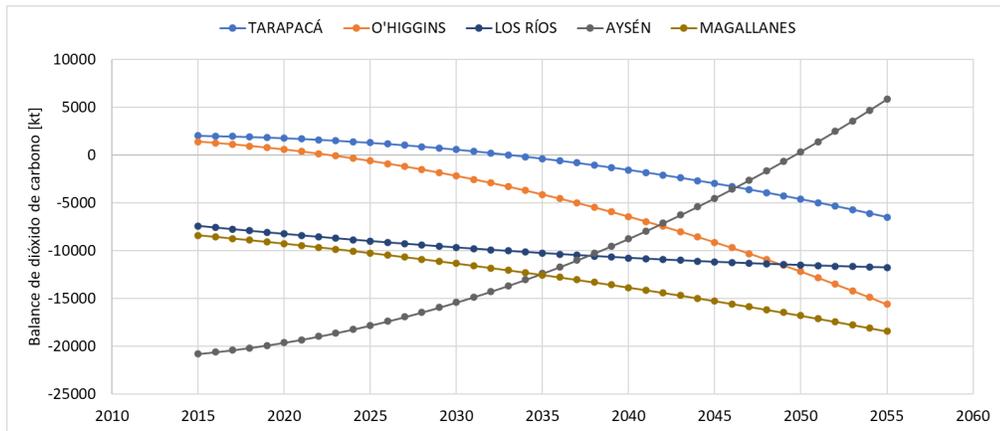


Figura 5.26: Estimación de niveles de CO_2 atmosférico mediante la utilización de una regresión cuadrática para las regiones de Tarapacá, O'higgins, Los ríos, Aysén y Magallanes. Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos del inventario regional del 4° informe bienal de actualización de Chile sobre el cambio climático.

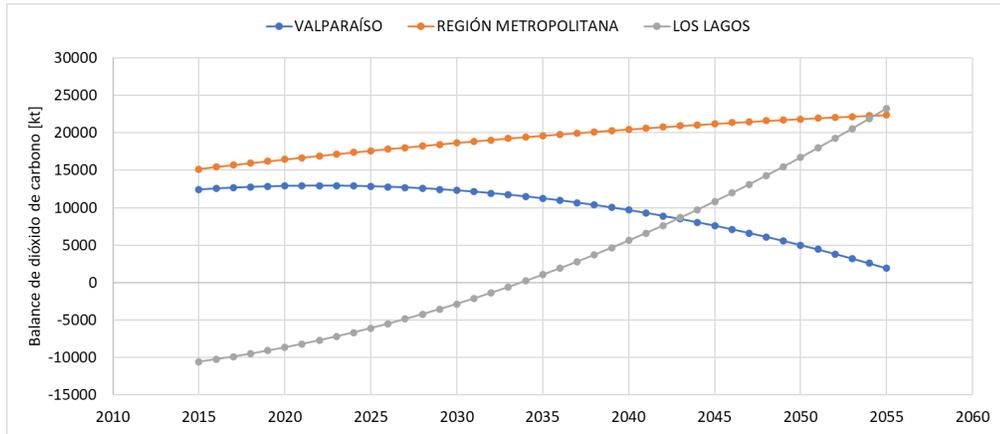


Figura 5.27: Estimación de niveles de CO_2 atmosférico mediante la utilización de una regresión cuadrática para las regiones de Valparaíso, Región Metropolitana y Los Lagos. Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos del inventario regional del 4° informe bienal de actualización de Chile sobre el cambio climático.

5.4.1. Zonificación de grados de exposición en futuro - Carbonatación

Con estas estimaciones es posible realizar una comparación respecto a los niveles de CO_2 del grado de exposición entre presente y futuro de los niveles de carbonatación.

Tabla 5.2: Grados de exposición presente y futuro de carbonatación debido a la presencia de CO₂ atmosférico, utilizando las estimaciones de dióxido de carbono. Fuente: (Elaboración propia).

REGIÓN	Grado de exposición 1980-2010	Grado de exposición 2035-2065
ANTOFAGASTA	C1	C1
ARICA Y PARINACOTA	C1	C1
ATACAMA	C1	C1
AYSÉN	C0	C1
COQUIMBO	C1	C1
LA ARAUCANÍA	C0	C1
LOS LAGOS	C0	C1
LOS RÍOS	C0	C0
MAGALLANES	C0	C0
ÑUBLE	C1	C1
TARAPACÁ	C1	C0
VALPARAÍSO	C1	C0
DEL BIOBÍO	C1	C1
O'HIGGINS	C1	C0
DEL MAULE	C0	C1
METROPOLITANA	C1	C1

Análisis de resultados

Mediante la realización de proyecciones en el futuro RCP 8.5 se pueden observar variabilidades en distintos parámetros del clima. Primeramente, las temperaturas irán en aumento a lo largo de todo Chile, tanto las temperaturas mínimas, máximas como medias. Sin embargo, estos aumentos no son igualmente distribuidos a lo largo y ancho de Chile.

Sectores característicos que comparten la cualidad de tener ambiente marino, dentro del territorio centro-sur de Chile, se inclinan a tener menores variaciones graduales de temperatura anual, tales como la comunas de quinchao y guaitecas en la región de Aysén con una variación de 0.71°C y 0.75°C y la comuna de el quisco en la región de Valparaíso con una variación de 0.85°C .

De manera contraria, el sector del norte grande, y con mayor intensidad en el altiplano chileno, se presentan las mayores variaciones de temperatura en los 55 años. Estas variaciones en el altiplano son mayores a 1.8°C , es decir 1°C mayor que las variaciones más bajas. Y se ven acentuadas en el período de invierno, alcanzando los 2.38°C de aumento en la comuna de Putre.

De esta misma manera, y como consecuencia del aumento de temperaturas, ninguna de las regiones de Chile aumenta su número de ciclos de congelación y deshielo, o bien, la probabilidad de que este fenómeno suceda debido al factor temperatura, ya que se reduce la cantidad de días que la temperatura mínima es menor a 0°C .

Con el objetivo de zonificar los sectores más afectados por esta variación de las temperaturas de congelación y deshielo, la menor disminución porcentual se ubica en la región de Magallanes, en el período de invierno, con un 8.99% de reducción; y la mayor se ubica en la región del Maule, en la estación de verano, con un 97.8% de reducción de la cantidad días que la temperatura mínima es menor a 0°C y a la vez, la máxima es mayor a 0°C .

Las lluvias acumuladas siguen el mismo patrón en beneficio del hormigón en la mayoría de las regiones de Chile, exceptuando el extremo sur. En el sector norte y extremo sur de Chile se encuentran los más altos índices de lluvia acumulada del país, pero los mm de lluvia acumulada se ven disminuidos a futuro en el verano del sector norte. De modo contrario, las lluvias acumuladas aumentan su magnitud en el extremo sur de Chile, dando lugar a que estas regiones (Aysén y Magallanes) superen constantemente el valor de saturación alta que requiere el hormigón para que el fenómeno de congelación-deshielo ocurra.

Para efectos de la zonificación por congelación y deshielo, la mitad de las regiones presentan alguna variación de su grado de exposición. Sin embargo, estas variaciones corresponden sólo

a algunos meses del año. Con excepción de la región de Magallanes, todas las regiones que presentan cambios disminuyen su grado de exposición; Coquimbo pasa de F1 a F0 en el mes de septiembre, La Araucanía pasa de F2 a F1 en los meses de diciembre y marzo, la región de Los Ríos pasa de F2 a F1 en el mes de febrero, y así consecutivamente en las regiones de Tarapacá, Valparaíso, Del Bío Bío, O'higgins y del Maule. Como se dijo anteriormente, la región de Magallanes es la única que presenta un aumento en su grado de exposición, pasando de F1 a F2 en aquellas regiones donde no hay precipitación de nieve.

Para efectos del ataque por sulfatos y el ataque por corrosión de la armadura, la humedad relativa juega un papel fundamental. Es por esto que sólo se analizan las humedades relativas máximas mensuales por región. Para el sector centro y norte de Chile éstas aumentan en la mayoría de los meses del año, sin embargo no alcanzan los valores necesarios para perjudicar el hormigón en cuanto a sulfatación. De modo contrario, en el sector sur y austral de Chile, los valores de humedad relativa máxima no disminuyen de 96 % en ninguna época del año, además, en el futuro proyectado, estos valores varían entre un -0.9 % y un 1.1 %. De esta manera se puede observar que el ataque por sulfatos no influye ni lo hará en los hormigones del sector centro y norte de Chile (si solo depende de condiciones atmosféricas y no hay eventos particulares que afecten estos parámetros). En cambio, en el sector sur y austral de Chile si se presentan niveles de humedad suficientes para que los fenómenos de corrosión y sulfatación ocurran.

Los resultados de SO_2 y Cl^- se comportan de manera aleatoria a medida que pasa el tiempo, por lo que se puede inferir que el tiempo no es directamente influyente en cuanto a los niveles de estos parámetros. Tampoco se identifica un patrón de aumento o disminución a lo largo de Chile, por lo que también es descartada la influencia de la variación de latitud.

Para los niveles de CO_2 se aprecia un aumento constante en las emisiones del sector centro y norte de Chile. Por el contrario, en el sector sur y austral de Chile se observan esfuerzos por mantener constantes los niveles de emisiones, y además, un esfuerzo por aumentar los niveles de absorciones gracias a la flora y el uso de tierras. Las singularidades que se visualizan en los gráficos, representadas por saltos que aumentan las emisiones responden usualmente a incendios forestales de grandes magnitudes.

Hasta hoy, las emisiones desde 1990 hasta 2018 a nivel nacional han aumentado un 128 %. Como visualización a futuro, si no se toman las medidas necesarias para mitigar las emisiones de GEI, los niveles de CO_2 atmosférico podrían continuar aumentando paralelamente con el aumento mundial de este parámetro donde se alcanza hasta un 300 % de aumento. Como estos datos no lograron ser obtenidos para este trabajo (las proyecciones futuras con modelos de cambio climático), la realización de una regresión permite observar una de las posibilidades de proyección de CO_2 a futuro.

Si bien, la regresión para cada región es independiente, éstas no llevan un patrón notorio por zonas de Chile. Ningún coeficiente de determinación supera el 95 % y el menor de ellos se presenta en la región del Bío Bío con un 42 %. Cabe destacar que para cada regresión se omitieron los valores puntuales que sobresalen de la escala y representan incendios forestales. Esto no cambia la orientación de la regresión, ya que cuando hay incendio forestal, los valores vuelven a situarse en el rango anterior al incendio para el año siguiente, infiriendo que los incendios forestales no demarcan nuevos límites de emisión o absorción.

Las estimaciones con regresión lineal de CO_2 sólo continúan un patrón de comportamiento a lo largo del tiempo y no denotarán si en el futuro se realizan cambios nacionales o leyes en beneficio o perjuicio del sistema climático. De esta manera, todas aquellas regiones que aumentan sus emisiones podrían responder a las trayectorias de emisión RCP 8.5 o RCP 4.6. De modo contrario, las proyecciones que disminuyen sus emisiones e inclusive se convierten en sumideros, responderían a trayectorias de emisión RCP 2.6.

Con estas estimaciones de CO_2 se logra aseverar un posible comportamiento a futuro de la sulfatación y la carbonatación. La sulfatación no se ve influida por la cantidad de CO_2 atmosférico, ya que sólo requiere la presencia de este compuesto y es el SO_2 quien reacciona en el interior del hormigón. Una mayor o menor cantidad de CO_2 no logrará que para un mismo nivel de SO_2 , bajo las condiciones necesarias, tenga un mayor o menor grado de sulfatación en un tiempo determinado.

De modo contrario, la carbonatación si depende de la concentración de CO_2 atmosférico, de modo que una mayor (o menor) cantidad de este en la atmósfera, provocará que una mayor (o menor) composición de los compuestos que ingresen al hormigón sean CO_2 , generando una más rápida (o más lenta) caída del PH del hormigón, dando lugar al fenómeno de la carbonatación y posterior corrosión de la armadura. Sin embargo, al guiarnos por los grados de exposición de la NCH170, éste sólo cambia entre C0 (no hay presencia de CO_2 y C1 (niveles de CO_2 suficientes para provocar corrosión).

Es así como se ve que algunas regiones de Chile cambian su grado de exposición a carbonatación desde C0 a C1 (Aysén, Araucanía, Los lagos, el Maule), otras desde C1 a C0 (Tarapacá, Valparaíso y O'higgins) y las demás no observan cambios (refiriéndose a tener, o no, emisiones de GEI) entre los dos períodos mencionados.

Conclusiones

Se cumple con tres de los cuatro objetivos específicos de este trabajo de título. Se realizan modelos de cambio climático y se analizan los cambios que generan en los agentes de ataque externo (Temperaturas, lluvias, humedad relativa, niveles de CO_2 y niveles de SO_2). También se modelan las consecuencias que puede generar el cambio climático para dichos agentes, generando conexiones entre los parámetros que varían con el clima y los parámetros que afectan a los agentes de ataque externo.

Se revisa la normativa actual chilena y se consideran definiciones de durabilidad y vida útil que involucren al cambio climático.

No se logran obtener proyecciones de cloruro atmosférico, sulfato atmosférico ni dióxido de carbono. De éste último parámetro sólo se tienen las proyecciones globales a nivel mundial, sin embargo se realiza una estimación de posibilidad de emisiones futuras, conllevando a cambios en los grados de exposición de carbonatación en algunas regiones de Chile.

Con estos resultados no es posible realizar una nueva zonificación para sulfatación ni para ataque por cloruros debido a la falta de proyecciones de estos parámetros en el futuro. De este modo, la única zonificación que puede ser modificada es la de congelación y deshielo y la carbonatación.

Los parámetros principales necesarios para que ocurra el fenómeno de congelación y deshielo en el hormigón, son ciclos de temperatura que disminuyan bajo los 0°C y luego aumenten sobre los 0°C el mismo día, en conjunción con una alta saturación (al menos 50mm de lluvia acumulada por mes). Si bien en el sector austral de Chile los niveles de lluvia acumulada sobrepasa el límite y debido al cambio climático seguirán aumentando, las temperaturas están en constante aumento y, por lo tanto, habrá menor cantidad de ciclos de congelación-deshielo, a pesar del aumento de lluvia acumulada. El factor temperatura tiene una correlación más alta que la precipitación acumulada, cuando esta última ya ha sobrepasado los límites. De esta manera, las únicas regiones que presentan cambios positivos en sus grados de exposición son las regiones de Coquimbo, La Araucanía, Los Ríos, Tarapacá, Valparaíso, Del Bío Bío, O'higgins y del Maule, disminuyendo en 1 sus grados de exposición para algunos meses del año, pasando de F2 a F1 o F1 a F0. De modo contrario, la región de Magallanes aumenta en algunos meses su grado de exposición pasando de F1 a F2.

Es justamente debido a que en una misma región coexisten distintos grados de exposición que el mapa de zonificación no puede ser realizado de forma óptima y queda a disposición de una línea futura la realización con algún programa que permita distribuir en una misma región más de un grado de exposición.

Para poder realizar zonificaciones de los otros agentes de ataque externo del hormigón es necesaria la obtención de las proyecciones de CO_2 atmosférico, utilizando modelos que involucren el cambio climático. Además, encontrar relaciones que involucren las variaciones de Cl^- y SO_2 al sistema climático, ya que las relaciones con respecto a las estaciones del año y el avance del tiempo no presentan un patrón de comportamiento para estos parámetros.

De forma complementaria, para analizar de manera óptima cómo se ve afectada la carbonatación debido al cambio climático, se debe agregar al estudio de humedad relativa máxima, además de las proyecciones de CO_2 adecuadas, las humedades relativas mínimas. Así, será posible tener el rango de humedades que se tienen en cada región. De esta manera, se puede verificar con mayor certeza si se cumple la condición de humedad relativa (entre 50 y 70 %) para que se produzca el fenómeno de carbonatación.

Al tener los datos completos de humedad relativa, además de las proyecciones de SO_2 , Cl^- y CO_2 con relación al cambio climático en Chile, será posible identificar si existen variaciones respecto a los niveles actuales y, de ser así, realizar una nueva zonificación adaptado a los niveles proyectados. Si estas zonificaciones superan las delimitaciones actuales en la normativa chilena, es necesario proponer una adaptación de la normativa con el objeto de conservar la durabilidad y vida útil de las construcciones realizadas con hormigón armado.

Finalmente, el cambio climático en la mayoría de sus matices afecta de manera positiva o neutra a la durabilidad y vida útil del hormigón, desde el punto de vista de sus agentes de ataque externos. Esto, debido a que a pesar de que las concentraciones de dióxido de carbono, sulfatos y cloruros se ven aumentadas a nivel global, los agentes de ataque externos dependen de mayor manera, en su mayoría, de los niveles de factores climáticos como la humedad relativa (a niveles altos) y la temperatura (a niveles bajo $0^\circ C$), los cuales se ven disminuida y aumentada respectivamente.

