



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

**ESTUDIO DE LOS EFECTOS E IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO
MEDIANTE ÍNDICES HIDROLÓGICOS EVALUADOS EN EVENTOS
EXTREMOS EN LA CUENCA DEL RÍO BUENO, CHILE**

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA, MENCIÓN RECURSOS Y MEDIO AMBIENTE HÍDRICO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

CATALINA JEREZ TOLEDO

PROFESORA GUÍA:
XIMENA VARGAS MESA

PROFESOR CO-GUÍA:
PABLO MENDOZA ZUÑIGA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
**ANA LUCÍA PRIETO SANTA
FRANCO RICCHETTI CAMPOS**

SANTIAGO DE CHILE

2021

RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR AL TÍTULO DE:
INGENIERA CIVIL Y GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA, MENCIÓN RECURSOS Y MEDIO AMBIENTE HÍDRICO
POR: CATALINA JEREZ TOLEDO
FECHA: OCTUBRE 2021
PROF. GUÍA: SRA. XIMENA VARGAS MESA

ESTUDIO DE LOS EFECTOS E IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO MEDIANTE ÍNDICES HIDROLÓGICOS EVALUADOS EN EVENTOS EXTREMOS EN LA CUENCA DEL RÍO BUENO, CHILE

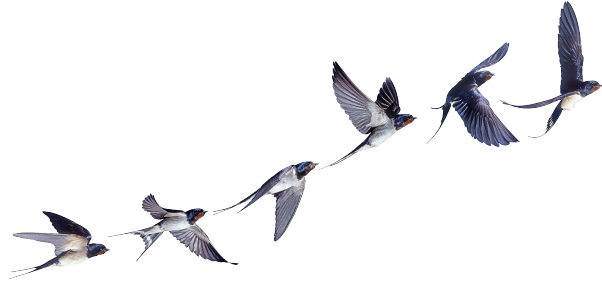
Las precipitaciones extremas son responsables de inundaciones urbanas e inundaciones por desbordes de ríos. Estos eventos generan desastres como deslizamientos de tierras, corte de carreteras, anegamiento de calles y casas, por nombrar algunos y, se caracterizan por su corto período de tiempo, pero alta intensidad de lluvia. Por otro lado, las sequías pueden perdurar décadas, afectando gravemente todo el sistema hidrológico debido a las perturbaciones que experimentan las variables hidrológicas. Estos fenómenos se traducen en problemas de desertificación, pérdidas agrícolas y ganaderas, alteración de la biodiversidad, entre otros.

En el presente estudio, se aplican indicadores e índices hidroclimáticos, para la evaluación y proyección de eventos extremos (inundaciones y sequías) en la cuenca del río Bueno. Una zona caracterizada por altos montos de precipitación media anual (>2000 mm), pero no exenta de sequías (e.g., 1988, 1998, 2010/2015). Además, se evalúa la calidad del agua —con fines particulares de uso/consumo de agua potable y riego— mediante el diseño y construcción un modelo hidro-estadístico que considera parámetros químicos e indicadores provenientes de eventos extremos, denominado *Hydrology and Chemistry of Water Quality* (HachM). Se estudian los eventos extremos como la calidad del agua en las ventanas temporales hidrológicas 1985/2015 y 2030/2060, mediante cuatro modelos climáticos globales (GCM).

Los resultados evidencian la radicalización de los eventos de precipitación extrema, manifestando incrementos superiores al 100 % en la frecuencia de los días con precipitaciones superiores a 70 mm, asociados a inundaciones. Con relación a la magnitud de los eventos, en promedio los GCM proyectan disminuciones del 10 % a 17 % en las condiciones de posibles inundaciones leves y, aumentos del 15 % a 42 % en las condiciones moderadas y extremas, bajo el análisis del Índice de Precipitación Estandarizado (SPI) en escalas de tres y seis meses.

A pesar del aumento en la frecuencia de las precipitaciones extremas, las precipitaciones medias anuales disminuyen entre un 20 % a 40 % respecto al período histórico. Los resultados de los índices hidroclimáticos, indican que en la cuenca el 50 % del tiempo se presentarían sequías leves a moderadas. A partir de los resultados del SPI de doce meses, y del promedio de los GCM, se proyectan cuatro sequías hidrológicas con duración superior a dieciocho meses.

Finalmente, el modelo HachM interpreta y proyecta la calidad del agua destinada a potabilización y aquella con fines agrícolas en Chile. Se determina que el principal problema de contaminación (actual) en la cuenca es la acción antrópica (e.g., acuicultura, descargas industriales y residuales) y, en segundo lugar, la contaminación natural debido a la lixiviación subterránea y superficial de formaciones geológicas. En relación con las proyecciones, si las condiciones de contaminación del período histórico se mantienen, la calidad del agua disminuye un 3,3 %. Sin embargo, si existen aumentos en las fuentes de contaminación (tanto naturales como antropogénicas), los valores descienden en un 30 % o superior, entregando clasificaciones *regulares* y *marginales* de calidad del agua.



*A mi abuela, que ya no se encuentra en los parajes de esta tierra,
pero continúa viviendo en nuestras memorias.*

*Y al río,
un caos sentimental,
que después de mil años recupera su memoria ancestral.*

Agradecimientos

Agradecer a mi mamá, Claudia Toledo Jerez. Por ser un ejemplo de mujer a seguir, por enseñarme a ser resiliente, por las llamadas interminables acompañadas de risas y secretos varios. Agradecerle por ser el pilar fundamental, por su amor incondicional, y por la compañía y confianza brindada desde siempre. Gracias a ti estoy aquí... estamos aquí. Esto es tanto mío como tuyo.

A Gonzalo Urzúa, por ser mi suplemento, compañero, amigo, reportero de contingencia nacional (y de virales), y el cable a tierra indispensable durante esta pandemia, gracias por ser y estar, aquí y en el ahora. También agradecer a nuestro grupo, conformado por el infiltrado y tremendo anfitrión Seba Vergara, gracias por recibirme en tu casa infinitas veces (sin ti la mesa queda coja), y a Pachi Araya junto a Cote Arellano, gracias por la chipeza que le otorgan a la vida.

A Karla Bustos y Jano Arenas, decirles que atesoraré cada viernes en los pastitos, con nuestras charlas, risas y sueños (la consultora), gracias por la amistad y cada vivencia compartida durante todos estos años. Agradecer a Bastián Domínguez, por ser el amigo que no debe faltar en tu vida, ¿quién diría que con un simple *hola* puedes entablar una amistad y conocer a todo un piño de gente? Octavio Murillo, Diego Abarca, Cytia Lagos y todos Los Arrieros con los que tuve la oportunidad de compartir, la salita de civil lleva nuestra marca.

Agradecer a La Profe, Ximena Vargas, por su cariño y confianza, por compartir sus experiencias y sabiduría, por enseñarme y darme las herramientas necesarias para seguir creciendo... Usted, es *La Big Boss*. Y al tremendo equipo de hidrología, Franco Richetti, gracias por compartir e ilustrarme con todo ese conocimiento, por tus ideas y consejos, por ser un mentor en las nuevas etapas; Pablo Mendoza, por ser una persona sencilla, atenta y comprometida, por enseñar con ímpetu y con alegría, y por toda su dedicación fundamental en este trabajo; Miguel Lagos, gracias por ser como es, por su carisma y simplicidad, y Eduardo Muñoz, por su simpatía, espontaneidad, y ayuda desde el minuto uno de habernos conocido.

También agradecer a los docentes del Departamento de Recursos Hídricos, especialmente a Ana Lucía Prieto, Katherine Lizama, Beto y James McPhee, por su docencia y desafíos impuestos en nuestra formación. Y a Jacqueline Suárez, quien siempre está con una sonrisa y la mejor disposición a ayudar. Por último, gracias al Departamento de Ingeniería Civil por financiar parcialmente el desarrollo de esta investigación y, a SIPEE y sus creadores, por dejarme ser parte de la anhelada casa de estudios.

Agradecer a todos los que fueron, los que están y a los que continuarán... Y como dijo la gran Violeta Parra...

Gracias a la vida.