Además, las zonificaciones realizadas hacen hincapié en la necesidad de replantear y separar los agentes de ataque externos sulfatos de cloruros y carbonatación, de manera de medir cada uno de ellos de forma autónoma debido a los requerimientos que cada uno tiene para perjudicar al hormigón, como se mencionó en este documento.

Queda propuesto como línea futura de investigación, las proyecciones de sulfatos y cloruros con el fin de medir si los niveles de éstos agentes logran ser significantes para perjudicar al hormigón en mayor parte que las condiciones climáticas que los acompañan. Además, la separación por regiones y sus promedios permite que algunos valores se oculten y no demuestren la variabilidad de una región por sí misma, por lo tanto, queda abierta alguna nueva manera de dividir Chile con el fin de localizar en una misma región los distintos cambios que el cambio climático posee, así como se vió reflejado en la zona altiplánica de Chile.

Bibliografía

- [1] Afanador, N., Guerrero, G. & Monroy, R. (2012). *Propiedades físicas y mecánicas de ladrillos macizos cerámicos para mampostería*. Ciencia e Ingeniería Neogranadina, 22(1), 43-58. Recuperado de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=91125275003>
- [2] Aguirre, A. M. & Mejía de Gutiérrez, R. (2013). *Durabilidad del hormigón armado expuesto a condiciones agresivas*. Materiales de Construcción, 63(309), 7-38. <https://doi.org/10.3989/mc.2013.00313>
- [3] Al-Assadi, G., Casati, M. J., Fernández, J. & Gálvez, J. (2009). *Evaluación del deterioro del hormigón sometido a ciclos hielo-deshielo*. Anales de Mecánica de la Fractura 2(26), 472-477. Recuperado de https://oa.upm.es/5096/1/INVE_MEM2009_65689.pdf
- [4] Aldana, J. & Serpell, A. (2012). *Temas y tendencias sobre residuos de construcción y demolición: un metaanálisis*. Revista de la construcción, 12(22), 4-16. Recuperado de <https://www.scielo.cl/pdf/rconst/v11n2/art02.pdf>
- [5] Beushausen, H. (2019). *Durabilidad de productos de hormigón con superficie mejorada en los países de la CCEAG*. Planta de Hormigón Internacional, 1, 62-65. Recuperado de <https://www.cpi-worldwide.com/es/flips/2019/1>
- [6] Chile. Ministerio de Agricultura, Corporación Nacional Forestal (CONAF). (2009). *Los Grandes Incendios Forestales en Chile 1985-2009*. Recuperado de https://www.conaf.cl/wp-content/files_mf/1397681623GrandesIncendios2009.pdf
- [7] Chile. Ministerio del Medio Ambiente. (2020). *4to Informe Bienal de actualización de Chile sobre cambio climático*. Recuperado de https://cambioclimatico.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2021/01/Chile_4th_BUR_2020.pdf
- [8] Chile. Ministerio del Medio Ambiente, Sistema Nacional de Inventarios de Gases de Efecto Invernadero de Chile (SNICHILE). (2020). *Bases de Datos Inventarios Regionales de GEI serie 1990-2018*. Recuperado de: <https://snichile.mma.gob.cl/documentos/>
- [9] Cuitiño Rosales, M. G, Rotondaro, R. & Esteves, A. (2020). *Análisis comparativo de aspectos térmicos y resistencias mecánicas de los materiales y los elementos de la construcción con tierra*. Revista de Arquitectura, 22(1), 138- 151. <http://dx.doi.org/10.14718/RevArq.2020.2348>
- [10] Ebensperger, L. & Torrent R. (2010). *Medición “in situ” de la permeabilidad al aire del hormigón: status quo*. Revista Ingeniería de Construcción, 25(3), 371-382. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732010000300003>
- [11] Estados Unidos. American Institute of Steel Construction (2017). *The Impact of Material Selection on the Resilience of Buildings*. Recuperado de <https://www.aisc.org/globalassets/aisc/publications/white-papers/the-impact-of-material-selection-on-the-resilience-of-buildings.pdf>

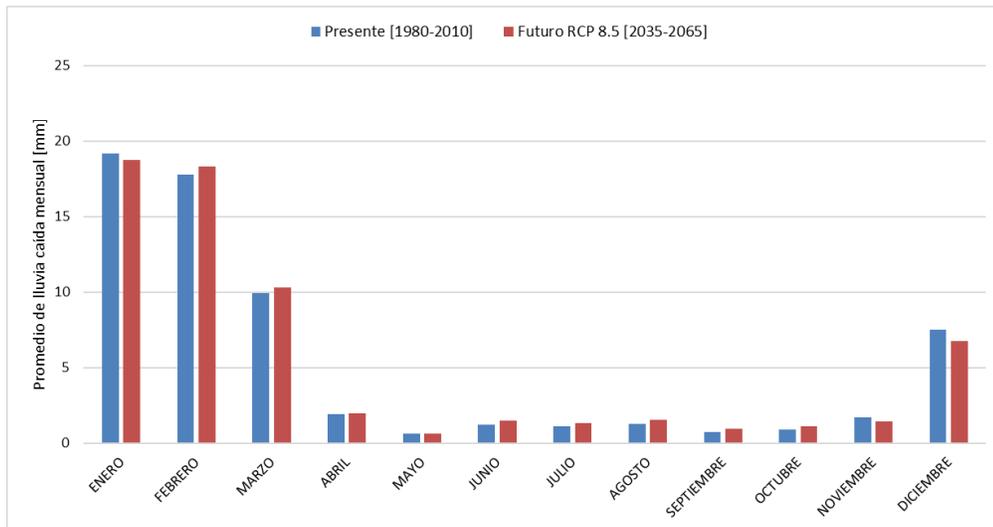
- [12] González, W. (2016). *Ensayos para determinar y comparar las propiedades físico-mecánicas de la Guadua Angustifolia de Pacho Cundinamarca frente a la de Silvania Cundinamarca* (Trabajo de grado, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia). Recuperado de <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/15314/WilliamGonzalezAvila2016.pdf?sequence=1>
- [13] Ichaso, A. (2014). *La permeabilidad al agua como parámetro para evaluar la durabilidad del hormigón - Parte II (Informe de práctica supervisada)*. Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina. Recuperado de <https://rdu.unc.edu.ar/bitstream/handle/11086/1575/PS%20Ichaso%2C%20Agustina.pdf?sequence=1>
- [14] Instituto Nacional de Normalización (2016). *Hormigón - Requisitos generales* (INN Norma Chilena N°170). Santiago, Chile: Autor.
- [15] Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile, Comisión De Construcción en Hormigón. (2020). *Guía de Apoyo al ingeniero diseñador*. Recuperado de <https://ich.cl/documentos-ich/guia-de-apoyo-al-ingeniero-disenador/>
- [16] IPCC (2013). *Cambio Climático 2013: Bases Físicas. Resumen para responsables de políticas, Resumen técnico y Preguntas frecuentes*. Recuperado de <https://www.ipcc.ch/languages-2/spanish/ipcc-en-espanol-publications/>
- [17] IPCC (2014). *Cambio climático 2014: Informe de síntesis*. Recuperado de https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_es.pdf
- [18] Melón (2016, 1 de diciembre). *Terminología del Cemento y el Hormigón*. Recuperado de <https://www.melon.cl/wp-content/uploads/2016/12/1.terminologiadelcementoylelhormigon.pdf>
- [19] Mendoza-Rangel, J. & Castro-Borges, P. (2009). *Validez de los conceptos y modelos vigentes de vida de servicio de estructuras de hormigón ante los efectos del cambio climático global. Situación actual*. *Materiales de Construcción*, 59(296), 117-124. <https://doi.org/10.3989/mc.2009.46608>
- [20] México. Instituto Mexicano del Transporte, Secretaría de Comunicaciones y Transporte (2001). *El fenómeno de la corrosión en estructuras de concreto reforzado*. Recuperado de <https://www.imt.mx/archivos/publicaciones/publicaciontecnicapt182.pdf>
- [21] Nagi, M. (2018). *Diseño de la durabilidad de las estructuras de hormigón*. *Planta de Hormigón Internacional*, 1, 40-45. Recuperado de <https://www.cpi-worldwide.com/es/flips/2018/1>
- [22] Neville, A. Brooks, J. (2010). *Concrete Technology*. (2a ed.) Londres, Reino Unido: Pearson Education Limited.
- [23] Peyresblanques, I. (2019). *Propuesta de zonificación nacional de los grados de exposición de ciclos de hielo-deshielo expuestos en la NCh 170-2016*, Universidad Nacional Andrés Bello, Facultad de Ingeniería.
- [24] Sohawon, H. & Beushausen, M. H. (2019). *El efecto del tratamiento hidrófobo en las propiedades de la durabilidad del hormigón*. *Planta de Hormigón Internacional*, 1, 52-56. Recuperado de <https://www.cpi-worldwide.com/es/flips/2019/1>
- [25] Surana, S. & Mugmobi, T. (2020). *La influencia de los agentes de curado en el comportamiento de la retracción y la permeabilidad del hormigón*. *Planta de Hormigón Internacional*, 3, 16-21. Recuperado de <https://www.cpi-worldwide.com/es/flips/2020/3>

- [26] Toirac, J. (2009). *La resistencia a compresión del hormigón, condición necesaria pero no suficiente para el logro de la durabilidad de las obras*. Ciencia y Sociedad, 34(4), 463-504. Recuperado de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=87014516001>
- [27] Vera, R., Delgado, D., Araya, R., Puentes, M., Guerrero, I., Rojas, P., Cabrera, G., Erazo, S. & Carvajal, A.M. (2012). *Construcción de mapas de corrosión atmosférica de Chile. Resultados preliminares*. Rev. LatinAm. Metal. Mat. 32(2), 1-8. Recuperado de <http://www.mapadecorrosionatmosfericadechile.cl/uploads/publicaciones/238-1048-2-PB-1.pdf>
- [28] Vera, R., Puentes, M., Araya, R., Rojas, P. & Carvajal, A. (2012). *Mapa de corrosión atmosférica de Chile: Resultados después de un año de exposición*. Revista de la construcción 11(2), 61-71. Recuperado de https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttextpid=S0718-915X2012000200007
- [29] Vilches Hernández, E. M. (2020). *Cuantificación del sobrecosto del hormigón bajo nuevos criterios de durabilidad por implementación de NCH170-2016 (No 1)*. Universidad Nacional Andrés Bello, Facultad de Ingeniería.

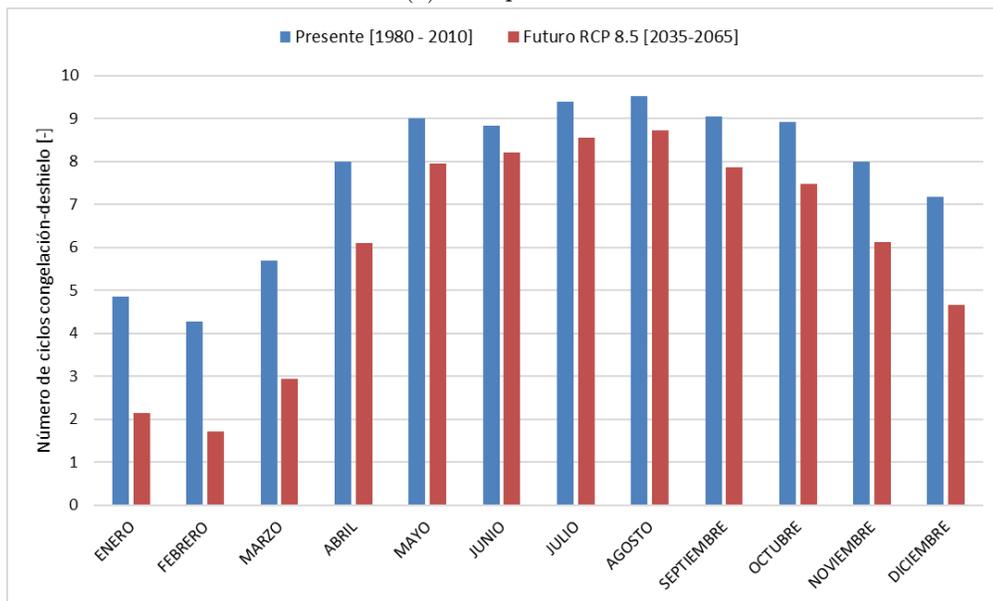
Anexo A

Congelación y Deshielo

A.1. Tarapacá



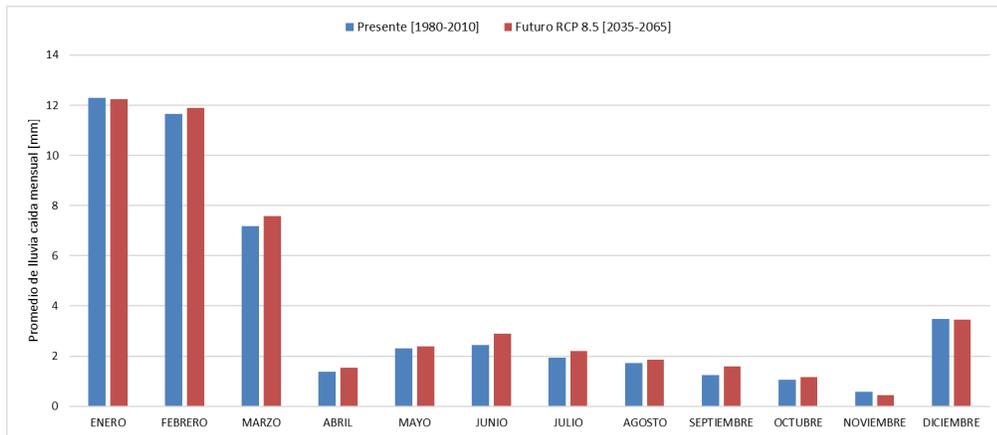
(a) Precipitación



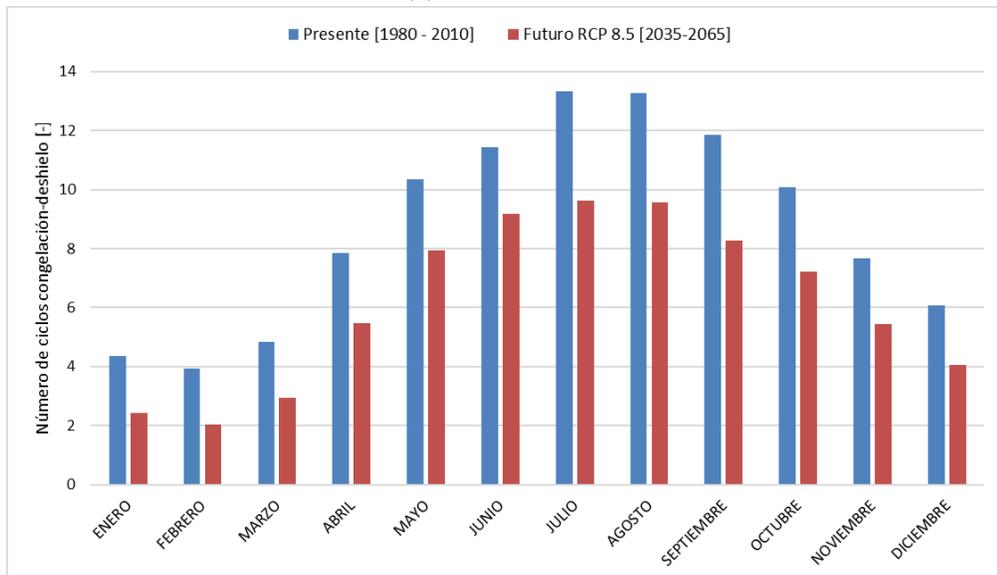
(b) Ciclos Congelación-Deshielo

Figura A.1: Promedios de (a) precipitaciones y (b) cantidad de ciclos mensuales de las provincias de la región de Tarapacá en el presente [1980-2010] y el futuro RCP 8.5 [2035-2065]

A.2. Antofagasta



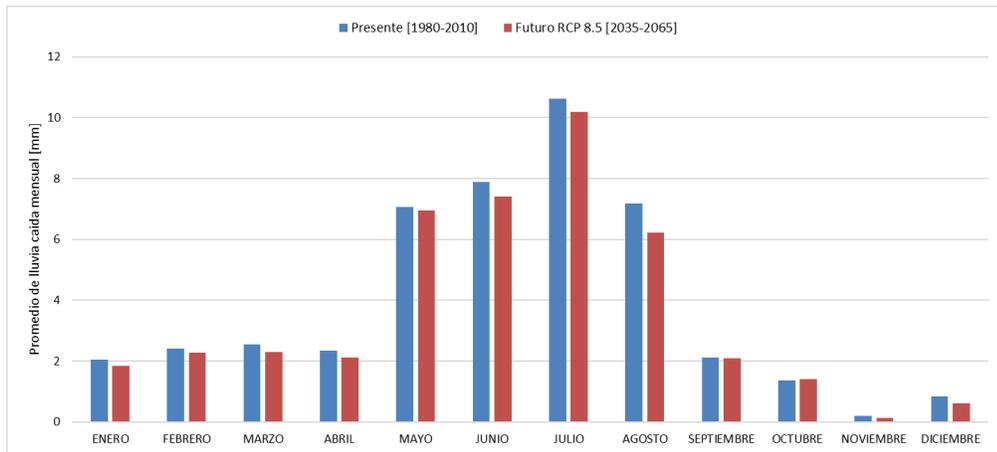
(a) Precipitación



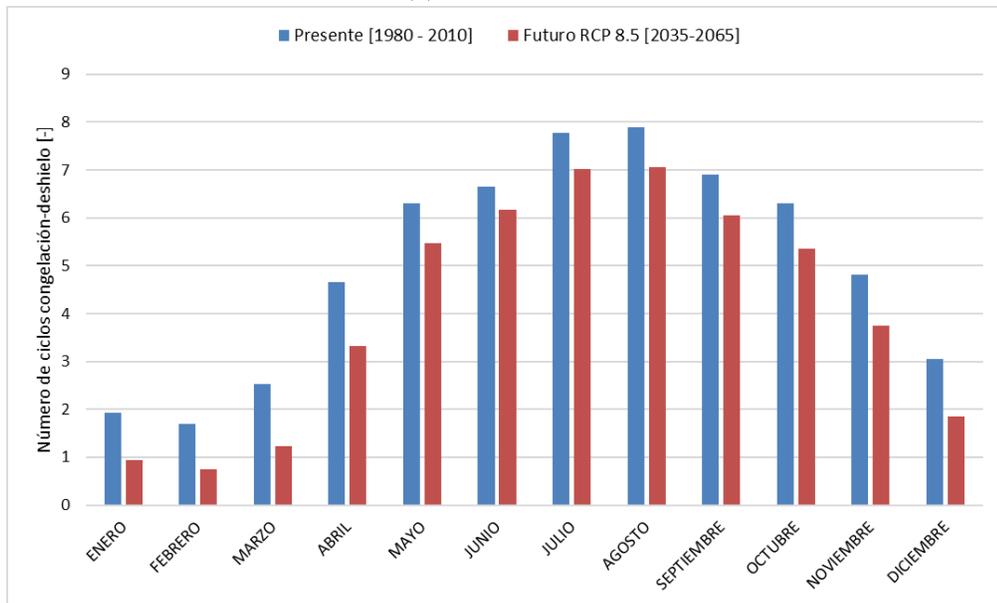
(b) Ciclos Congelación-Deshielo

Figura A.2: Promedios de (a) precipitaciones y (b) cantidad de ciclos mensuales de las provincias de la región de Antofagasta en el presente [1980-2010] y el futuro RCP 8.5 [2035-2065]

A.3. Atacama



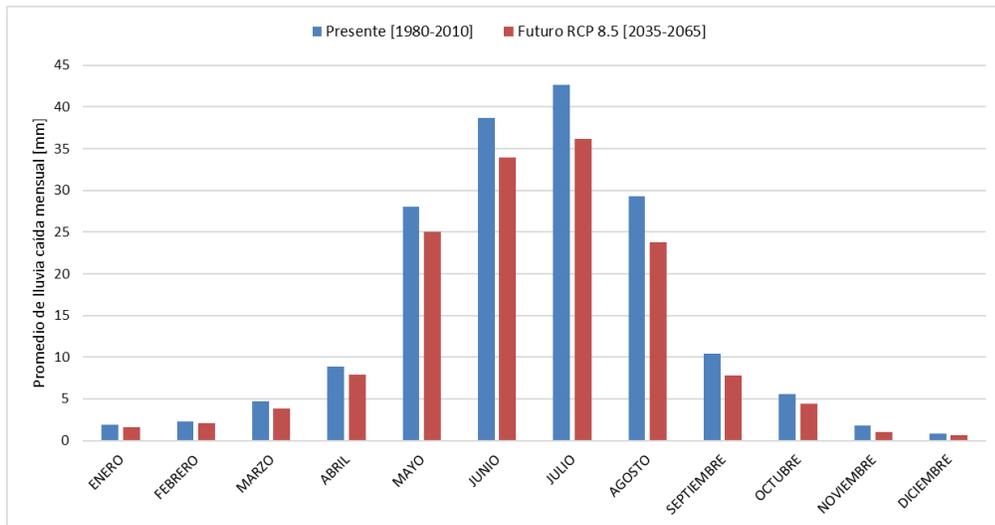
(a) Precipitación



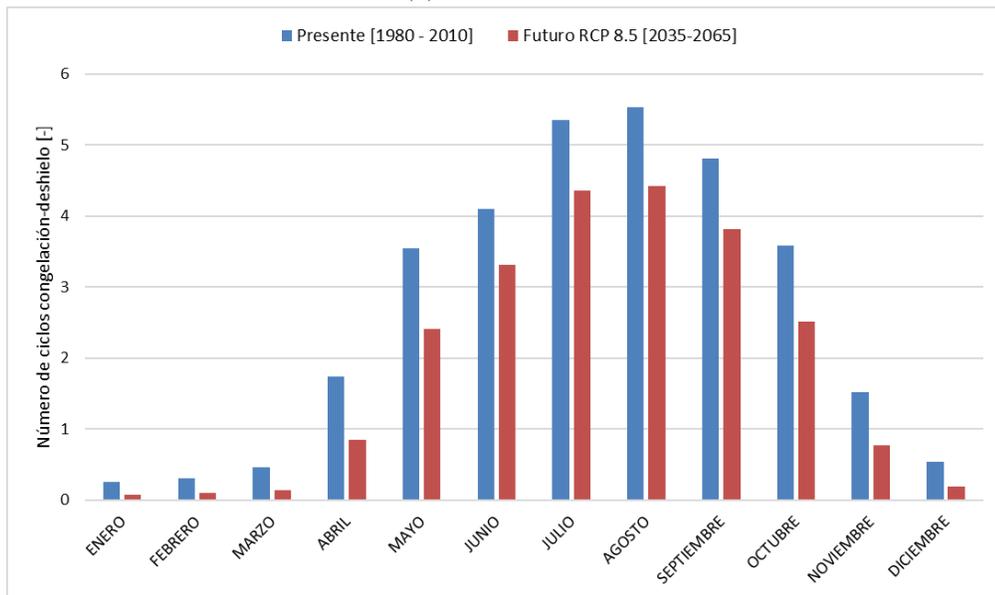
(b) Ciclos Congelación-Deshielo

Figura A.3: Promedios de (a) precipitaciones y (b) cantidad de ciclos mensuales de las provincias de la región de Atacama en el presente [1980-2010] y el futuro RCP 8.5 [2035-2065]

A.4. Coquimbo



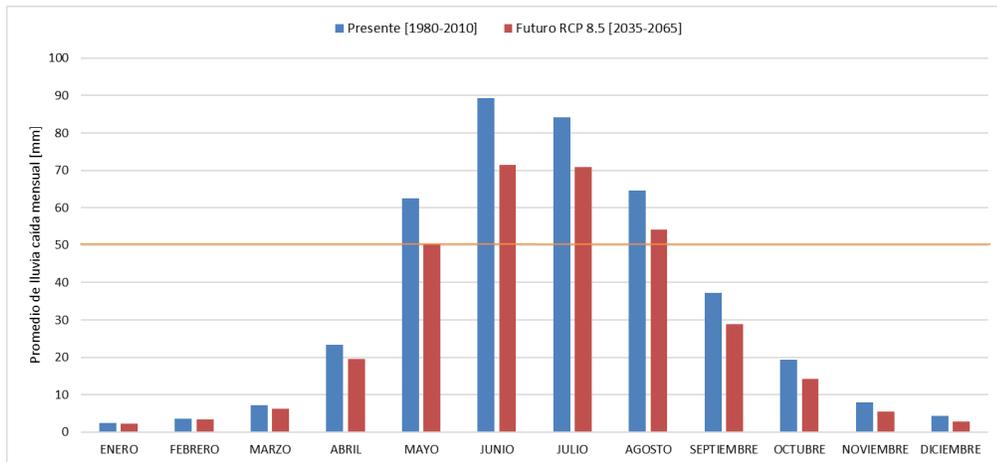
(a) Precipitación



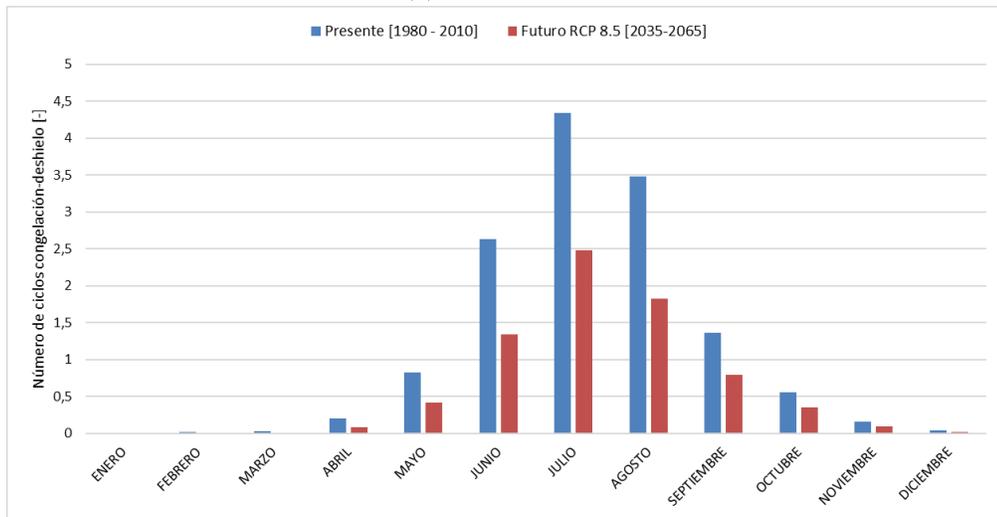
(b) Ciclos Congelación-Deshielo

Figura A.4: Promedios de (a) precipitaciones y (b) cantidad de ciclos mensuales de las provincias de la región de Coquimbo en el presente [1980-2010] y el futuro RCP 8.5 [2035-2065]

A.5. Región Metropolitana



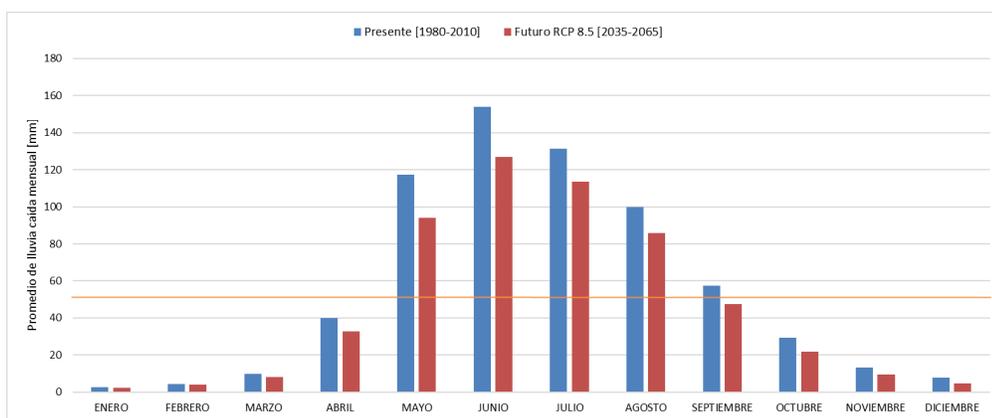
(a) Precipitación



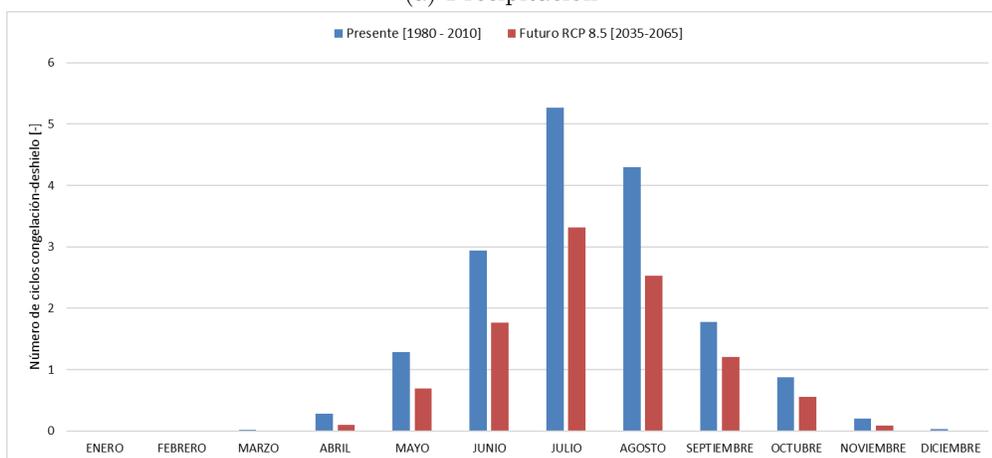
(b) Ciclos Congelación-Deshielo

Figura A.5: Promedios de (a) precipitaciones y (b) cantidad de ciclos mensuales de las provincias de la región Metropolitana en el presente [1980-2010] y el futuro RCP 8.5 [2035-2065]

A.6. O'higgins



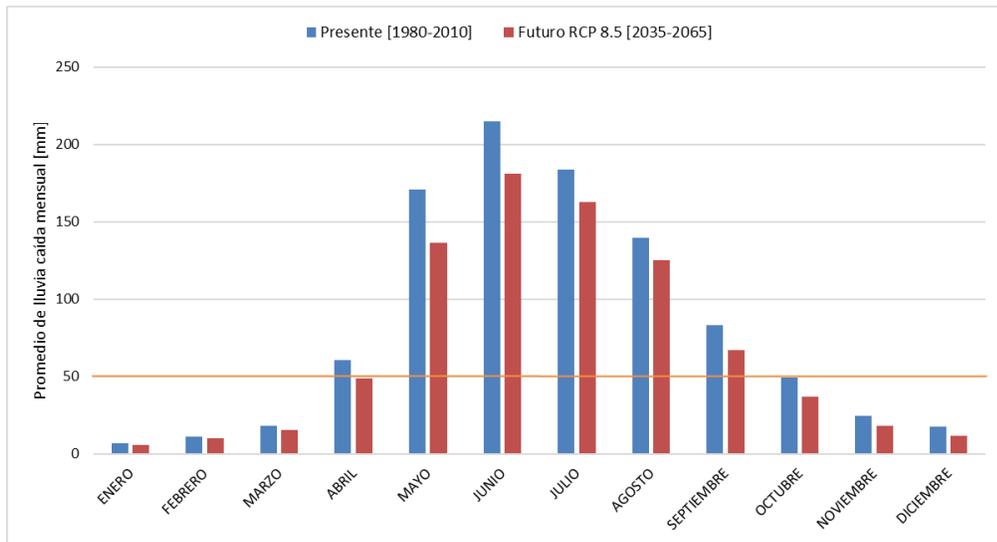
(a) Precipitación



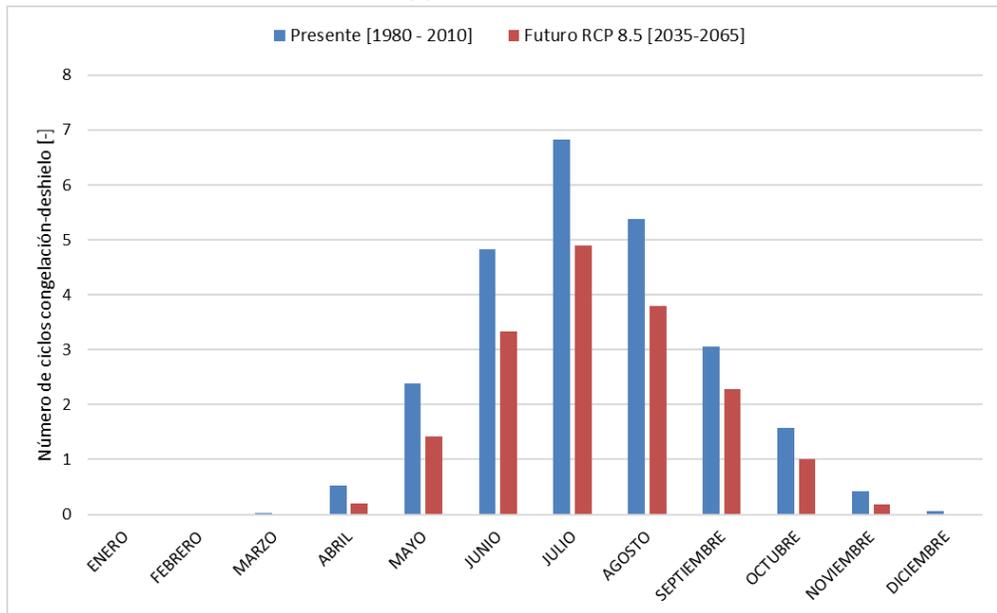
(b) Ciclos Congelación-Deshielo

Figura A.6: Promedios de (a) precipitaciones y (b) cantidad de ciclos mensuales de las provincias de la región de O'higgins en el presente [1980-2010] y el futuro RCP 8.5 [2035-2065]