Tabla de Contenido

1. Introducción General	1
1.1. Introducción	1
1.2. Objetivos	4
1.2.1. General	4
1.2.2. Específicos	4
1.3. Estructura del informe	5
2. Zona de estudio	6
2.1. Antecedentes generales	6
2.2. Geomorfología y uso de suelo	7
2.3. Hidroclimatología	8
2.4. Usos del agua	10
2.4.1. Usos in-situ	11
2.4.2. Usos extractivos	11
2.5. Calidad de aguas	12
2.6. Eventos extremos	13
2.6.1. Inundaciones	13
2.6.2. Sequías	15
3. Datos & Métodos	17
3.1. Datos disponibles	19
3.1.1. Red hidrométrica nacional	19
3.1.2. Producto grillado CR2MET	19
3.2. Métodos	21
3.2.1. Escenarios de cambio climático	21
3.2.2. Modelo hidrológico: <i>Variable Infiltration Capacity</i> (VIC)	23
3.2.3. Indicadores hidroclimáticos	23
3.2.4. Índices hidroclimáticos	24
3.2.5. Métodos de cálculo para el Índice de Calidad de Aguas	26
3.2.6. Evaluación del modelo de calidad de aguas	27
4. Resultados & Discusión	29
4.1. Acuerdo de los modelos climáticos globales	29
4.1.1. Acuerdo del producto grillado CR2MET, VIC, y simulaciones históricas	29
4.1.2. Acuerdo de proyección climática	31

4.2. Índices meteorológicos e hidrológicos para la evaluación y proyección de inundaciones	35
4.2.1. Análisis de inundaciones en el período base	35
4.2.2. Evaluación de inundaciones según proyecciones climáticas	40
4.2.3. Síntesis	44
4.3. Análisis de severidad-duración-frecuencia de sequías meteorológicas, agrícolas e hidrológicas en una cuenca del sur de Chile	45
4.3.1. Análisis de sequías en el período base	45
4.3.2. Frecuencia, duración y severidad proyectada	50
4.3.3. Síntesis	54
4.4. Relación entre eventos extremos y calidad del agua. HachM, un modelo hidro-estadístico para el estudio, análisis y proyección de la calidad del agua	56
4.4.1. Calidad del agua en la línea base	56
4.4.2. Uso y desarrollo de los WQI para el análisis de la calidad de agua en la línea base	59
4.4.3. Construcción, diseño y desarrollo del modelo <i>Hydrology and chemistry of water quality</i> (HachM)	65
4.4.4. Aplicación de HachM para la proyección de la calidad del agua	72
4.4.5. Relación de eventos extremos y calidad del agua	75
4.4.6. Síntesis	76
5. Conclusión	77
5.1. Conclusiones generales	77
5.2. Eventos extremos y calidad del agua	78
5.3. Desafíos futuros	80
Glosario	81
Bibliografía	89
A. Características de la cuenca	I
B. Modelo <i>Variable Infiltration Capacity</i> (VIC)	VII
C. Indicadores e índices hidroclimáticos	IX
D. Caracterización química	XX
E. Índices de Calidad de Agua y HachM	XXVIII

Índice de Tablas

2.1. Características demográficas de la cuenca del río Bueno	7
2.2. Parámetros geomorfológicos de la cuenca del río Bueno	7
2.3. Régimen hidrológico, precipitación y caudal medio anual promedio en período 1985/2015 en las subcuencas del río Bueno	8
2.4. Derechos de Aprovechamiento de Aguas asignados en la cuenca del río Bueno	10
2.5. Resumen de registros históricos de inundaciones	14
3.1. Selección de Modelos Climáticos Globales	22
3.2. Métricas de bondad de ajuste para la evaluación de HachM	27
4.1. Clasificación de los días secos en las subcuencas del río Bueno, análisis 1985/2015	30
4.2. Acuerdo de los modelos climáticos globales en la región superior del SPI . . .	34
4.3. Indicadores RR90 y RR100 en el período histórico 1985/2015	36
4.4. Eventos de caudales anómalos en las subcuencas del río Bueno	38
4.5. Factores $f_{Q_i} = Q_i/Q_5(Me)$ de indicadores basados en caudal	38
4.6. Variación porcentual de la proyección Q_5 y Q_{p90} respecto a la mediana histórica de Q_5	42
4.7. Resumen de estadísticos de los indicadores Q_{50} y Q_{95} en el período histórico	45
4.8. Variación fraccional del Índice de Flujo Base, período 1985/2015 y 2030/2060.	51
4.9. Variación fraccional de la frecuencia del Índice de Precipitación Estandarizado, entre 1985/2015 y 2030/2060	52
4.10. Selección y pesos de importancia del DWQI	61
4.11. Selección y pesos de importancia del IWQI	62
4.12. Casos de entrenamiento y testeo de HachM	69
4.13. Coeficientes de regresión de índices de calidad de agua y escenarios de cambio	73
4.14. Resultados de cambios unitarios y porcentuales del DWQI	74
4.15. Resultados de cambios unitarios y porcentuales del IWQI	74

Índice de Ilustraciones

2.1. Curva de variación estacional de caudales medios mensuales de las subcuencas del río Bueno	9
3.1. Diagrama metodológico para evaluación de eventos extremos y calidad del agua.	18
3.2. Ubicación geográfica y red hidrométrica de la cuenca del río Bueno	20
3.3. Emisiones globales de gases de efecto invernadero (GEI)	21
4.1. Clasificación de los días lluviosos en las subcuencas del río Bueno, análisis 1985/2015	30
4.2. Curva de duración de caudales medios diarios de las observaciones y simulaciones climáticas, 1985/2015	31
4.3. Variación fraccional de la precipitación media mensual en las subcuencas del río Bueno, entre 1985/2015 y 2030/2060	32
4.4. Variación fraccional del caudal, mediante percentiles calculados en el largo plazo, entre 1985/2015 y 2030/2060	32
4.5. Clasificación de los factores de acuerdo $f_{Agreg.}^{BNA}$	33
4.6. Distribución de RR10, RR25, RR50 y RR70 en la cuenca del río Bueno, durante el período histórico 1985/2015	35
4.7. Quinto percentil de la curva de duración de caudales medios diarios	37
4.8. Región positiva del Índice de Precipitación Estandarizado en la cuenca del río Bueno	39
4.9. Curva de duración de los índices (mensuales) PDSI, PHDI y RAI	40
4.10. Clasificación de los días lluviosos en las subcuencas del río Bueno, análisis 1985/2015 y 2030/2060	41
4.11. Frecuencia de las condiciones húmedas del SPI, entre 1985/2015 y 2030/2060	43
4.12. Curva de duración de indicadores hidroclimáticos durante el período 1985/2015	46
4.13. Índice de Flujo Base (BFI) en el período histórico 1985/2015	46
4.14. Región negativa del Índice de Precipitación Estandarizado en la cuenca del río Bueno	48
4.15. Severidad acumulada y duración consecutiva (meses) del Índice de Precipitación Estandarizado	49
4.16. Curva de duración de los índices (mensuales) PDSI, PHDI y RAI	49
4.17. Variación fraccional de los indicadores DD, LDP, factores f_{Q_i} y Q95, entre 1985/2015 y 2030/2060	50

4.18. Severidad acumulada y duración consecutiva (meses), de acuerdo con la proyección 2030/2060 del Índice de Precipitación Estandarizado	53
4.19. Histogramas de variación estacional del pH	58
4.20. Factores naturales, usos del agua y estado trófico de los ríos de las subcuencas del río Bueno	59
4.21. Índices de Calidad de Agua en el período 1990/2015	63
4.22. Correlación alta de Pearson en la subcuenca UC-1030	65
4.23. Diagrama de relación entre la calidad de agua e hidrología	67
4.24. Test de hipótesis básicas en HachM - caso T2	70
4.25. Observaciones vs simulaciones de HachM en períodos de validación	71

Capítulo 1

Introducción General

1.1. Introducción

Li *et al.* (2011) reportaron que los fenómenos de precipitación extrema han tenido aumentos en cuanto a frecuencia y magnitud en las últimas décadas. Diversas regiones del mundo han sido testigo de estos fenómenos, como lo son el Sudeste Asiático (Endo *et al.*, 2009), el Mediterráneo Occidental (Valdes-Abellan *et al.*, 2017), América del norte, centro y sur (Aguilar *et al.*, 2005; Vincent y Mekis, 2006; Sörensson *et al.*, 2010). Esto representa un problema, puesto que el sur de Chile es una zona propensa a presentar este tipo de eventos. Además, la falta o precaria infraestructura hidráulica de algunas comunidades acrecienta el problema y los daños pueden ser de mayor severidad. En conclusión, la población humana y silvestre se encuentra expuesta y vulnerable frente a posibles eventos de precipitación extrema, por lo que surge la necesidad de cuantificar y evaluar los aumentos en magnitud y frecuencia que puedan experimentar este tipo de evento en el futuro.

Las precipitaciones extremas pueden ser eventos cortos marcados por una gran intensidad de lluvia, o bien, eventos prolongados que aportan una gran cantidad de agua. Pueden causar daños por sí solas, lo que sumado a las variaciones en las tasas de transpiración, la reducción de las tierras con cobertura vegetal, los cambios en el uso del suelo producto del crecimiento poblacional y el emplazamiento de las ciudades, la elevación de la línea de nieve, además de otras consecuencias naturales o antropogénicas, agravan la situación de los eventos extremos, provocando los mayores efectos adversos en los asentamientos humanos. En consecuencia, frente a fenómenos de precipitación de mediana o gran intensidad, se obtiene una mayor escorrentía directa, la cual genera colapsos y destrozos en la infraestructura vial e hidráulica. También existen problemas de anegamiento de calles o casas, colapso en las redes de colectores de aguas lluvias, cierre de escuelas, incomunicación de las ciudades, y lo más importante, se compromete el bienestar físico, psicológico y económico de las comunidades.