A.7. Maule



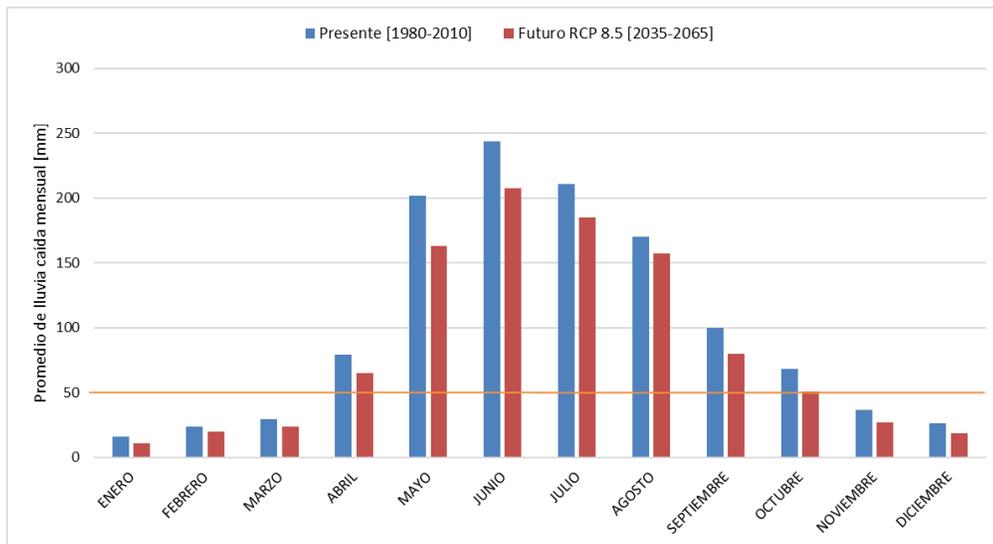
(a) Precipitación



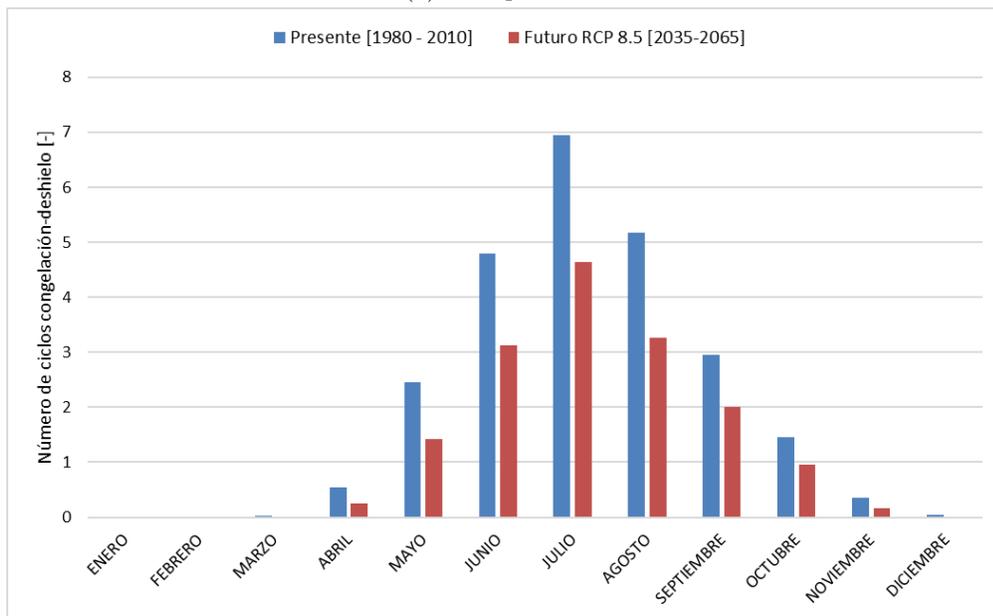
(b) Ciclos Congelación-Deshielo

Figura A.7: Promedios de (a) precipitaciones y (b) cantidad de ciclos mensuales de las provincias de la región del Maule en el presente [1980-2010] y el futuro RCP 8.5 [2035-2065]

A.8. Ñuble



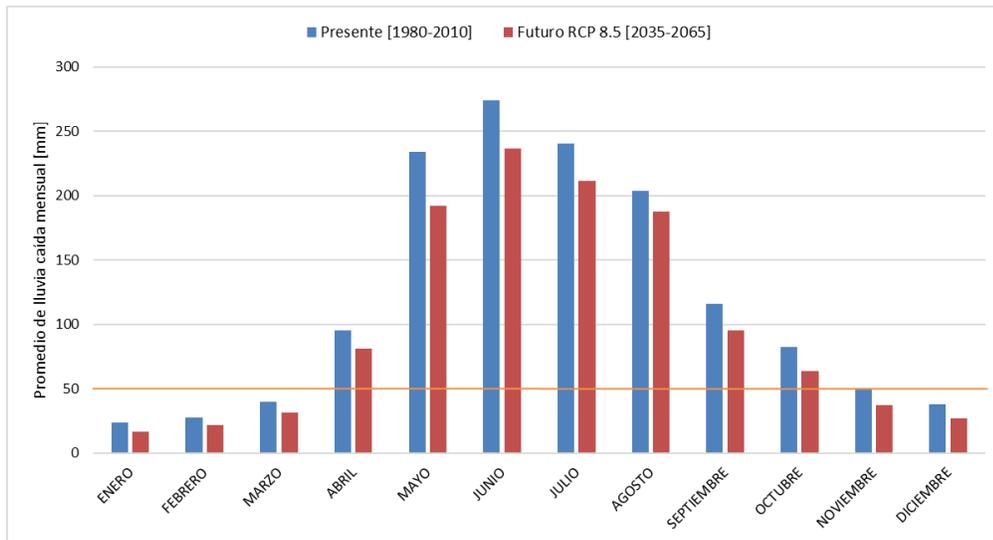
(a) Precipitación



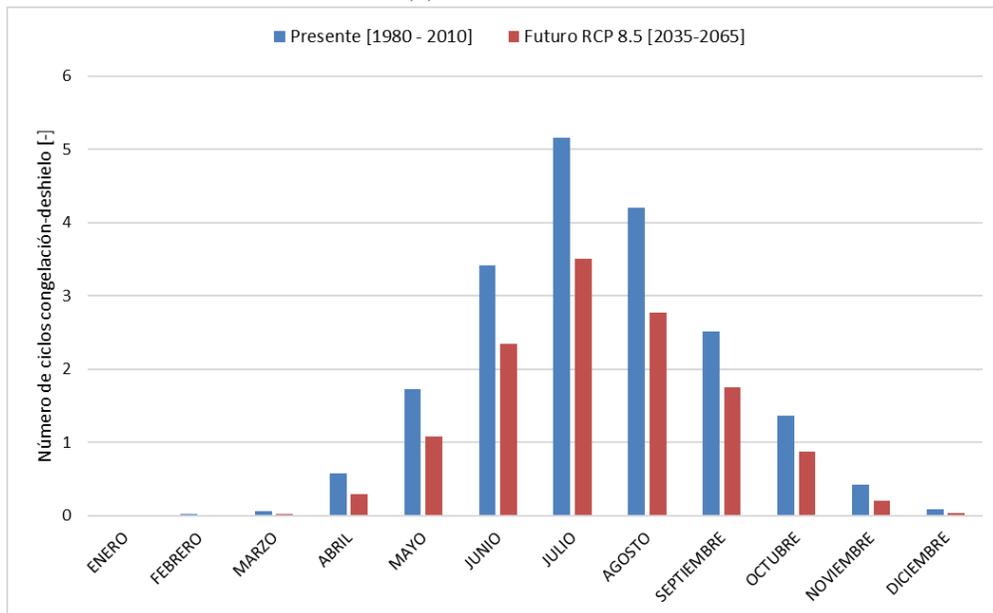
(b) Ciclos Congelación-Deshielo

Figura A.8: Promedios de (a) precipitaciones y (b) cantidad de ciclos mensuales de las provincias de la región de Ñuble en el presente [1980-2010] y el futuro RCP 8.5 [2035-2065]

A.9. Bío Bío



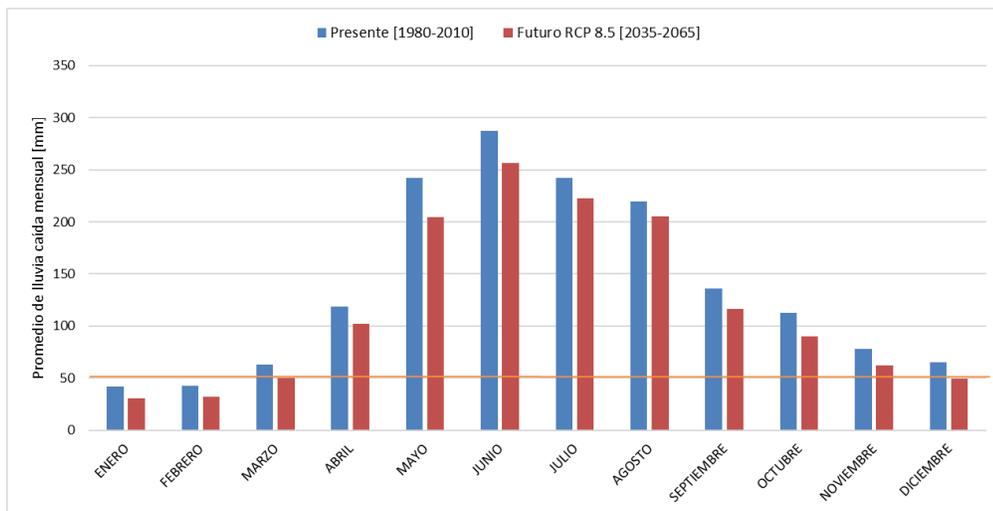
(a) Precipitación



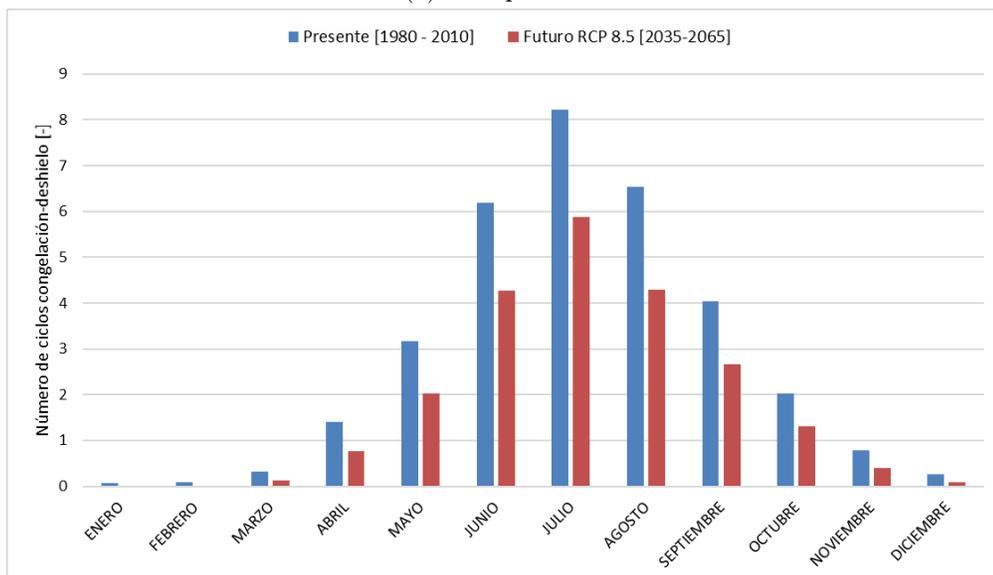
(b) Ciclos Congelación-Deshielo

Figura A.9: Promedios de (a) precipitaciones y (b) cantidad de ciclos mensuales de las provincias de la región del Bío Bío en el presente [1980-2010] y el futuro RCP 8.5 [2035-2065]

A.10. Araucanía



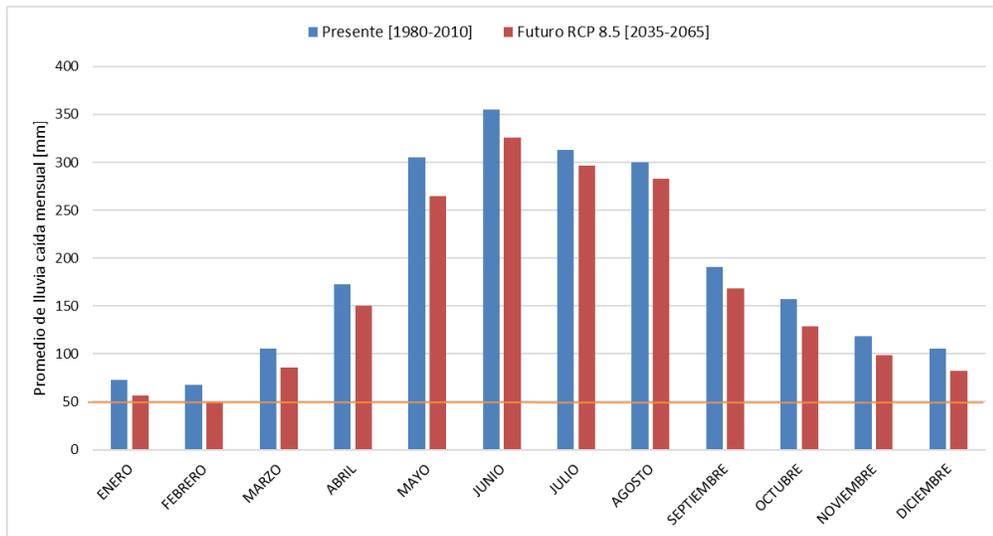
(a) Precipitación



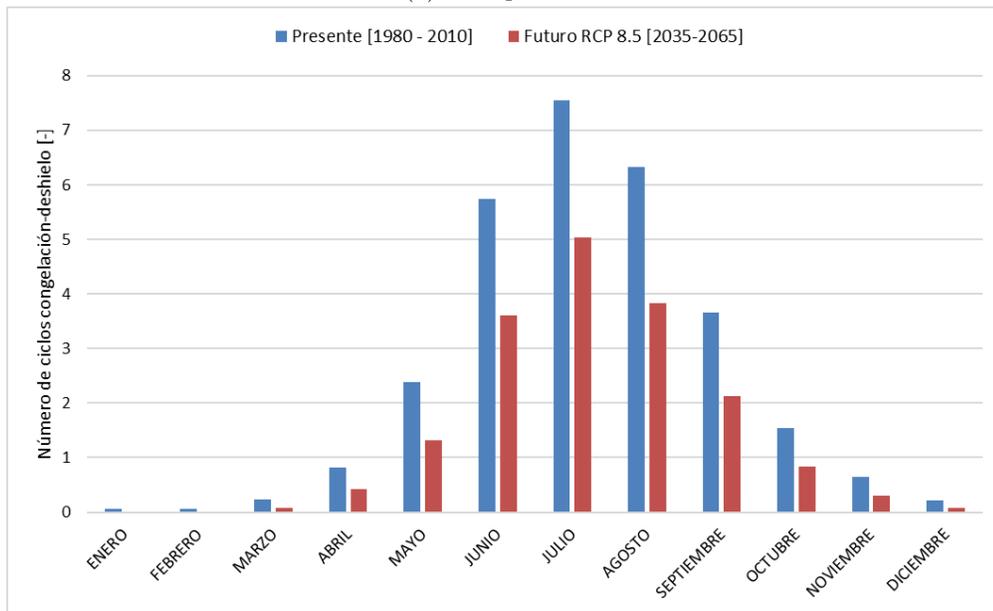
(b) Ciclos Congelación-Deshielo

Figura A.10: Promedios de (a) precipitaciones y (b) cantidad de ciclos mensuales de las provincias de la región de la Araucanía en el presente [1980-2010] y el futuro RCP 8.5 [2035-2065]

A.11. De los ríos



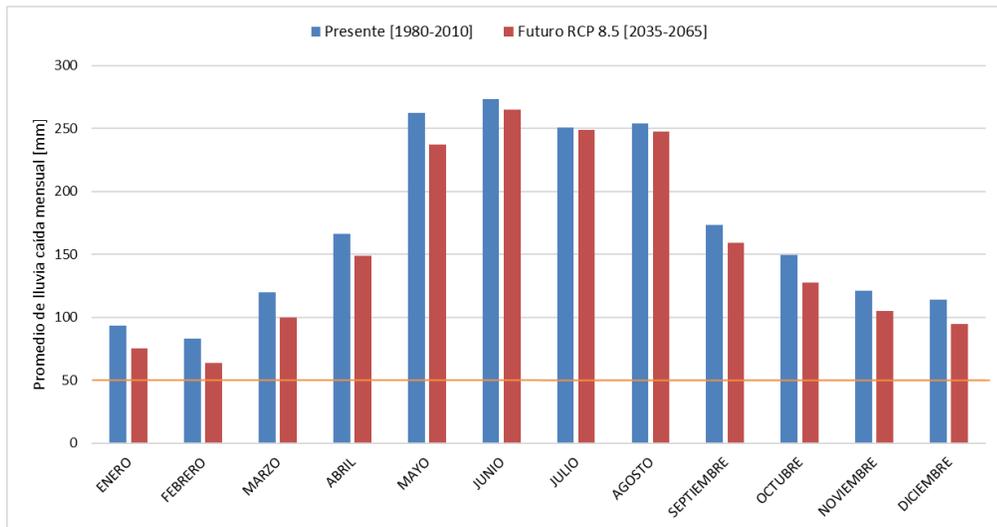
(a) Precipitación



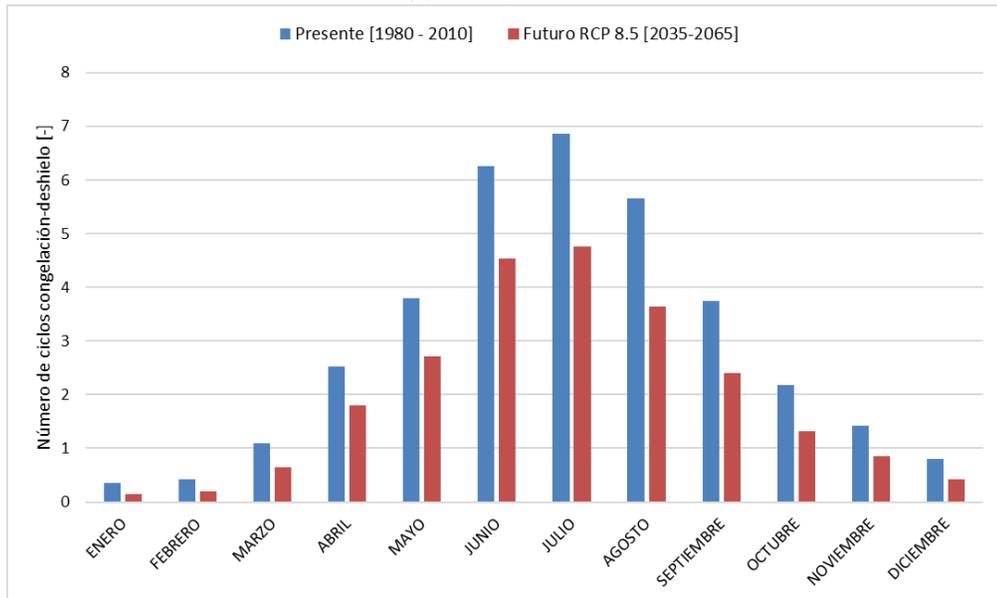
(b) Ciclos Congelación-Deshielo

Figura A.11: Promedios de (a) precipitaciones y (b) cantidad de ciclos mensuales de las provincias de la región De los ríos en el presente [1980-2010] y el futuro RCP 8.5 [2035-2065]

A.12. De los lagos



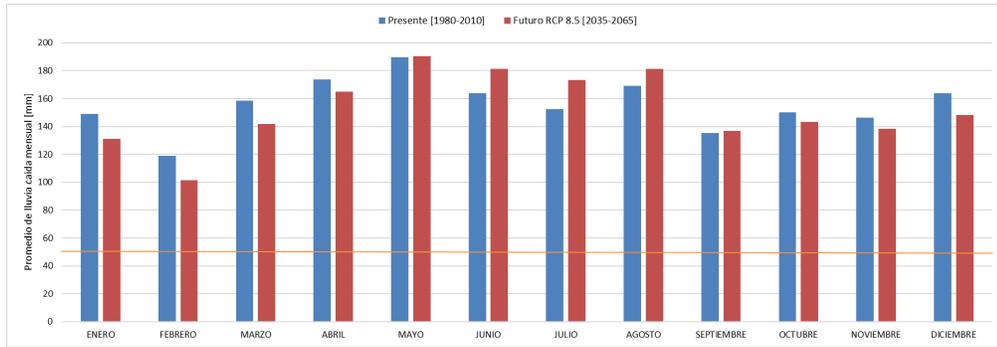
(a) Precipitación



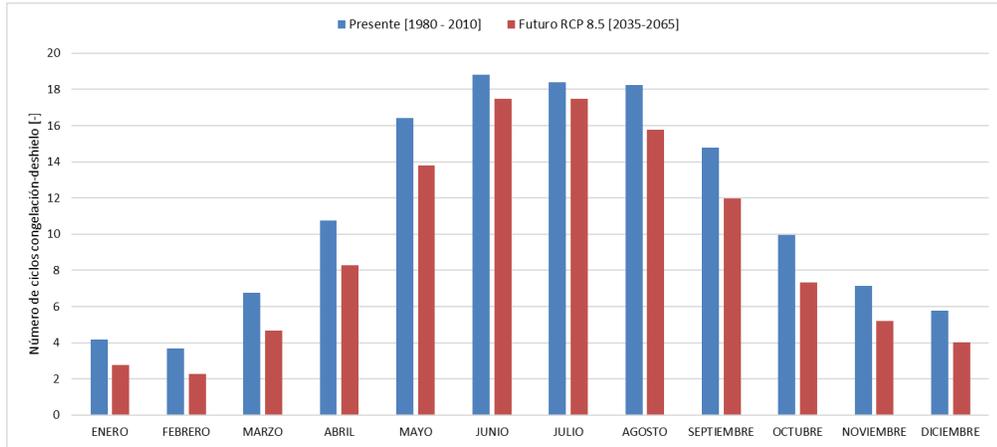
(b) Ciclos Congelación-Deshielo

Figura A.12: Promedios de (a) precipitaciones y (b) cantidad de ciclos mensuales de las provincias de la región De los lagos en el presente [1980-2010] y el futuro RCP 8.5 [2035-2065]

A.13. Aysén



(a) Precipitación



(b) Ciclos Congelación-Deshielo

Figura A.13: Promedios de (a) precipitaciones y (b) cantidad de ciclos mensuales de las provincias de la región de Aysén en el presente [1980-2010] y el futuro RCP 8.5 [2035-2065]

Tabla A.1: Promedio de la variación porcentual mensual de lluvias acumuladas en cada región de Chile, entre el periodo actual [1980-2010] y la proyección futura RCP 8.5 [2035-2065].

Región	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
Arica-Parinacota	-5.34	-1.97	-2.97	6.26	-0.88	22.29	21.38	23.29	35.74	37.94	-1.25	-10.04
Tarapacá	15.86	73.31	2.63	4.45	-7.48	24.37	21.94	11.43	33.23	37.27	0.03	-11.10
Antofagasta	5.92	8.13	14.84	25.36	-0.17	21.53	16.49	9.50	30.70	12.80	-19.37	-2.01
Atacama	-18.78	-17.58	-12.08	-10.98	-2.02	-2.58	-1.04	-10.85	-2.27	4.74	-56.84	-54.31
Coquimbo	-31.88	-9.24	-18.16	-12.24	-8.16	-10.60	-13.55	-17.71	-24.12	-20.09	-42.98	-39.43
Valparaíso	-17.71	-9.35	-18.51	-15.84	-21.68	-18.34	-16.56	-16.52	-24.41	-30.96	-36.96	-39.38
Metropolitana	-11.40	-3.07	-13.07	-16.78	-19.38	-20.01	-15.59	-15.84	-22.63	-27.07	-32.92	-38.52
O'higgins	-13.19	-13.60	-17.33	-19.23	-20.38	-17.84	-13.85	-14.41	-18.33	-26.66	-28.72	-41.65
Maule	-21.81	-13.26	-17.04	-20.11	-20.36	-16.28	-12.12	-11.14	-19.92	-26.03	-26.59	-33.86
Ñuble	-30.41	-19.30	-19.08	-17.84	-19.36	-15.16	-12.90	-7.92	-20.57	-25.79	-26.09	-31.32
Bío Bío	-31.46	-22.88	-21.52	-14.94	-17.94	-13.93	-12.15	-7.89	-18.34	-23.51	-24.93	-29.28
Araucanía	-27.66	-25.33	-21.01	-13.70	-15.43	-10.97	-8.54	-6.87	-14.65	-20.36	-21.12	-25.14
Los Ríos	-22.64	-28.39	-18.26	-13.25	-13.31	-8.21	-5.52	-5.78	-11.87	-18.38	-16.54	-22.02
Los Lagos	-19.13	-23.99	-16.52	-10.41	-9.62	-3.03	-1.06	-2.53	-8.13	-14.90	-13.61	-17.23
Aysén	-13.21	-16.08	-11.26	-5.52	1.61	14.96	19.36	10.45	2.93	-4.22	-6.02	-10.54
Magallanes y Antártica Chilena	-1.01	-0.58	2,67	6,74	13,96	32,40	34,65	22,25	12,64	7,13	5,24	2,67

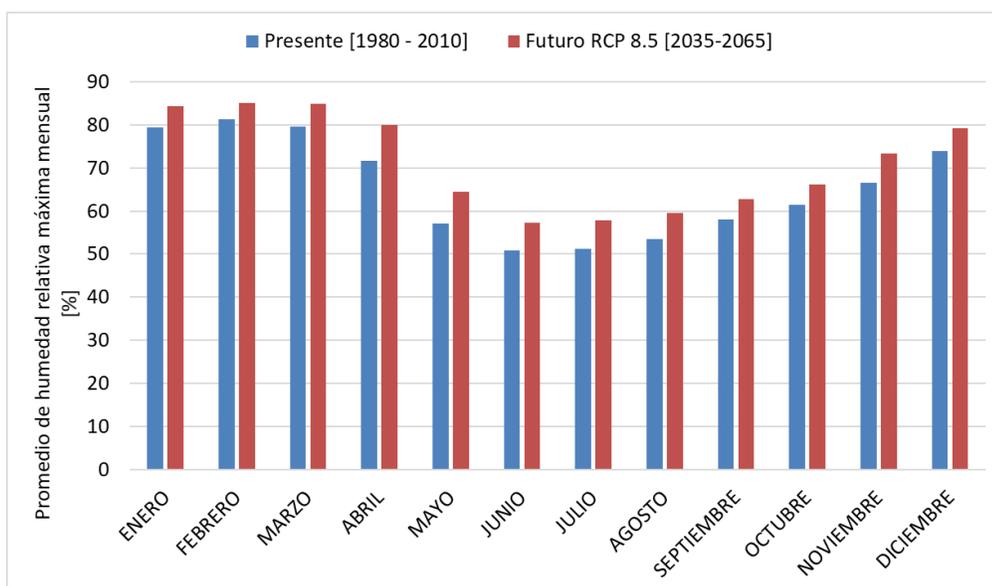
Tabla A.2: Promedio de la variación porcentual mensual de cantidad de ciclos congelación-deshielo en cada región de Chile, entre el periodo actual [1980-2010] y la proyección futura RCP 8.5 [2035-2065].

Región	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
Arica-Parinacota	-64,62	-68,12	-61,07	-38,00	-26,19	-23,03	-22,34	-18,77	-23,62	-29,37	-38,45	-48,63
Tarapacá	-62,68	-66,22	-57,13	-30,73	-21,26	-18,98	-45,52	-44,42	-46,03	-26,01	-32,91	-41,83
Antofagasta	-61,45	-66,04	-61,62	-57,18	-48,73	-42,59	-44,42	-44,34	-47,49	-51,89	-56,76	-52,01
Atacama	-58,99	-63,12	-60,17	-55,47	-46,77	-39,14	-44,53	-45,75	-47,76	-47,57	-50,14	-47,53
Coquimbo	-79,57	-79,45	-80,24	-77,40	-60,43	-50,76	-42,50	-45,27	-48,43	-58,39	-62,46	-71,25
Valparaíso	-95,10	-94,05	-91,79	-77,54	-77,83	-64,05	-54,92	-58,74	-66,00	-80,29	-67,80	-79,91
Metropolitana	-83,19	-79,63	-87,56	-93,04	-81,29	-59,21	-49,78	-59,87	-72,94	-91,49	-78,51	-77,23
O'higgins	-92,60	-86,99	-93,59	-93,14	-75,84	-58,57	-48,12	-58,11	-66,93	-85,23	-65,14	-89,37
Maule	-97,82	-97,84	-88,68	-84,44	-65,81	-53,14	-48,65	-56,43	-65,99	-63,78	-70,69	-85,59
Nuble	-97,81	-95,72	-93,31	-84,21	-69,22	-55,95	-49,75	-60,37	-72,21	-79,41	-80,03	-88,23
Bío Bío	-91,70	-93,94	-88,06	-79,55	-73,06	-60,54	-57,71	-63,57	-71,53	-78,94	-75,54	-82,66
Araucanía	-83,94	-87,89	-79,61	-78,14	-60,00	-43,74	-39,88	-51,60	-61,05	-75,22	-72,36	-73,16
Los Ríos	-80,86	-85,78	-65,80	-77,12	-57,01	-43,33	-38,88	-48,50	-56,05	-72,45	-77,90	-70,82
Los Lagos	-70,75	-70,09	-64,10	-67,64	-60,44	-49,51	-50,03	-57,69	-63,25	-73,50	-71,29	-71,59
Aysén	-41,21	-42,34	-33,24	-24,54	-25,97	-15,71	-13,52	-22,73	-29,00	-29,71	-30,36	-34,43
Magallanes y Antártica Chilena	-63,85	-61,21	-52,85	-44,08	-29,16	-12,69	-8,99	-18,68	-27,55	-38,84	-47,42	-55,71