Por otro lado, las olas de calor y las sequías son fenómenos responsables de mega-incendios, como los registrados en el norte de Australia (Russell-Smith y Edwards, 2006), sur de África (De Santis *et al.*, 2010), y centro-sur de Chile (Urrutia-Jalabert *et al.*, 2018; Valderrama *et al.*, 2018; Castillo *et al.*, 2019). Pero también ocasionan graves problemas en el uso de suelo, limitando la vida silvestre, aumentando la desertificación y repercutiendo en la economía

social y política de los asentamientos humanos (Stephens *et al.*, 2014).

Las sequías son anomalías hidroclimáticas que dan cuenta de una condición extrema en una variable hidrológica con respecto a su comportamiento habitual. Pueden perdurar décadas (McKee *et al.*, 1993) debido al continuo aumento de las tasas evapotranspirativas, disminución de las precipitaciones medias anuales (Verdon y Franks, 2007), entre otros factores naturales y antropogénicos. Por consiguiente, existen graves consecuencias e impactos en la hidrología y ecología, donde las disminuciones en los caudales medios anuales son unos de los principales efectos adversos de las sequías.

En la literatura, se pueden encontrar tres tipos de sequías¹: la sequía meteorológica, hidrológica y agrícola. La primera responde al déficit de precipitación respecto a valores medios anuales según Gibbs, W.J. (1975); sin embargo, otros autores indican que esta sequía se ve influenciada por un conjunto de variables meteorológicas, tales como temperatura y humedad atmosférica. Por otro lado, la sequía hidrológica posee relación directa con flujos superficiales y sub-superficiales (Mishra y Singh, 2010), por lo cual la variable a evaluar son caudales medios anuales. Finalmente, las sequías agrícolas responden al déficit en la humedad del suelo, responsable del desarrollo y crecimiento de plantas y cultivos (Rhee *et al.*, 2010).

Durante el siglo XX, se registraron perturbaciones en el estado natural del clima, lo que trajo consigo cambios en la atmósfera, biósfera, criósfera, hidrósfera y litósfera. Hoy, una vez transcurridas las dos primeras décadas del siglo XXI, el mundo continúa enfrentándose a estas alteraciones. La comunidad científica denomina este conjunto de fenómenos como cambio climático, fenómeno que es responsable de los aumentos en la temperatura media o bajas en las precipitaciones medias anuales de determinadas regiones del mundo.

Una vasta gama de impactos compone el cambio climático, los efectos provocados por agentes naturales y/o antropogénicos, afectan de forma evidente la atmósfera terrestre y los sistemas de la biósfera, dando pie a zonas vulnerables en todos los continentes, alterando los recursos disponibles, generando problemas de escasez, distribución, almacenaje y, por tanto, económicos (IPCC, 2013). Las zonas más afectadas suelen ser aquellas de mayor vulnerabilidad y exposición, donde las características demográficas aumentan los efectos e impactos del cambio climático, en otras palabras, los asentamientos de estas comunidades se encuentran en desventaja económica y social, puesto que no tienen la infraestructura adecuada para soportar y/o adaptarse.

Entre los efectos adversos intensificados por el cambio climático se destacan los eventos extremos (e.g., tornados, huracanes, tormentas eléctricas, olas de calor o de frío, inundaciones y sequías). Dependiendo de la topografía y clima, cada región puede verse afectada en mayor o menor grado por un evento extremo. Por otro lado, Cooley *et al.* (2011) plantearon una amplia gama de problemas que presentarán los recursos hídricos debido al cambio climático. Uno de ellos son las alteraciones en cantidad y calidad del recurso, lo cual se traduce en complicaciones de abastecimiento, distribución y uso/consumo de agua potable.

La Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH) considera que el agua es un factor determinante en el desarrollo económico, social y cultural de las personas. Además, mantiene

¹También es posible encontrar la sequía socio-económica, la cual no es abordada en el presente estudio.

la integridad de los sistemas de la tierra. Biswas (2004) expone los componentes que considera la GIRH, entre ellos la calidad del agua, la cual puede clasificarse en tres categorías - física, química y biológica - según los parámetros utilizados (Swamee y Tyagi, 2007).

La Organización Mundial de la Salud (WHO, por sus siglas en inglés) indica que el principal problema que enfrenta la calidad del agua a nivel global lo constituye la eutrofización (du Plessis, 2017). Una consecuencia del incremento en los niveles de nutrientes (fósforo y nitrógeno) en los cuerpos de agua, genera una proliferación de algas y con ello la disminución del oxígeno. Las fuentes de nutrientes usualmente provienen de las aguas residuales domésticas, efluentes industriales, escorrentía agrícola (fertilizantes) y emisiones a la atmósfera procedentes de la quema de combustibles fósiles e incendios forestales (Ansari *et al.*, 2011). Sin embargo, la eutrofización es la punta del iceberg de todos los problemas. El principal deterioro de la calidad del agua procede de actividades antropogénicas, tales como, deforestación, uso de pesticidas y fertilizantes, derrame de combustibles, vertidos químicos industriales y de aguas residuales. Durante la última década se añade un nuevo problema a la lista, los contaminantes emergentes (Geissen *et al.*, 2015).

Los expertos de todo el mundo que conforman el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) han investigado de forma continua los riesgos asociados a los efectos e impactos del cambio climático, y han informado sobre las medidas de mitigación en el marco de las posibles repercusiones adversas que es necesario enfrentar debido a este fenómeno. Específicamente, en el reporte de la fase AR5 se determinaron aumentos de temperaturas y disminuciones de las precipitaciones medias anuales en diversas regiones del mundo, siendo Chile una de las zonas afectadas. Estudios locales realizados por universidades, centros de investigación y entes del gobierno han determinado que las macrozonas norte, centro y centro-sur del país se verán fuertemente afectadas por el cambio climático (Bozkurt *et al.*, 2018; DGA, 2017, 2018, 2019).

El año 2020 se publica el Atlas de Riesgos Climáticos en Chile (ARClím (*sitio web*)). El proyecto convoca a 12 actores sectoriales o *working packages*-WP (e.g., agricultura, biodiversidad, energía, salud, entre otros), los que crean mapas de cobertura nacional de riesgos climáticos, de acuerdo con las amenazas, exposición y sensibilidad de los sistemas afectados (resolución puntual, comunal o regional). Entre los resultados, el WP-Hidrología (Vargas *et al.*, 2020) desarrolla tres cadenas de impacto asociadas a inundaciones urbanas, inundaciones por desbordes de ríos y sequías hidrológicas. Desde aquí, surgen los cimientos de la presente investigación, que si bien no evalúa los riesgos climáticos, considera el análisis en detalle de las amenazas climáticas y sus repercusiones sobre una determinada zona de estudio.

Con relación a las políticas de protección del recurso y las asignaciones óptimas de diferentes usos/consumos, estas deben ser determinadas en función de las características propias de cada lugar (*uniquess of place*). En Chile, existen diversas normativas y/o decretos que regulan (o indican a modo de sugerencia) los límites máximos permisibles de contaminantes en los cuerpos de agua fluviales y lacustres (e.g., NCh409/1.Of2005, NCh1333/1.Of78, DS90). Así también, se regula la descarga de fuentes puntuales/difusas² mediante normativas secundarias (atingentes a una cuenca en específico) y/o decretos que la gobernanza estime conveniente.

²Contaminación urbana, industrial, agrícola, entre otras.

La presente investigación evalúa y cuantifica los impactos del cambio climático en fenómenos extremos –inundaciones y sequías– en la cuenca del río Bueno, ubicada en el sur de Chile. Una zona en la que históricamente han prevalecido las condiciones húmedas, por lo cual registra numerosos eventos de precipitación extrema. Sin embargo, la mega-sequía que afecta las macrozonas norte y centro de Chile desde el año 2010, con el pasar de unos pocos años se ha expandido hacia el centro-sur y sur del país, reduciendo los reservorios de agua dulce, como también los niveles de ríos y lagos (DGA, 2020).

Además, en consideración a que las inundaciones son eventos que alteran parámetros de calidad del agua, tales como turbiedad, pH, sólidos disueltos totales, entre otros (Hrdinka *et al.*, 2012); y que las sequías incrementan las concentraciones de parámetros químicos, llegando incluso a generar problemas de eutrofizaciones, en el caso de presentarse aumentos en las concentraciones de fósforo y nitrógeno, variaciones en la demanda bioquímica de oxígeno y oxígeno disuelto, cambios de temperatura del cauce y por, sobre todo, reducciones del caudal de dilución (Mosley, 2015; Girão Braga *et al.*, 2015). Se estudia la relación de los eventos extremos con la calidad del agua.

El desarrollo del estudio buscar responder a las siguientes preguntas:

1. ¿Se proyectan cambios en la frecuencia y magnitud de eventos de precipitación extrema, asociados a inundaciones?
2. ¿Cuál es el registro de sequías meteorológicas, agrícolas e hidrológicas?, ¿se proyectan cambios en la severidad, duración y frecuencia de este tipo de evento extremo?
3. ¿La calidad del agua puede ser representada mediante variables hidroclimáticas aplicadas en el estudio de eventos extremos? De ser factible, ¿se perciben y/o existen cambios en la calidad del agua debido a la presencia de los eventos?

1.2. Objetivos

1.2.1. General

El presente trabajo analiza los efectos e impactos del cambio climático en la cuenca del río Bueno, a través de la selección, evaluación y cuantificación de indicadores e índices hidroclimáticos, relacionados a eventos extremos, así como de índices de calidad del agua.

1.2.2. Específicos

- Análisis y aplicación de indicadores e índices hidroclimáticos para la evaluación y proyección de inundaciones.
- Análisis y aplicación de indicadores e índices hidroclimáticos para la cuantificación de la severidad, duración y frecuencia de sequías meteorológicas, agrícolas e hidrológicas.
- Construcción de modelo hidro-estadístico de calidad del agua, acoplado a índices de calidad de agua, enfocados en usos particulares del recurso, 1) uso/consumo de agua potable y 2) actividades agrícolas.

1.3. Estructura del informe

En el capítulo 2 se caracteriza la zona de estudio, el capítulo 3 expone la metodología empleada, de manera conjunta a la revisión bibliográfica. Luego, el capítulo 4 presenta los resultados de tres artículos científicos, para finalizar en el capítulo 5 donde son recogidas las principales conclusiones y lecciones aprendidas de esta investigación, con énfasis en los futuros problemas que puede enfrentar la cuenca del río Bueno, desde el punto de vista meteorológico, hidrológico, agrícola, y por ende, social, político y económico.

De los resultados de esta memoria, se desprenden artículos científicos que llevan los siguientes títulos:

- *Meteorological and hydrological indices for the evaluation and projection of floods. Case analysis: the Bueno river basin, Chile.*
- *Severity-duration-frequency analysis of meteorological, agricultural, and hydrological droughts in a southern Chilean catchment.*
- *Extreme events and water quality relationship. HachM, a hydro-statistical model for the study, analysis, and projection of water quality.*

Capítulo 2

Zona de estudio

El presente capítulo tiene por objetivo describir y caracterizar el dominio de estudio en términos demográficos, geomorfológicos e hidroclimáticos. Además, se presenta la información referente a los usos y calidad del agua de ríos y lagos de la cuenca del río Bueno, de acuerdo con la información proporcionada por la Dirección General de Aguas (DGA), entre otros entes investigadores. Luego, se presenta el catastro de eventos extremos (inundaciones y sequías).

2.1. Antecedentes generales

La cuenca del río Bueno se ubica en el sur de Chile, entre las regiones de Los Ríos y Los Lagos. Abarca una superficie de 15.367 km² y se compone de ocho subcuencas, delimitadas de acuerdo con la notación BNA (Banco Nacional de Aguas). Las subcuencas se clasifican en cuencas cordilleranas (**UC**), intermedias (**IC**) y costeras-bajas (**DC**) (ver Figura 3.2).

Con relación a la demografía de la cuenca, la Tabla 2.1 muestra los principales centros urbanos (e.g, Osorno, La Unión y Río Bueno) y de mayor superficie (> 100 km²). Las localidades restantes (Corte Alto, Crucero, Llifén, Riachuelo, Cancura, Casma, Puerto Nuevo, Tegualda, Pichirropulli, Pilmaiquén, Ignao, Itropulli, Cayurruca, Villa Pichil, Puerto Octay y el sector norte de Frutillar) abarcan el 4% de la superficie de la cuenca (~ 605 km²) y sus respectivas poblaciones no superan los 1.000 habitantes (con excepción de Frutillar que mantiene el 60% o más de su superficie en las cuencas e islas entre río Bueno y río Puelo - BNA 104).

En términos económicos la cuenca se destaca por su producción agrícola, ganadera y lechera, además de la actividad monoforestal, caracterizada por la producción de especies exóticas como el *Eucalyptus nitens* y el *Pinus radiata* (Little *et al.*, 2009; CONAF, 2014). A raíz de la explotación de tierras vírgenes, el crecimiento industrial y crecimiento demográfico, la cuenca presenta cambios en los niveles de erosión y permeabilidad, alterándose –principalmente– la capacidad de infiltración del suelo (IPP, 2002). Por consiguiente, frente a un fenómeno de precipitación extrema, se genera una mayor escorrentía instantánea debido a la impermeabilización del suelo, lo que finalmente se traduce en mayores daños colaterales en la población humana (Vicuña *et al.*, 2013).

Tabla 2.1 Características demográficas de la cuenca del río Bueno. Se presentan los principales centros urbanos y de mayor superficie ($> 100 \text{ km}^2$).

Comuna	Población total	Número de viviendas	Área (km^2)	Subcuenca BNA *	Río **
Osorno	161.460	60.132	2608,72	IC-1036	Rahue
La Unión	38.036	15.125	657,26	IC-1031	Bueno
Río Bueno	31.372	13.312	402,46	IC-1031	Bueno
Purranque	20.269	7.873	305,11	IC-1035	Negro
Fresia	12.261	5.262	248,56	IC-1035	Negro
Río Negro	14.085	5.670	196,72	IC-1035	Negro
Futrono	14.665	6.500	176,72	UC-1030	Bueno
Entre Lagos	4.197	1.549	123,88	UC-1032	Pilmaiquén
San Pablo	10.030	4.235	119,10	IC-1033	Pilmaiquén
Lago Ranco	9.896	5.435	101,59	UC-1030	Bueno

Fuente: CENSO (2017)

(*) subcuenca donde se ubica la comuna, y (**) río principal que define (*).

2.2. Geomorfología y uso de suelo

La Tabla 2.2 muestra los principales parámetros geomorfológicos de cada subcuenca, obtenidos del procesamiento del Modelo de Elevación Digital *Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1 Arc-Second Global versión 3.0* (USGS, 2020), en el Sistema de Información Geográfica QGIS. En términos de superficie, las subcuencas UC abarcan el 54,8 % de la superficie total, mientras que las intermedias consideran el 40,5 % (siendo IC-1035 el 41,3 % de la superficie anterior) y, la subcuenca DC-1037 cubre el 4,7 % de la cuenca del río Bueno.

Tabla 2.2 Parámetros geomorfológicos de la cuenca del río Bueno.

Parámetro/BNA	UC-1030	IC-1031	UC-1032	IC-1033	UC-1034	IC-1035	IC-1036	DC-1037
Área (km^2)	3.348	1.765	2.910	406	2.160	2.576	1.487	715
Elev. Mínima (m.s.n.m)	62	3	3	0	20	19	0	0
Elev. Media (m.s.n.m)	742	192	575	121	409	164	118	431
Elev. Máxima (m.s.n.m)	2.270	1.396	2.236	691	2.476	1.009	844	1.045
Río principal	Bueno	Bueno	Pilmaiquén	Bueno	Rahue	Negro	Rahue	Bueno

Las subcuencas cordilleranas muestran un gran potencial erosivo (Figura A.1), al igual que la subcuenca DC-1037. Con relación a las subcuencas intermedias, las curvas hipsométricas denotan una fase de madurez (estado de equilibrio).

Cuatro formaciones volcánicas se ubican en la cuenca del río Bueno: el Volcán Osorno, Carrán, Casablanca y Puyehue. Con respecto a las formaciones geológicas, se presentan en la cuenca franjas con orientación poniente-oriente, compuestas principalmente de secuencias sedimentarias (52,7 %), seguida de rocas metamórficas y volcánicas, con un 18,4 % y 17,7 %, respectivamente (SERNAGEOMIN, 2003).

La geomorfología de la cuenca se caracteriza por una precordillera andina con suelos profundos (150 - 250 cm) provenientes de cenizas volcánicas, ricos en materia orgánica y con buenas características físicas. El sector intermedio presenta los mejores terrenos para cultivos

y praderas con gran fertilidad. Aquellos suelos no intervenidos y/o afectados por la expansión demográfica presentan una alta capacidad de retención de agua y buena permeabilidad. Por otro lado, los suelos de la cordillera de la costa poseen una textura arcillosa, con un bajo contenido de materia orgánica y permeabilidad, además, un pH ácido. Debido a la elevada altitud y pendiente, estos sectores son utilizados para la producción forestal y crianza de ganado (DGA, 2004).

La Figura A.2 muestra el mapa de uso de suelo en la cuenca del río Bueno según el Catastro de Uso de Suelo y Vegetación (CONAF, 2016). Las praderas y bosques nativos o mixtos abarcan la mayor superficie de la cuenca, con aproximadamente un 44% y 37%, respectivamente. Luego, los cuerpos de agua, glaciares y humedales comprenden el 11% de la superficie.