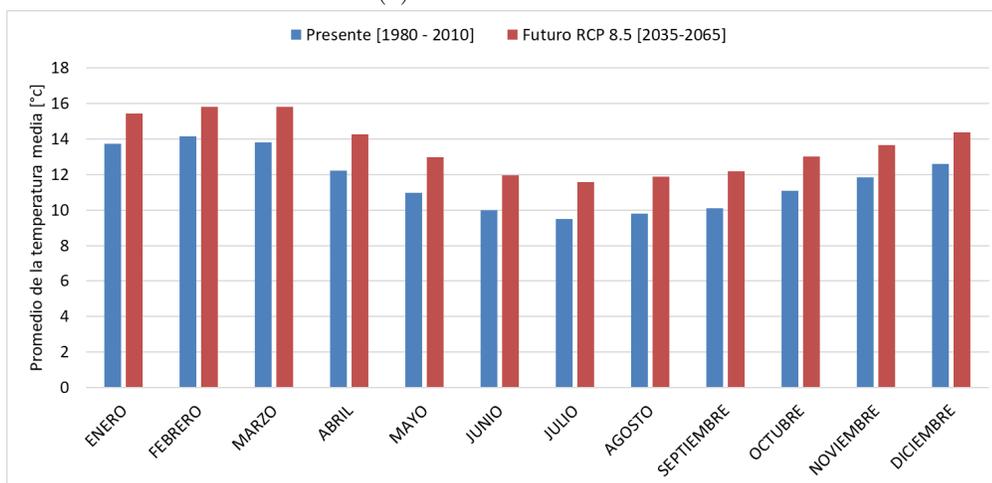
Anexo B

Sulfatación

B.1. Tarapacá



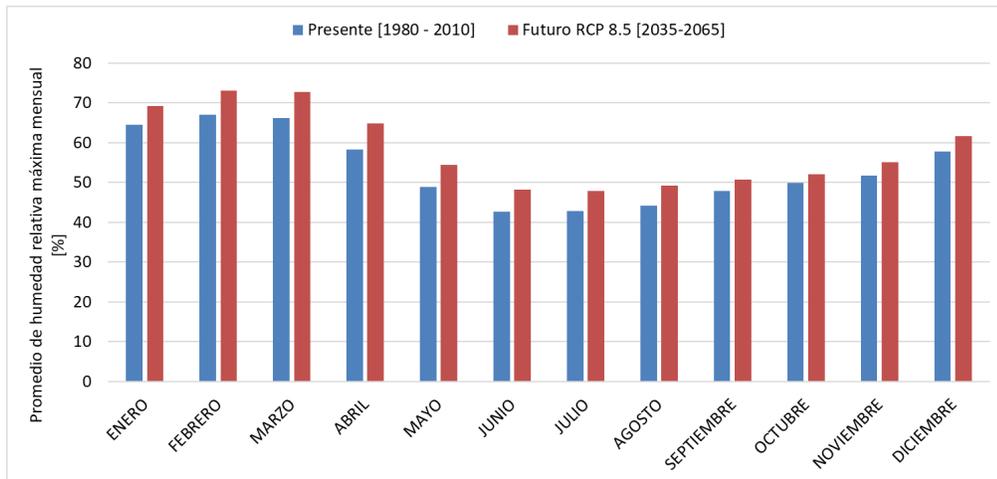
(a) Humedad relativa



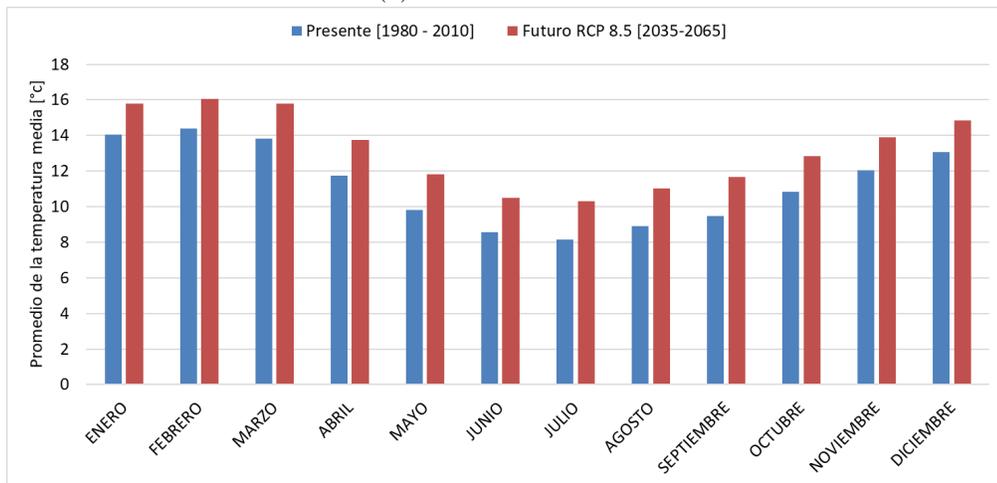
(b) Temperatura media

Figura B.1: Promedios de (a) humedad relativa y (b) temperatura media mensual de las provincias de la región de Tarapacá en el presente [1980-2010] y el futuro RCP 8.5 [2035-2065]

B.2. Antofagasta



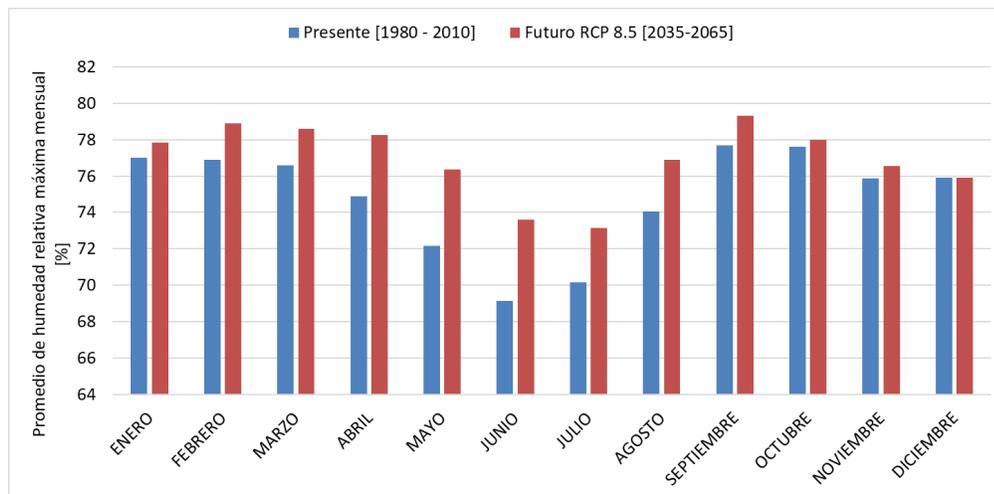
(a) Humedad relativa



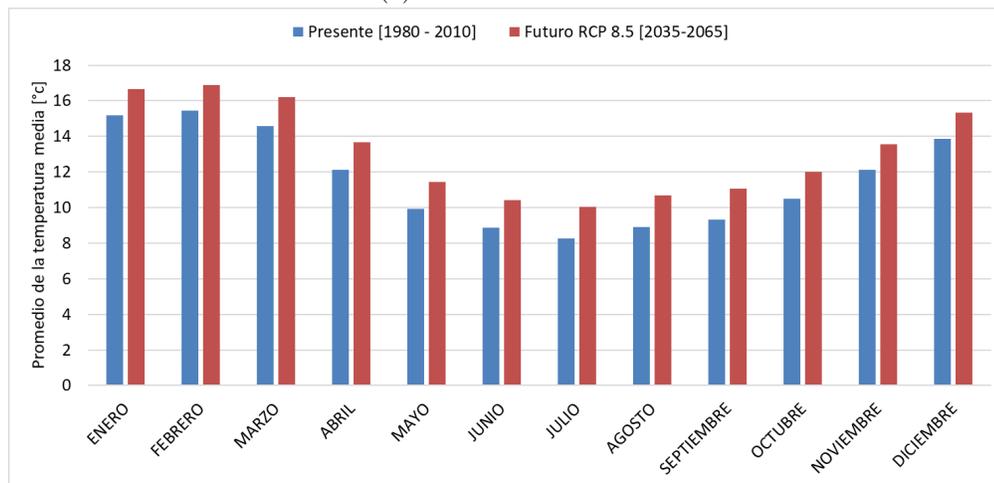
(b) Temperatura media

Figura B.2: Promedios de (a) humedad relativa y (b) temperatura media mensual de las provincias de la región de Antofagasta en el presente [1980-2010] y el futuro RCP 8.5 [2035-2065]

B.3. Atacama



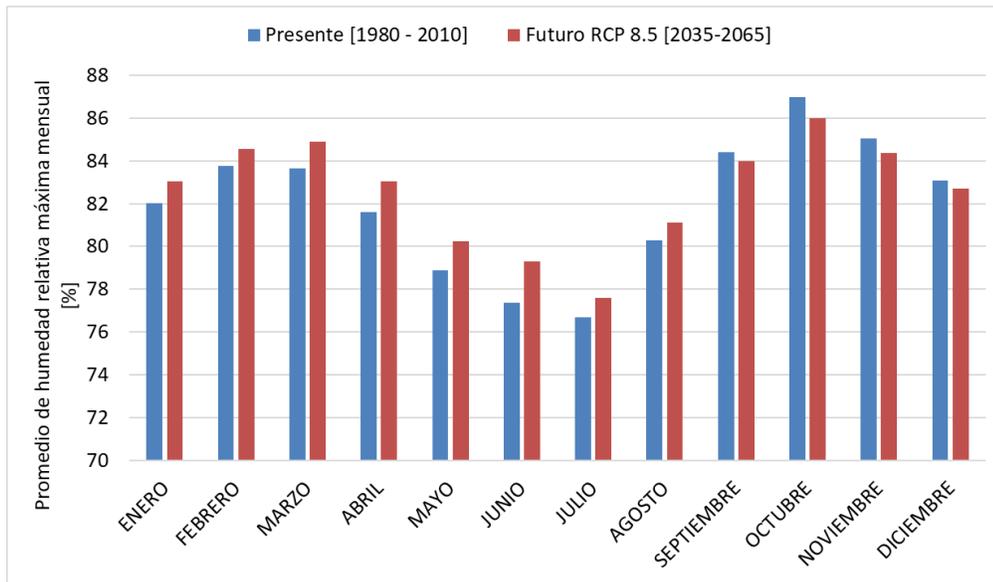
(a) Humedad relativa



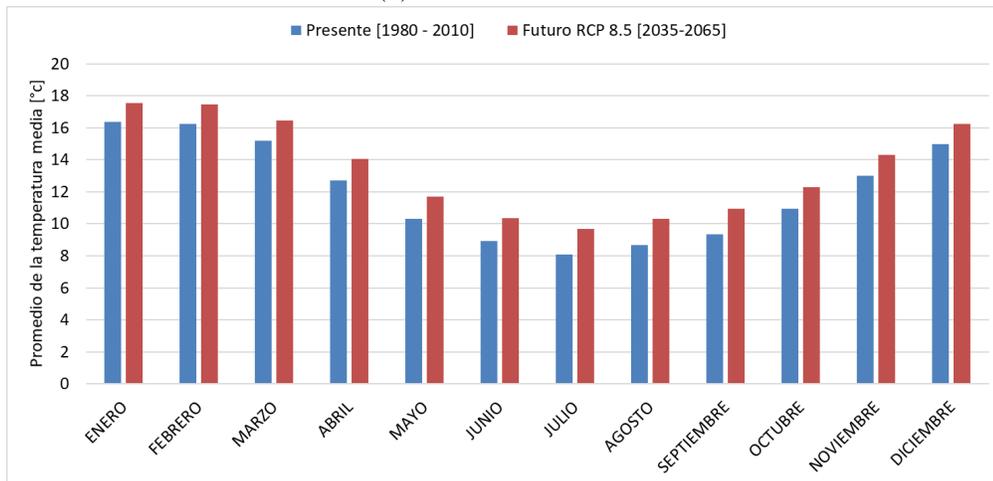
(b) Temperatura media

Figura B.3: Promedios de (a) humedad relativa y (b) temperatura media mensual de las provincias de la región de Atacama en el presente [1980-2010] y el futuro RCP 8.5 [2035-2065]

B.4. Coquimbo



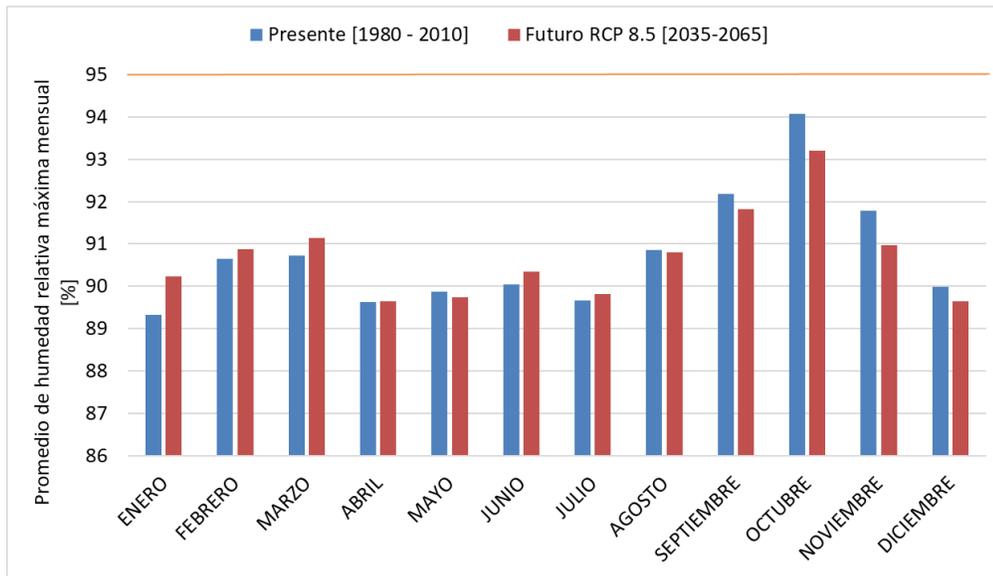
(a) Humedad relativa



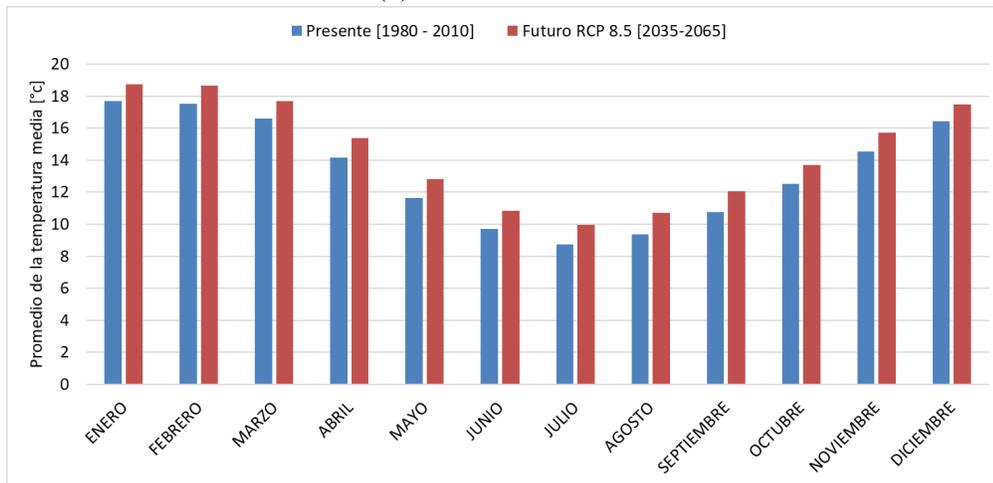
(b) Temperatura media

Figura B.4: Promedios de (a) humedad relativa y (b) temperatura media mensual de las provincias de la región de Coquimbo en el presente [1980-2010] y el futuro RCP 8.5 [2035-2065]

B.5. Valparaíso



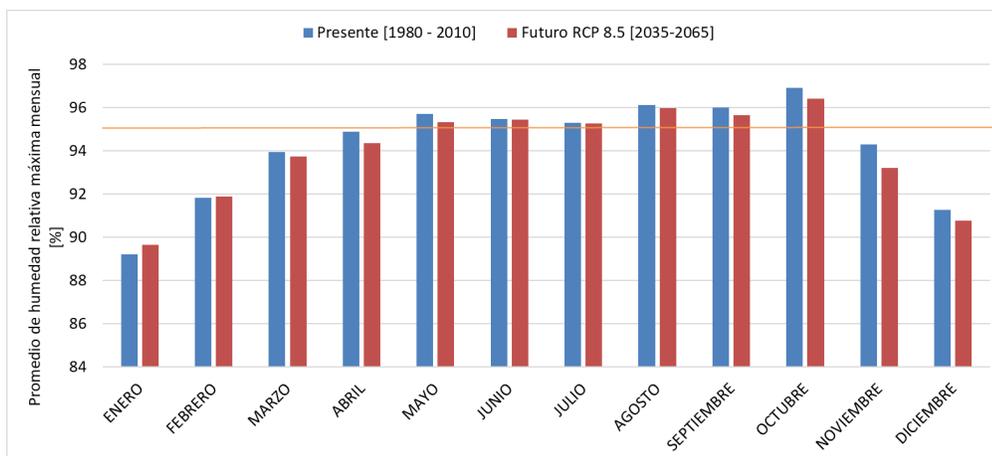
(a) Humedad relativa



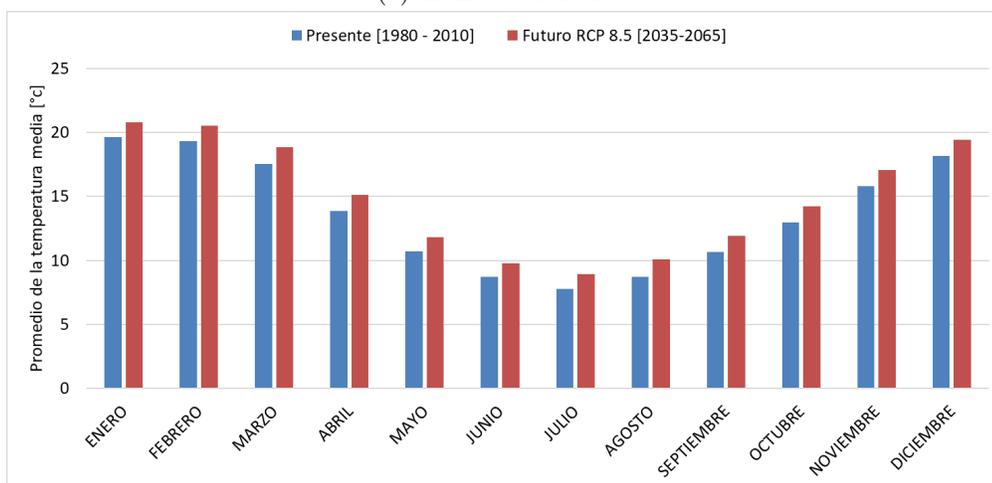
(b) Temperatura media

Figura B.5: Promedios de (a) humedad relativa y (b) temperatura media mensual de las provincias de la región de Valparaíso en el presente [1980-2010] y el futuro RCP 8.5 [2035-2065]

B.6. O'higgins



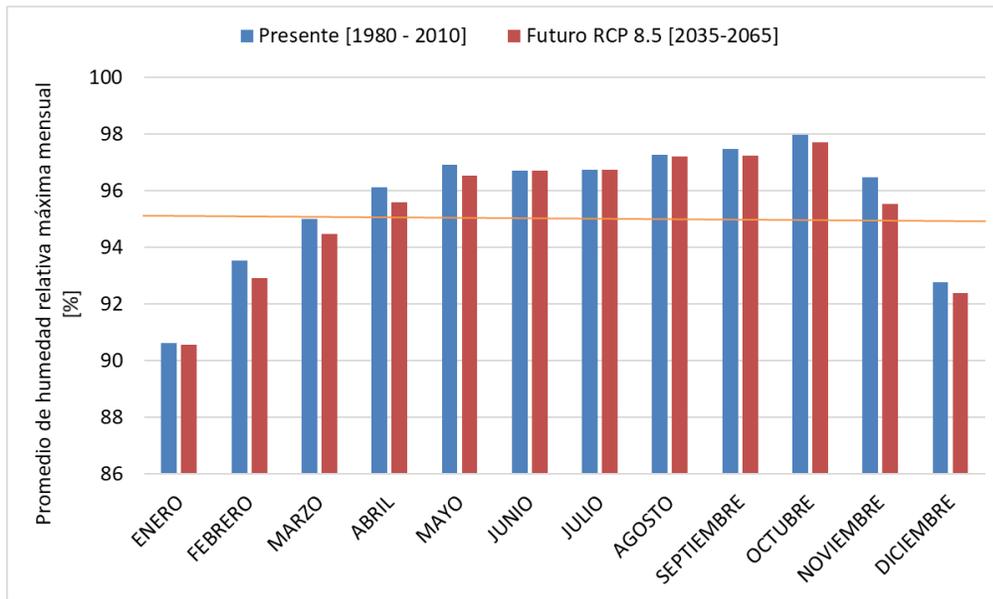
(a) Humedad relativa



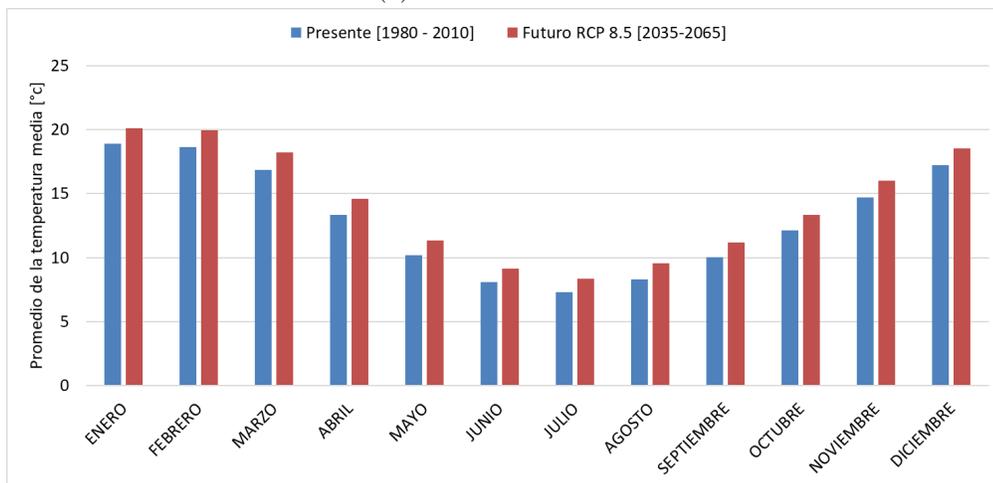
(b) Temperatura media

Figura B.6: Promedios de (a) humedad relativa y (b) temperatura media mensual de las provincias de la región de O'higgins en el presente [1980-2010] y el futuro RCP 8.5 [2035-2065]

B.7. Maule



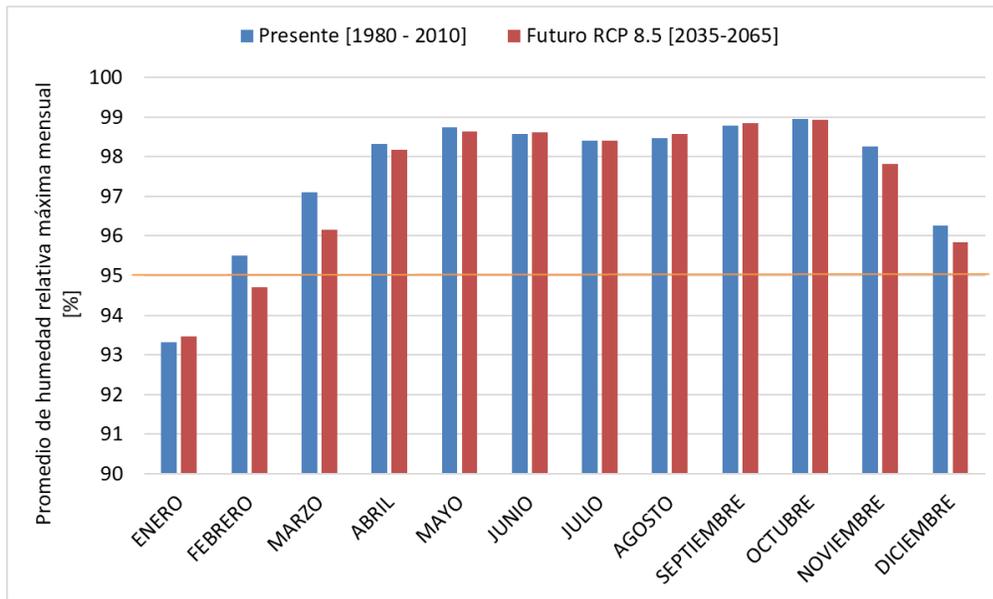
(a) Humedad relativa



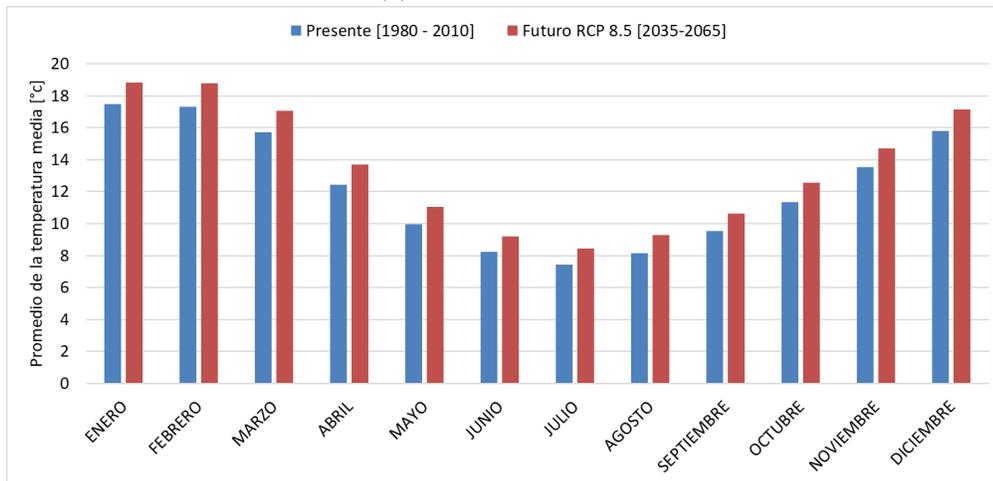
(b) Temperatura media

Figura B.7: Promedios de (a) humedad relativa y (b) temperatura media mensual de las provincias de la región del Maule en el presente [1980-2010] y el futuro RCP 8.5 [2035-2065]

B.8. Bío Bío



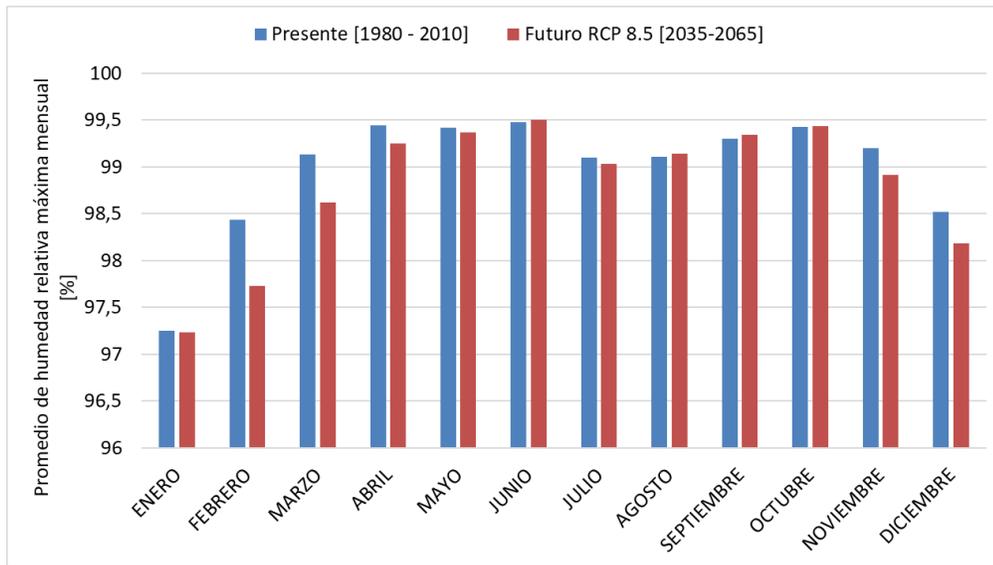
(a) Humedad relativa



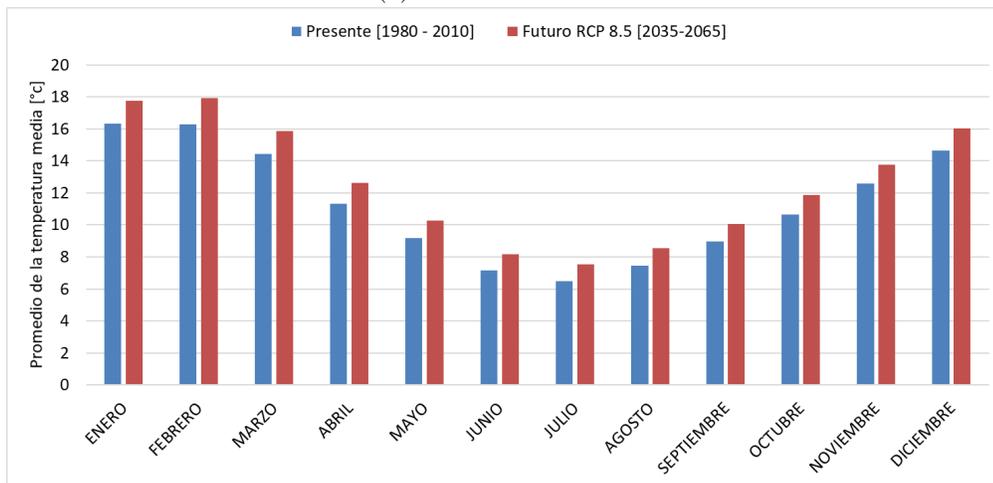
(b) Temperatura media

Figura B.8: Promedios de (a) humedad relativa y (b) temperatura media mensual de las provincias de la región del Bío Bío en el presente [1980-2010] y el futuro RCP 8.5 [2035-2065]

B.9. Araucanía



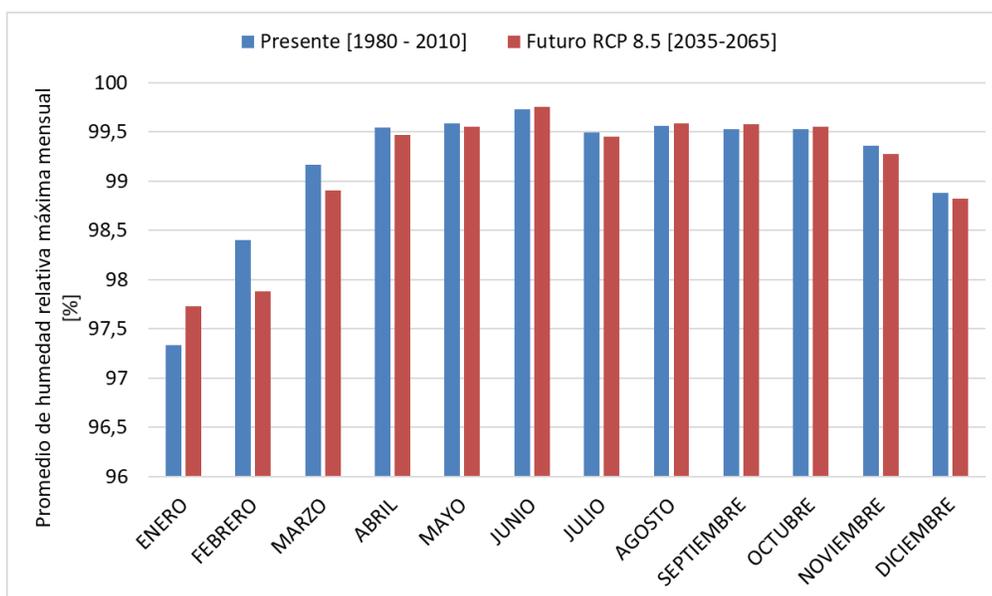
(a) Humedad relativa



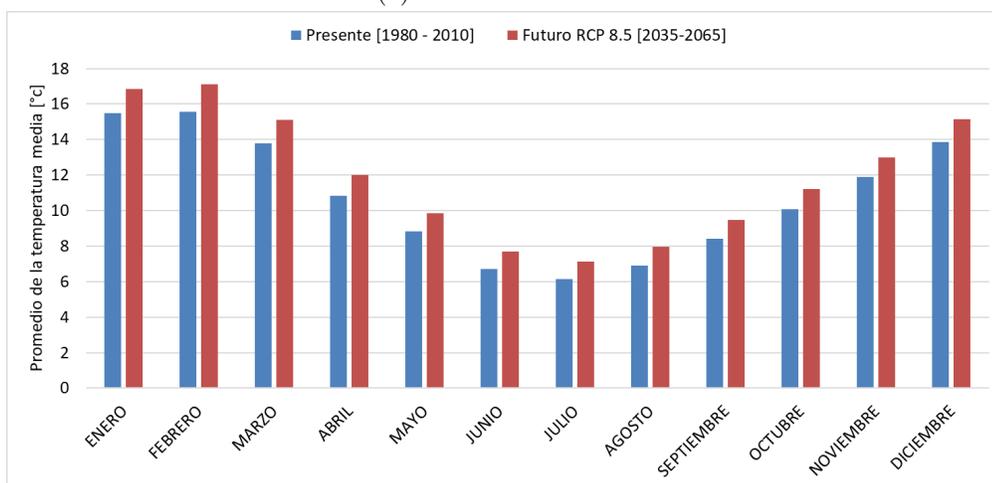
(b) Temperatura media

Figura B.9: Promedios de (a) humedad relativa y (b) temperatura media mensual de las provincias de la región de la Araucanía en el presente [1980-2010] y el futuro RCP 8.5 [2035-2065]