2.3. Hidroclimatología

La cuenca del río Bueno tiene un régimen pluvial, sin embargo, sus subcuencas presentan variaciones hidroclimáticas debido a las diferencias geomorfológicas, entre ellas, una cordillera volcánica activa, lagos de barrera morrénica, un llano central con morrenas, la cordillera de la costa y planicies fluviomarinas. En consecuencia, las subcuencas se clasifican en regímenes pluvio-nivales, nivo-pluviales o pluviales. La Tabla 2.3 muestra los descriptores hidrológicos de cada subcuenca.

Tabla 2.3 Régimen hidrológico, precipitación y caudal medio anual promedio en período 1985/2015 en las subcuencas del río Bueno. Los valores de precipitación y caudal son estimados para **cada subcuenca** en base al producto grillado CR2MET v2.0 y simulación VIC (ver Apartado 3.1).

Variable / BNA	UC-1030	IC-1031	UC-1032	IC-1033	UC-1034	IC-1035	IC-1036	DC-1037
Precipitación (mm)	2.835	2.100	2.640	1.823	2.418	1.659	1.830	2.278
Caudal (m ³ /s)	257,8	135,9	224,2	31,3	166,5	98,5	114,4	55,1
Régimen	Pl-nival	Pluvial	Nivo-Pl	Pluvial	Pl-nival	Pluvial	Pluvial	Pluvial

Nota: Pl = pluvial.

La Figura 2.1 muestra el régimen pluvio-nival o nivo-pluvial de las subcuencas cordilleras, presentándose los caudales de mayor magnitud en la temporada invernal (jun-jul), y en la temporada de deshielo (oct-dic). La curva de variación estacional (CVE) con la probabilidad del 5% de excedencia de caudales medios mensuales, indica que las subcuencas UC-1032 y UC-1034 presentan caudales superiores por deshielo (octubre) respecto de las precipitaciones caídas (junio). Las subcuencas restantes indican un marcado régimen pluvial, por lo cual los caudales de mayor magnitud se registran en la temporada invernal (may-jul).

A modo de conocer cuándo, cuál y cómo es el aporte nival de las subcuencas cordilleranas en los caudales medios mensuales, se muestra el Índice de Nieve de Diferencia Normalizada (NDSI, por sus siglas en inglés) en la Figura A.3. El NDSI permite detectar la presencia de nieve dentro de un área específica, es una medida de magnitud relativa de la diferencia de reflectancia entre el visible (verde) y el infrarrojo de onda corta (SWIR).

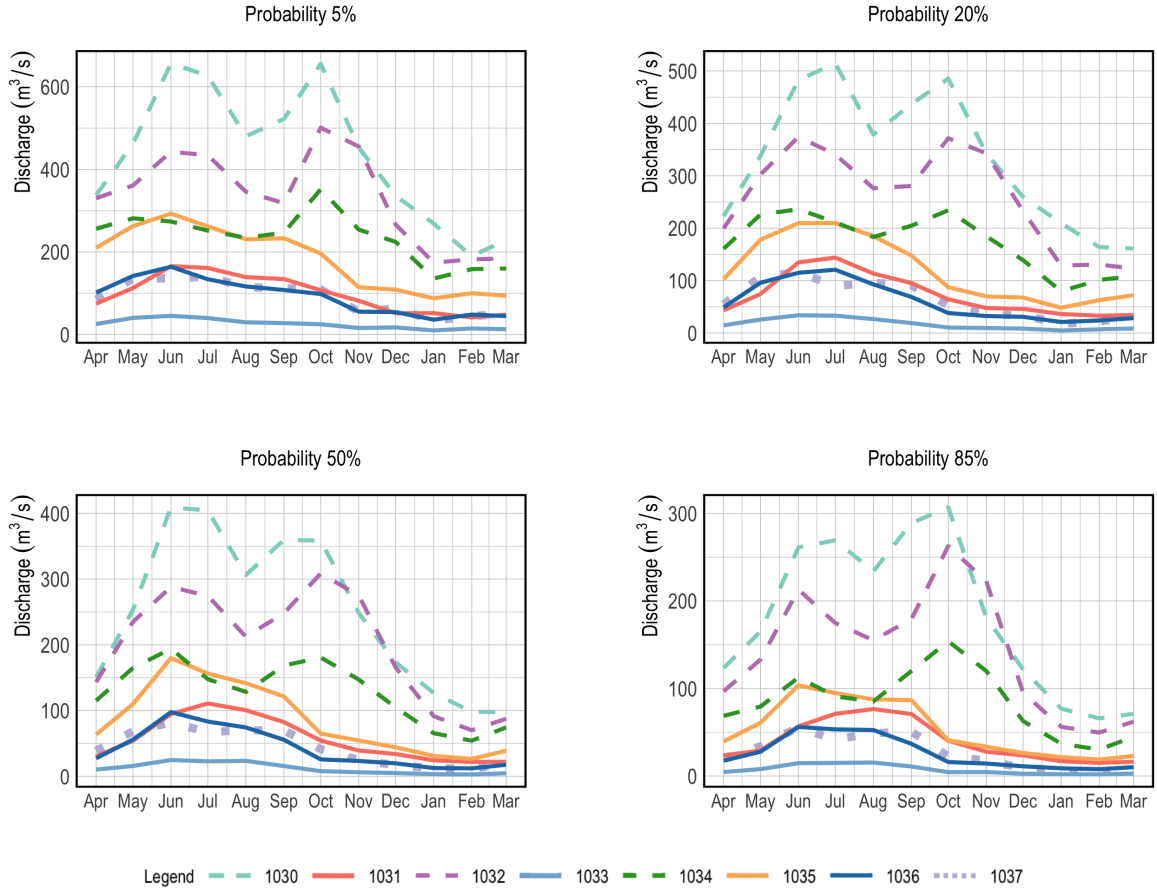


Figura 2.1 Curva de variación estacional de caudales medios mensuales de las subcuencas del río Bueno. Las subcuencas UC-(1030, 1032 y 1034) presentan un régimen pluvio-nival o nivo-pluvial dependiendo de la probabilidad evaluada. Las subcuencas IC-(1031, 1033, 1035, 1036) y DC-1037 muestran un régimen pluvial.

Con base en el análisis satelital, la cuenca del río Bueno presenta su máxima de acumulación nival entre jun-jul (zonas amarillas de la Figura A.3; $NDSI \geq 0,6$). Luego, el manto nival disminuye progresivamente hasta ser casi nulo entre dic-ene.

Por otro lado, la forma que toma la curva de duración de caudales medios (FDC), en la región superior e inferior son de interés para evaluar las características del río y cuenca. Las FDC de las subcuencas del río Bueno (Capítulo 4, apartado 4.1), muestran una curva pronunciada en la región superior ($0 < p_{exc} < 10\%$), lo que indica la presencia de caudales significativos durante cortos períodos de tiempo, causados por precipitaciones extremas. En contraposición, si la curva fuese achatada o plana, se tendría la influencia de las crecidas de deshielo que duran varios días, o posiblemente la regulación del recurso mediante obras hidráulicas como embalses (Singh, 2015).

La forma de la región inferior de la FDC ($p_{exc} > 90\%$) revela la capacidad de almacenamiento en la cuenca, donde una pendiente plana indica una gran capacidad de almacenaje y, una pendiente pronunciada (como la mayoría de las subcuencas) expone una cuenca con

una escasa capacidad de almacenaje. Respecto a la zona intermedia de las curvas, se concluye que los ríos de la cuenca denotan una corriente variable, donde los caudales provienen principalmente de escorrentía directa.

En cuanto a la climatología del lugar, la cuenca del río Bueno se embarga bajo una influencia mediterránea. No obstante, se distingue un clima templado frío lluvioso que comprende el sector cordillerano y, un clima templado cálido lluvioso que afecta el sector intermedio y bajo de la cuenca (DGA, 2004).

2.4. Usos del agua

Los usos del agua en la cuenca del río Bueno son diferenciados según los Derechos de Aprovechamiento de Aguas (DDA), siendo in-situ, extractivo, para la biodiversidad y DDA otorgados a comunidades indígenas (DGA, 2004). Los DDA se constituyen por acto de autoridad o por reconocimiento, tienen carácter de derecho real y permiten al titular su uso, goce y disposición a perpetuidad (Artículo N.º6 del Código de Aguas, última actualización DFL-1122 Ministerio de Justicia (2018)). Los DDA pueden ser de carácter consuntivo y no consuntivo, al igual que poseen características de ejercicio y volumen por unidad de tiempo.

El DDA-consuntivo está orientado al consumo total de las aguas, en cualquier actividad, (e.g., riego, agua potable, ganadería e industria), es decir, el recurso no es devuelto a la fuente de origen, o en el caso de hacerlo, no retorna en la misma forma que su extracción. Por otro lado, el DDA-no consuntivo, permite emplear el agua sin consumirla (e.g., generación hidroeléctrica, navegación y recreación) y obliga a restituirla en la misma calidad, cantidad y oportunidad (DGA, 2018).

La Tabla 2.4 muestra un resumen de los Derechos de Aprovechamiento de Aguas otorgados en la cuenca del río Bueno. De acuerdo con la información publicada en *Derechos de aprovechamiento de aguas registrados en DGA (Consulta DGA, diciembre 2020)*, los DDA no presentan áreas de restricción o prohibición.

Tabla 2.4 Derechos de Aprovechamiento de Aguas asignados en la cuenca del río Bueno. Los DDA-consuntivos consideran la extracción superficial y subterránea y son destinados a actividades para bebida, uso doméstico, saneamiento, riego, silvoagropecuarias, piscicultoras, entre otros usos. Los DDA-no consuntivos se destinan a generación de energía hidroeléctrica y piscicultura.

Uso	Derecho asignado (m ³ /s)
Consuntivo	81,7
Superficial	74,1
Subterráneo	7,6
No consuntivo	1.879,1

Adaptado de: Ministerio de Obras Públicas (MOP, 2018)

2.4.1. Usos in-situ

Los usos in-situ del agua son aquellos donde el recurso es utilizado de forma directa o en las cercanías de la fuente de agua principal (i.e, uso no-consuntivo). En la cuenca del río Bueno las principales actividades son la acuicultura, pesca deportiva/recreativa y generación hidroeléctrica, las cuales se relacionan/influyen en la calidad de las aguas de la cuenca. La primera actividad responde principalmente al desempeño de la piscicultura, encontrándose 18 centros operativos en la cuenca y 17 centros sin operación al momento de realizar el catastro (Proyecto FIPA 2016-19, 2017).

En relación con la generación hidroeléctrica, la cuenca posee un potencial hidroeléctrico de 807,3 MW de acuerdo con la información entregada por el Ministerio de Energía en su página web *Hidroelectricidad Sustentable*. Al año 2015, en la cuenca operaban 20 centrales hidroeléctricas, siendo un 75 % del tipo hidráulicas de pasada y el 25 % restante mini-hidráulicas de pasada (CNE, 2020) (el detalle de cada central puede ser revisado en *Energia Maps*).

2.4.2. Usos extractivos

Cuando el recurso es extraído y/o consumido fuera del lugar de origen se denomina uso extractivo (también conocidos como usos consuntivos). En la cuenca del río Bueno los principales usos extractivos son el riego, consumo de agua potable, y la actividad industrial.

El agua destinada a riego se divide según el tipo del mismo, siendo irrestricto o restringido. El primero indica que el agua es apta para ser utilizada de forma regular en los cultivos agrícolas, praderas naturales y plantaciones forestales. Por el contrario, el riego restringido significa que el recurso debe ser controlado en las distintas etapas de desarrollo que presentan los cultivos. En el estudio del Centro de Energía, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile (UCHile, 2016) se determinó que la superficie cultivada en la cuenca del río Bueno es de 270,84 km²

El uso extractivo referente a la captación de agua potable considera la extracción de agua para las plantas de tratamiento de abastecimiento residencial e industrial. Es importante señalar que un alto porcentaje de la población de la cuenca es abastecida mediante sistemas de Agua Potable Rural (APR), siendo identificados 122 sistemas en funcionamiento al año 2019 (DOH, 2019). El análisis SIG obtenido del Observatorio de la Infraestructura y Gestión del Recurso Hídrico (*Consulta MOP, diciembre 2020*), indica que las subcuencas IC-1031, UC-1032 e IC-1035 son aquellas con la mayor cantidad de APR.

En relación con los servicios sanitarios, la Empresa de Servicios Sanitarios de Los Lagos (ESSAL) es la responsable de la concesión del agua potable y servida en la cuenca del río Bueno, por ende es la responsable de los puntos operacionales mostrados más adelante en la Figura 3.2, donde las zonas señaladas comprenden los sectores de Futrono, La Unión, Lago Ranco, Osorno y Río Bueno.

Nota 1: El 12 de agosto de 2020, la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SiSS) interpuso la multa máxima avalada por la ley (\$1.640.878.080) a la empresa ESSAL por los hechos ocurridos en julio de 2019 –además– distintas comunidades y grupos políticos solicitaron la caducidad de la empresa. El problema surge la madrugada del 11 de julio de 2019 desde la planta Caipulli de ESSAL, donde por error se liberan **≈2.000 litros de hidrocarburos al río Rahue**, mismo cauce que permite el abastecimiento de agua potable a la ciudad de Osorno. Como consecuencia del desastre, aproximadamente 49 mil hogares no tuvieron acceso al agua potable –desde sus propias viviendas– durante once días.

Los cargos formulados en contra de ESSAL y por los cuales se inició un expediente de caducidad para el contrato de concesión, son 1) falta de la obligación de calidad y continuidad del servicio, 2) afectación a los usuarios, 3) poner en riesgo la salud de la población, 4) incumplimiento de las instrucciones y reglamento de la SiSS y 5) falta de transparencia en la información proporcionada a la autoridad y comunidad afectada.

2.5. Calidad de aguas

En el *Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad: cuenca del río Bueno* (DGA, 2004), se concluye que la calidad de agua superficial es *buena*, basado en las clases de calidad (excepcional, 1, 2, 3, 4)³.

En el mismo informe, se indica que los cursos de agua son abundantes en cobre (Cu), cromo (Cr), hierro (Fe), y aluminio (Al)⁴. La presencia de los parámetros se debe principalmente a la geología y edafología propia de la cuenca. Por último, se señala que las altas precipitaciones y gran cobertura vegetal, infieren positivamente en la calidad del agua de los ríos (DGA, 2004).

Si bien el documento postula que la cuenca presenta una *buena* calidad de agua superficial, se señalan los factores naturales y antropogénicos que alteran dicha calidad. La lixiviación subterránea de formaciones geológicas, y aportes de aguas subterráneas son los principales factores naturales incidentes en la calidad de agua superficial. Con relación a los factores antropogénicos, prima la contaminación difusa, proveniente de actividades agrícolas (plaguicidas y fertilizantes), ganaderas y aguas servidas. También existe contaminación por la descarga de RILES, en a lo menos cuatro puntos de control de la cuenca, las descargas se registran en las estaciones de calidad: río Bueno en Trumao, río Damas en Tacamo, río Negro en Chahuilco, y río Rahue en Forrahue (la ubicación de las estaciones y otros detalles, pueden ser consultados más adelante en el Capítulo 3, apartado 3.1).

Posteriormente, Oporto y Ecodesa (2013), realizaron una evaluación general de la calidad de las aguas de la cuenca del río Bueno, analizando el riesgo de eutrofización de los cuerpos lacustres. El informe indica que el Lago Ranco posee un estado oligotrófico ($P < 0,01$ mg/L,

³La clase excepcional representa una calidad del agua muy buena o excelente. Luego, la calidad disminuye hasta la clase 4, que representa una mala calidad del agua. Más detalles en el informe final P-1940 (DGA, 2003)

⁴Los nombres y definiciones de parámetros químicos pueden ser consultados en el Glosario del presente documento.

transparencia >10 m), donde la carga externa (fuentes puntuales y difusas) alcanza valores de 160 ton P y 718 ton N anuales. Además, se indica que la cuenca posee una *buena calidad del agua*, con ríos que presentan un pH de 7,0 a 7,4 y conductividades específicas bajas (Oporto y Ecodesa, 2013).

No obstante, Zelada (2017) indica que hay un avance hacia la mesotrofia en los cuerpos lacustres, atribuible (principalmente) a las descargas de pisciculturas y otras fuentes (e.g., descargas de plantas de tratamiento).

2.6. Eventos extremos

Los eventos extremos suelen asociarse a desastres naturales capaces de afectar a los asentamientos humanos debido a la existencia de condiciones de riesgo. Para que esto ocurra, son necesarios tres factores mutuamente condicionantes: 1) ocurrencia y/o probabilidad de la amenaza de un agente natural detonante (e.g., lluvias extremas, olas de frío o calor, sequías, entre otros), 2) presencia de un asentamiento humano, por tanto, exposición de población e infraestructura y, 3) susceptibilidad de los asentamientos humanos a verse afectados por un evento extremo, conocido como vulnerabilidad.

2.6.1. Inundaciones

La cuenca del río Bueno debido a su ubicación geográfica y características fisiográficas, se encuentra expuesta a desastres naturales, principalmente de origen hidrometeorológico. La Tabla 2.5 muestra el resumen histórico 2002-2015 y las principales consecuencias de los eventos de precipitaciones extremas en las subcuencas del río Bueno.