B.10. De los ríos



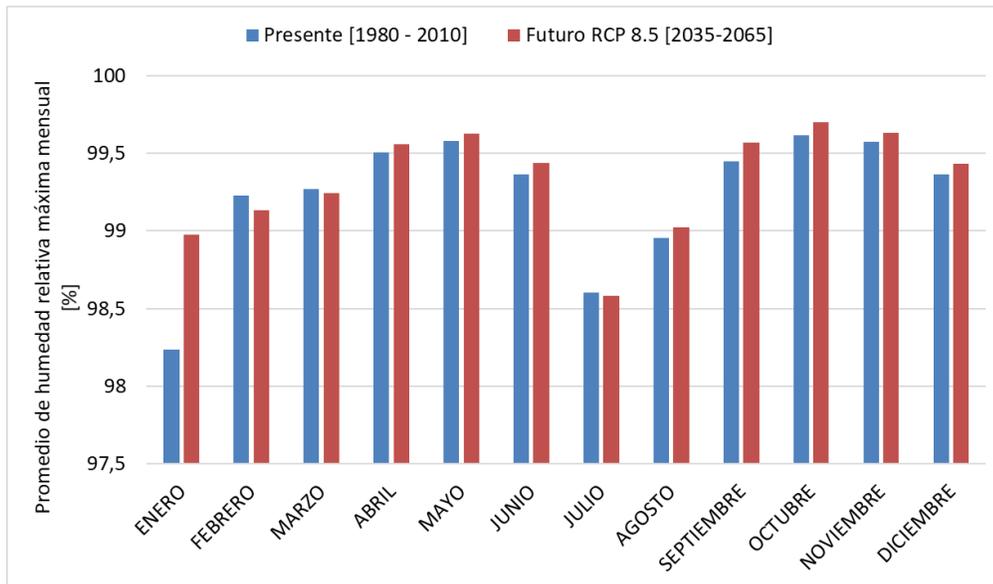
(a) Humedad relativa



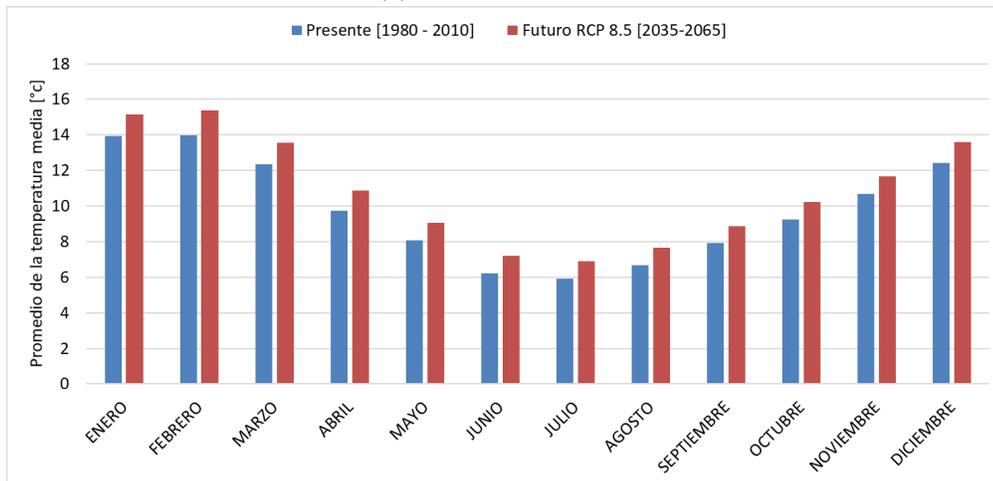
(b) Temperatura media

Figura B.10: Promedios de (a) humedad relativa y (b) temperatura media mensual de las provincias de la región De los ríos en el presente [1980-2010] y el futuro RCP 8.5 [2035-2065]

B.11. De los lagos



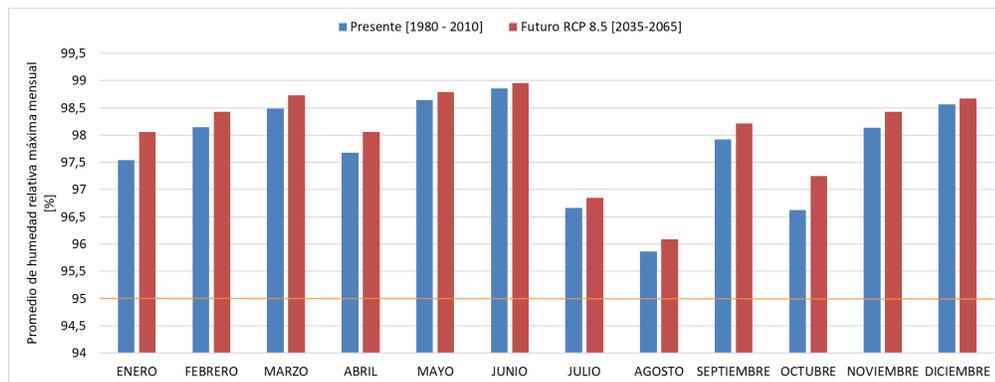
(a) Humedad relativa



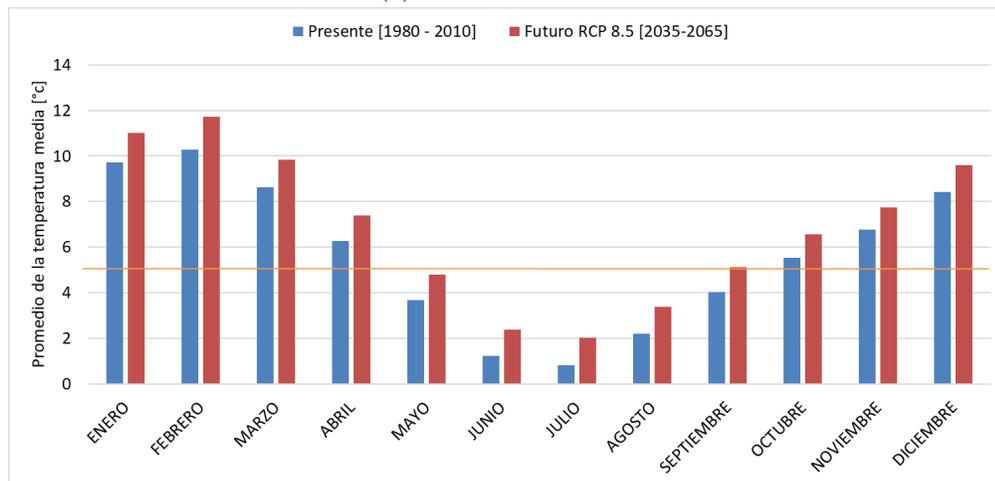
(b) Temperatura media

Figura B.11: Promedios de (a) humedad relativa y (b) temperatura media mensual de las provincias de la región De los lagos en el presente [1980-2010] y el futuro RCP 8.5 [2035-2065]

B.12. Aysén



(a) Humedad relativa



(b) Temperatura media

Figura B.12: Promedios de (a) humedad relativa y (b) temperatura media mensual de las provincias de la región de Aysén en el presente [1980-2010] y el futuro RCP 8.5 [2035-2065]

B.13. Niveles de humedad para carbonatación

B.14. Tarapacá

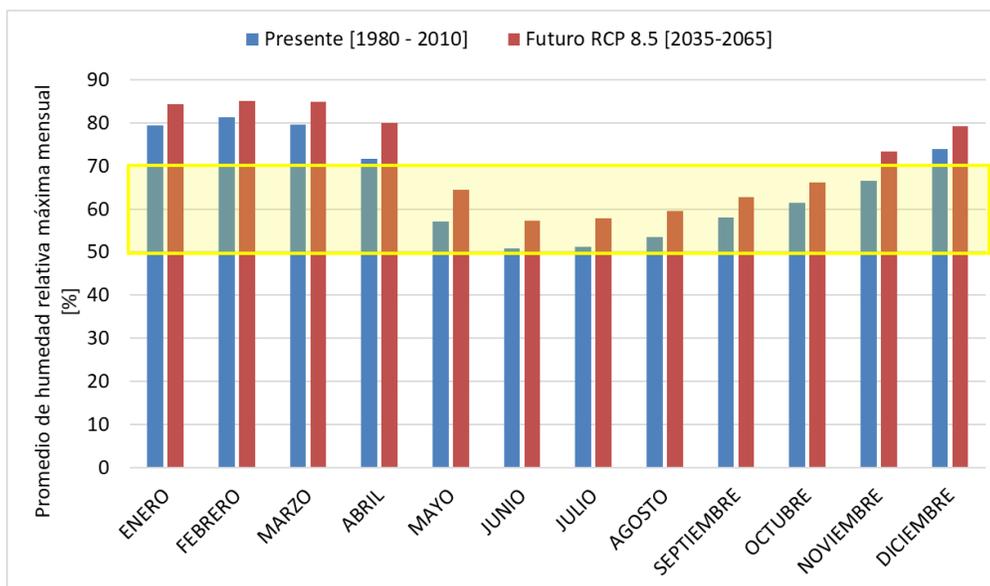


Figura B.13: Humedad relativa mensual [%] en la región de Tarapacá.

B.15. Antofagasta

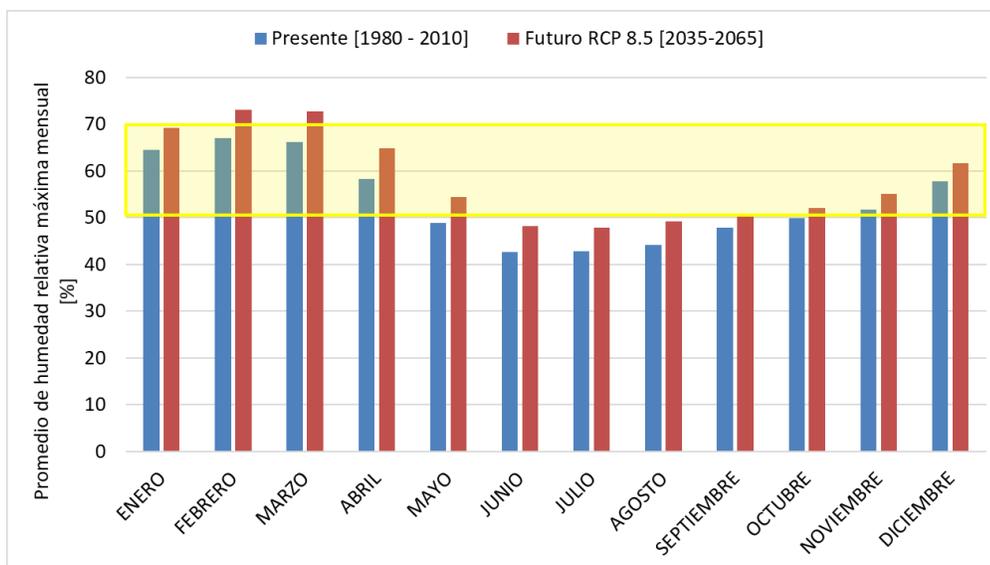


Figura B.14: Humedad relativa mensual [%] en la región de Antofagasta.

B.16. Valparaíso

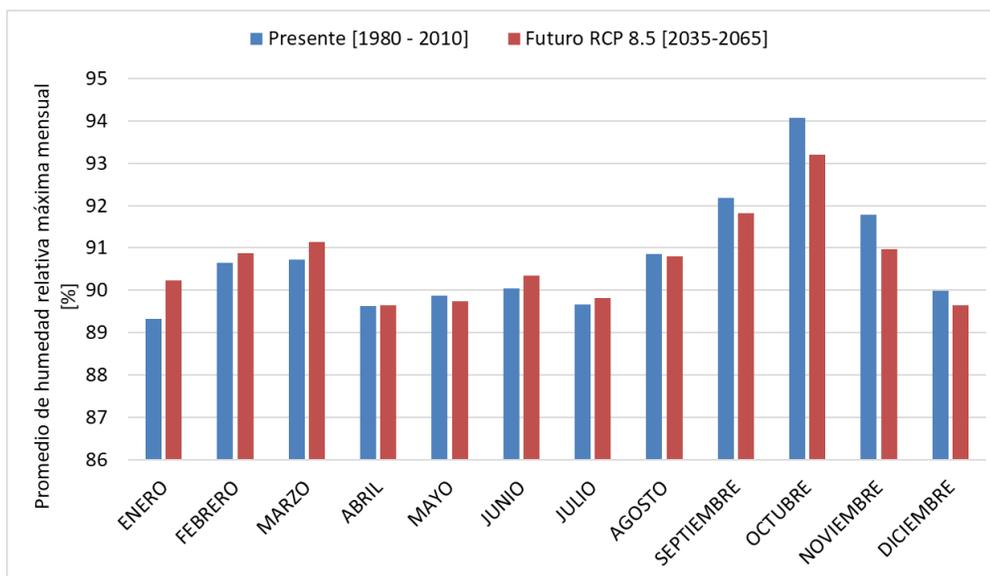


Figura B.15: Humedad relativa mensual [%] en la región de Valparaíso.

B.17. Región Metropolitana

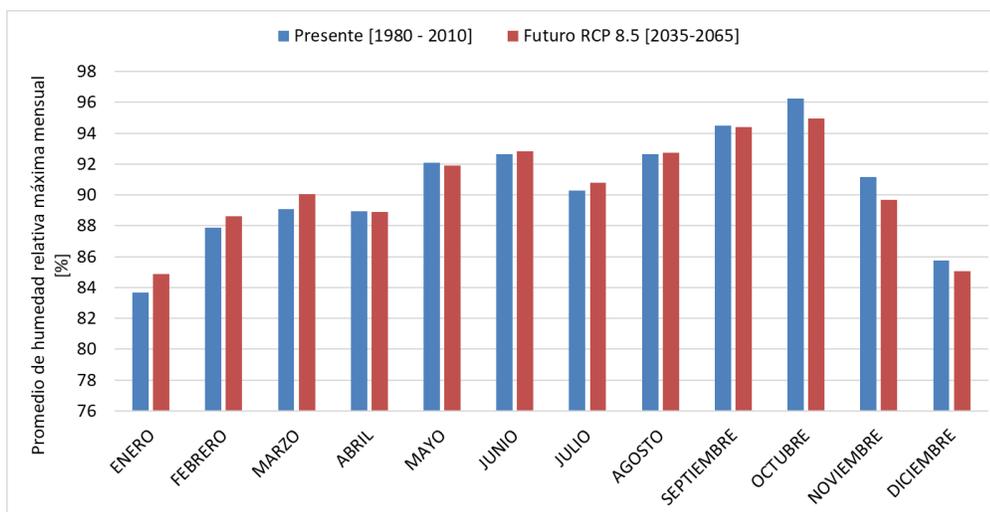


Figura B.16: Humedad relativa mensual [%] en la región Metropolitana.

B.18. O'higgins

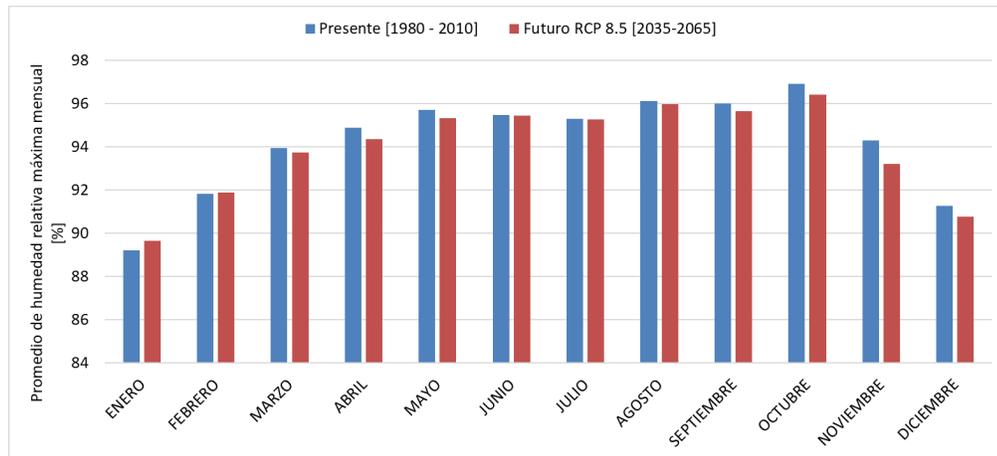


Figura B.17: Humedad relativa mensual [%] en la región de O'higgins.

B.19. Maule

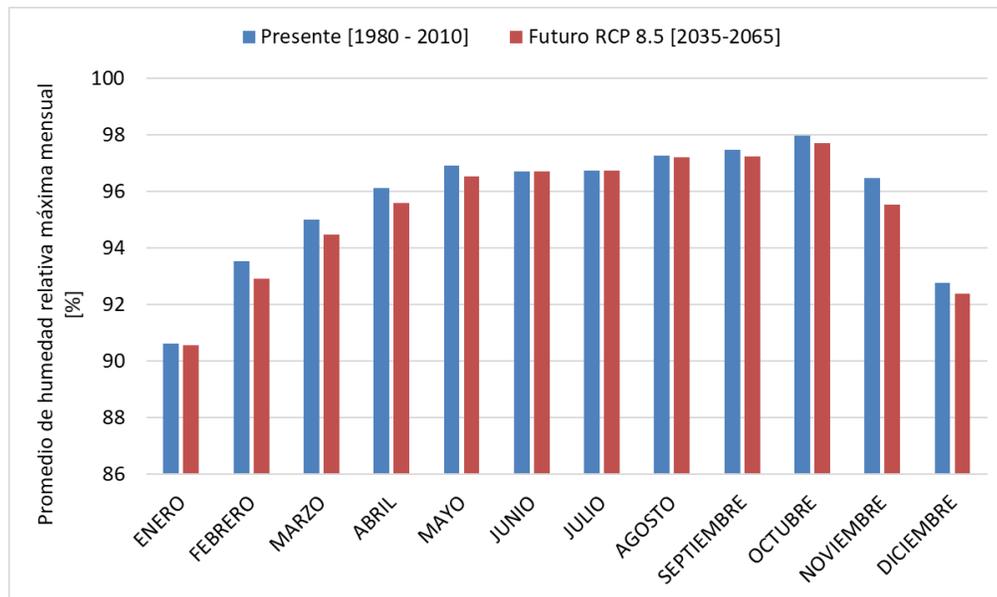


Figura B.18: Humedad relativa mensual [%] en la región del Maule.