La fecha de los eventos es parte de la información digital de los periódicos locales de la zona, tales como *DiarioFutrono.cl*, *DiarioLaUnion.cl*, y *rionlinea.cl*. Los reportes señalan las comunas afectadas y las principales consecuencias en los asentamientos humanos. Luego, la información es complementada con el reporte de los *Principales desastres ocurridos desde 1980 en Chile* (SERNAGEOMIN, 2017), el que registra los desastres principales expuestos en la Tabla 2.5.

En términos de frecuencia, en el informe *Recopilación histórica y representación espacial de eventos asociados a problemas de exceso hídrico: inundaciones, aluviones y tsunamis* (Eridanus, 2018), se indica un total de 13 inundaciones para el siglo XX en las regiones de Los Ríos y Los Lagos (6 y 7 eventos, respectivamente). En contraste, las dos primeras décadas del siglo XXI registran un total de 27 eventos para las mismas regiones (12 y 15 eventos, respectivamente).

Con relación a la magnitud de los eventos de precipitaciones extremas, SERNAGEOMIN (2017) determina el(los) desastre(s) principal(es) de acuerdo con las consecuencias geológicas de los eventos (e.g., avalanchas, deslizamientos, desprendimientos, flujos, remociones, entre otros). Para ello, consideran los montos invertidos por el fisco para la reconstrucción de las obras dañadas (carreteras, puentes, calles, viviendas, etc.) y la cuantificación de pérdidas de vidas humanas.

Tabla 2.5 Resumen de registros históricos de inundaciones. El(los) desastre(s) principal(es) de cada evento se identifica(n) de acuerdo con la siguiente numeración: (1) corte de carreteras, (2) deslizamiento de suelo y roca, (3) desprendimiento de laderas, (4) flujo de detritos, y (5) remociones en masa por lluvias. En caso de presentarse la información sobre anegamientos de calles y/o viviendas, colapso de la red de colectores de aguas lluvias o problemas de diversa índole provenientes de las intensas lluvias en zonas urbanas, se marca con una *X* la casilla anegamiento o se indica *sin información* (s.i.).

Fecha (DD/MM/YY)	Subcuencas afectadas	Desastre principal*	Anegamiento**
09/08/02	1030, 1031, 1034, 1035, y 1037	(3)	s.i.
28/08/04	1030 y 1031	(1,5)	s.i.
26-28/05/05	1030, 1031, y 1037	(4)	s.i.
12/08/07	1032, 1033, 1034, 1035, y 1036	(1,5)	s.i.
30/08-01/09/08	1030 a 1037	(5)	X
04-06/09/13	1032, 1033, 1034, 1035, y 1036	(2)	X
01-09(18)/06/14	1030 a 1037	(2,5)	X
04-06/08/14	1034, 1035, y 1037	(5)	X
16-17/05/15	1030, 1032, 1035, y 1037	(2)	X
05-07/07/15	1030, 1031, 1034, 1035, 1036, y 1037	(2)	X
16-18/07/15	1030 a 1037	(2)	X

* Fuente principal: Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN, 2017).

** Fuente principal: periódicos locales digitales.

Dado que los eventos señalados en la Tabla 2.5 pueden o no representar la pérdida de vidas humanas, resulta inadecuado indicar qué evento fue superior. Sin embargo, a modo de reflejar las consecuencias de los eventos de precipitación extrema en la cuenca, se presenta de forma detallada el evento de junio 2014. El temporal de carácter nacional con consecuencias adversas registradas desde la región de Coquimbo hasta Aysén, comenzó con intensas lluvias y fuertes vientos la noche del 27 de mayo en las regiones del Biobío y La Araucanía, para luego expandirse en territorio desde el 29 de mayo hasta el 18 de junio.

En la cuenca del río Bueno (regiones de Los Ríos y Los Lagos), el 1 de junio se registran cortes de electricidad parciales y la ruta de Frutillar Bajo con Llanquihue se mantuvo cortada. El 2 de junio se desborda el río Forrahue (Río Negro), río Aromo (Purranque) y río Paullín (Puerto Octay), registrándose inundaciones de viviendas e incomunicación de sectores habitacionales, la municipalidad de Puerto Montt indica suspensión de clases (indefinidas); el mismo día en Frutillar y en San Juan de La Costa se registran desprendimientos de tierra, y en Llanquihue se cierra el acceso sur producto del desborde de un canal. El 3 de junio se registran cortes de energía eléctrica en La Unión y Río Bueno, el río Negro mantiene un elevado caudal provocando desastres en algunas viviendas, lo que se mantiene al 4 de junio donde se inician las labores de evacuación producto del número de viviendas anegadas en diversas poblaciones. El 7 de junio por el aumento de caudal del río Bueno es cerrada la balsa que une Puerto Nuevo (La Unión) con Puerto Lapi (Lago Ranco). El 9 de junio se declara Estado de Catástrofe en toda la provincia de Llanquihue.

Las principales comunas afectadas en la cuenca fueron Osorno y Río Negro. El 2 de junio en la ciudad de Osorno se cierran cruces y caminos por las intensas lluvias y desprendimientos

de laderas, situación que se mantuvo en los días siguientes. El 3 de junio se suspenden clases y se registra el desborde del río Rahue. El 4 de junio se desborda el río Damas y es cerrado indefinidamente el puente Rahue (debido al alto caudal del río). Por otro lado, en la comuna de Río Negro el 2 de junio se desborda el río Forrahue, como consecuencia más de 527 viviendas inundadas (>2.500 personas damnificadas, evacuadas y/o afectadas por el siniestro). El 4 de junio inician las labores de desinfección y evacuación, las últimas continúan hasta el 12 de junio, cuando se presenta el desborde del río Negro en Chahuilco.

Las intensas lluvias caídas —principalmente— del 1 al 4 de junio trajeron consigo catastróficas consecuencias en toda la cuenca, las que en mayor o menor grado también fueron registradas en los eventos de los años 2008, 2013 y 2015.

Cabe señalar y recalcar que la información de la presente sección es fidedigna a los acontecimientos registrados por la prensa local y reportes nacionales. No se descarta la posibilidad de que existan más eventos de precipitación extrema durante 1985/2015, los que pueden no haber sido documentados por la falta de conectividad de las comunidades, sucesos de mayor relevancia, entre otros factores locales.

2.6.2. Sequías

Los fenómenos de sequías no suelen presentarse en la cuenca del río Bueno. Los registros históricos datan dos eventos de sequías con duraciones de diez meses (noviembre/1998 a agosto/1999) y seis meses (octubre/2007 a marzo/2008), —referidos como *eventos registrados* (**R**) a lo largo de este documento. Ambos eventos fueron de carácter nacional, con graves consecuencias en la zona central del país y, en menor grado, en la cuenca del río Bueno (Arrese Luco, 2008; Meza *et al.*, 2010; Sarricolea y Meseguer-Ruiz, 2015).

La sequía de 1998/1999 afectó la zona centro-sur de Chile, donde la principal repercusión fue la crisis en la generación de energía eléctrica. Durante la temporada estival del año hidrológico 1997, el fenómeno de El Niño azotó la costa Pacífico de Sudamérica, causando inundaciones en la zona centro y sur —seguido por un episodio de La Niña (1998). Los estudios de Arrese Luco (2008) y Sarricolea y Meseguer-Ruiz (2015) indican que La Niña no fue el factor detonante de la sequía, pero sí contribuyó y acrecentó los efectos adversos.

Posteriormente, en octubre de 2007 hasta marzo de 2008, Chile enfrentó una sequía de origen meteorológico, con consecuencias agrícolas e hidrológicas. Desde la región de Atacama hasta la región de Los Lagos se presentaron los efectos de la sequía, estimándose que más de 80 mil agricultores fueron afectados por el fenómeno climático (Meza *et al.*, 2010).

La cuenca del río Bueno, al encontrarse ubicada en la zona sur del país, carece de estudios sobre fenómenos extremos de sequías. Sin embargo, en la actualidad la cuenca ha visto comprometidos los recursos hídricos para la agricultura y uso/consumo de agua potable. El principal problema es la disminución de precipitaciones medias anuales, que afecta el sistema hidrológico completo. La Sociedad Agrícola y Ganadera de Osorno en el año 2015, solicitó la declaración oficial de una emergencia hídrica, debido a que la falta de lluvia provocó pérdidas ganaderas y bajas en la producción agrícola del sector.

Sin embargo, los efectos adversos no tan solo se registran en la hidrología de la cuenca, también la construcción y/o funcionamiento de obras hidráulicas críticas, como por ejemplo los Sistemas de Agua Potable Rural (APR). Al año 2018, las comunas de Osorno, San Juan de la Costa, Río Negro, San Pablo, Purranque, Fresia y Llanquihue sufrieron las consecuencias de la sequía, enfrentándose a problemas en pozos con insuficiente recurso hídrico para el funcionamiento de sistemas de APR.

Si bien las sequías son desastres naturales, estas no responden netamente a alteraciones hidrometeorológicas, sino que también a causas antrópicas (Oppliger *et al.*, 2019), como el cambio en el uso del suelo, aumentos en los niveles de impermeabilidad, y extracción del recurso para actividades agronómicas, industriales o de sanitización.

Capítulo 3

Datos & Métodos

La presente investigación sigue el diagrama de flujo expuesto en la Figura 3.1. Primero se estudian los eventos extremos —inundaciones y sequías— en dos ventanas temporales de treinta años, 1985/2015 y 2030/2060. Se aplican cuatro modelos climáticos globales, forzados bajo el escenario RCP 8.5, con distintas sensibilidades climáticas, tal como es expuesto en la sección 3.2.1 del presente capítulo.

Se aplican indicadores e índices hidroclimáticos. Los primeros se diferencian de los segundos por sus unidades m^3/s , mm , o días. Los segundos son valores adimensionales que han sido transformados a una escala común, con el objetivo de evaluar las condiciones de humedad que rigen a una cuenca.

Luego, se estudia la relación de eventos extremos y la calidad del agua, mediante el diseño y construcción de un modelo hidro-estadístico denominado HachM. Para ello, se calculan dos índices de calidad de agua, dependientes de parámetros químicos. Cada índice se enfoca en un uso particular del recurso, siendo el uso agrícola y la potabilización para el uso/consumo de agua potable.

Se debe entender que HachM no es un modelo que proyecta o predice los parámetros químicos que definen la calidad del agua, HachM es un modelo que utiliza índices hidroclimáticos para la representación de índices de calidad del agua.

En los siguientes acápite se describen las observaciones y datos disponibles de la línea base, el modelo hidrológico utilizado para generar los caudales en el período histórico y futuro, los indicadores e índices hidroclimáticos propuestos para la evaluación de eventos extremos y se sientan las bases para la construcción del modelo hidro-estadístico HachM.

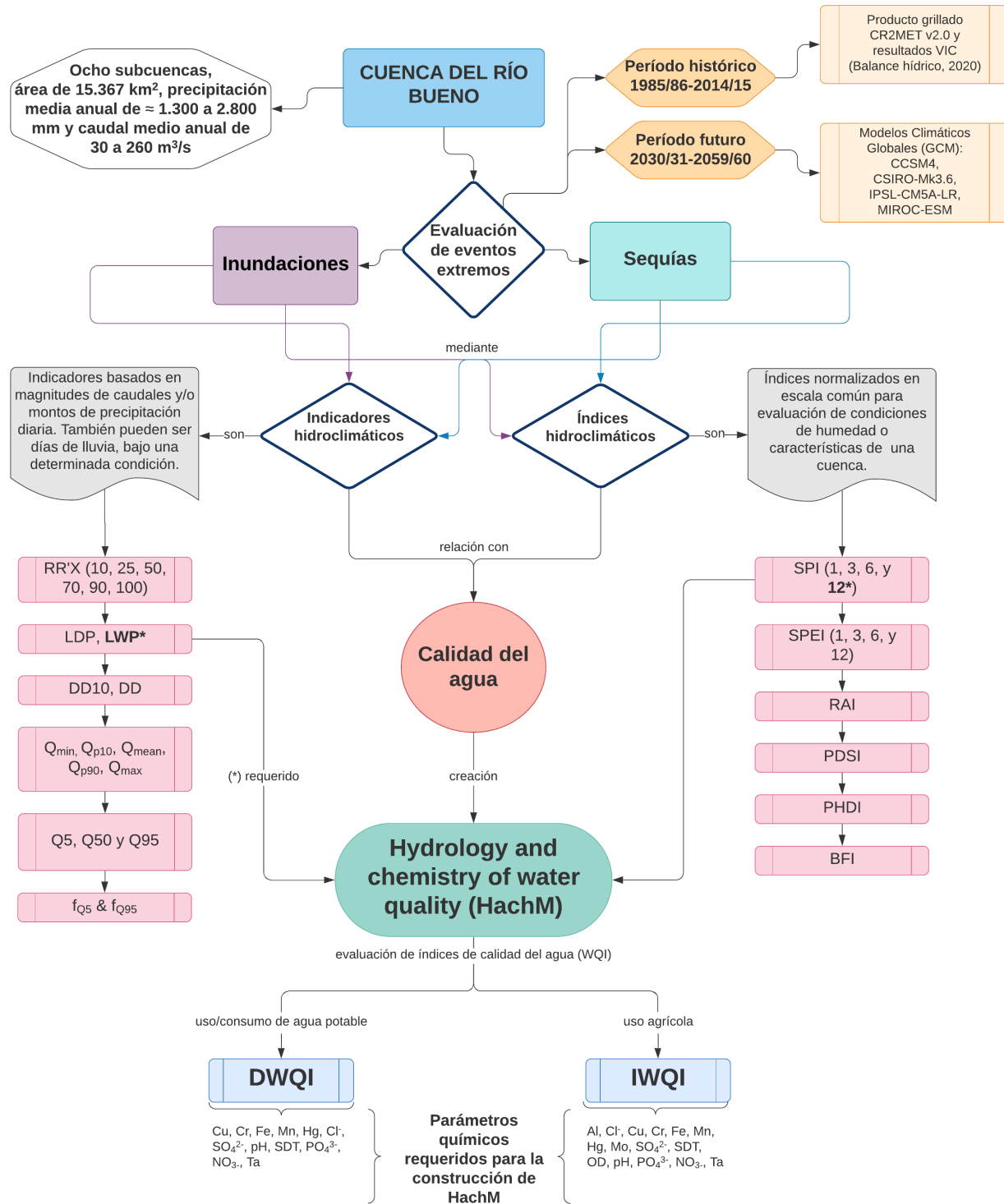


Figura 3.1 Diagrama metodológico para evaluación de eventos extremos y calidad del agua.

3.1. Datos disponibles

A continuación, se describen las fuentes de información de la cuenca del río bueno, las que corresponden a la red hidrométrica nacional, operada y desarrollada por la Dirección General de Aguas (DGA), y el producto grillado CR2MET v2.0 creado y distribuido por Centro de Ciencia del Clima y Resiliencia (CR(2)) para el territorio de Chile continental.

3.1.1. Red hidrométrica nacional

El Servicio Hidrométrico Nacional permite obtener información relevante para el conocimiento del recurso hídrico en las distintas localidades de Chile. La DGA es el ente encargado de desarrollar y operar el servicio, contando con una vasta red de estaciones meteorológicas, fluviométricas, de calidad de aguas, sedimentométricas, niveles de pozos, monitoreo de niveles de lagos y embalses.

La cuenca del río Bueno cuenta con una concentrada red de monitoreo en el sector intermedio de la cuenca (Figura 3.2). La subcuenca IC-1036 (Osorno) y la conjunción de las subcuencas IC-1031 y UC-1032 (La Unión, Río Bueno y San Pablo), se destacan por la densidad de estaciones fluviométricas y obras de infraestructura sanitaria. Respecto a la cantidad y ubicación geográfica de estaciones meteorológicas, se presentan seis estaciones ubicadas en las zonas de alta montaña y cuatro comprendidas entre la zona intermedia y costera (más detalles en Apéndice A, sección A.2).

Por otro lado, la red de monitoreo de calidad de agua opera de forma esporádica durante el año, reportando los parámetros de calidad, en promedio, cuatro veces al año (una medición por cada temporada (otoño, invierno, primavera y verano)).

Las estaciones de calidad (Tabla A.3) miden y registran parámetros fundamentales de la calidad del agua. Entre ellos, la temperatura del agua (T_a), pH, oxígeno disuelto (OD), y otros analizados en laboratorio como aluminio (Al), arsénico (As), boro (B), cadmio (Cd), calcio (Ca), cloruro (Cl⁻), cobre (Cu), cromo (Cr), demanda química de oxígeno (DQO), fósforo (P), hierro (Fe), mercurio (Hg), nitrógeno (N), selenio (Se), sulfato (SO_4^{2-}), zinc (Zn), entre otros (DGA, 2016).

Para efectos del análisis y modelación de calidad de aguas, se seleccionan las estaciones ubicadas en el punto de salida de cada subcuenca o aquellas con la proximidad más cercana al punto indicado. Además, deben pertenecer a la red hidrográfica principal de la cuenca. Las estaciones G_i (ver Tabla A.3) seleccionadas de acuerdo con el río a evaluar son:

- Río Bueno: **G3** (UC-1030), **G4** (IC-1031) y **G8**: (IC-1033).
- Río Pilmaiquén (afluente del r. Bueno): **G6** (UC-1032).
- Río Rahue (afluente del r. Bueno): **G11** (UC-1034) y **G16** (IC-1036).
- Río Negro (afluente del r. Rahue): **G12** (IC-1035).

3.1.2. Producto grillado CR2MET

En el dominio de estudio, la distribución de la red hidrométrica no es uniforme, por lo cual no se cuenta con la misma densidad de datos de meteorología y fluviometría en las distintas

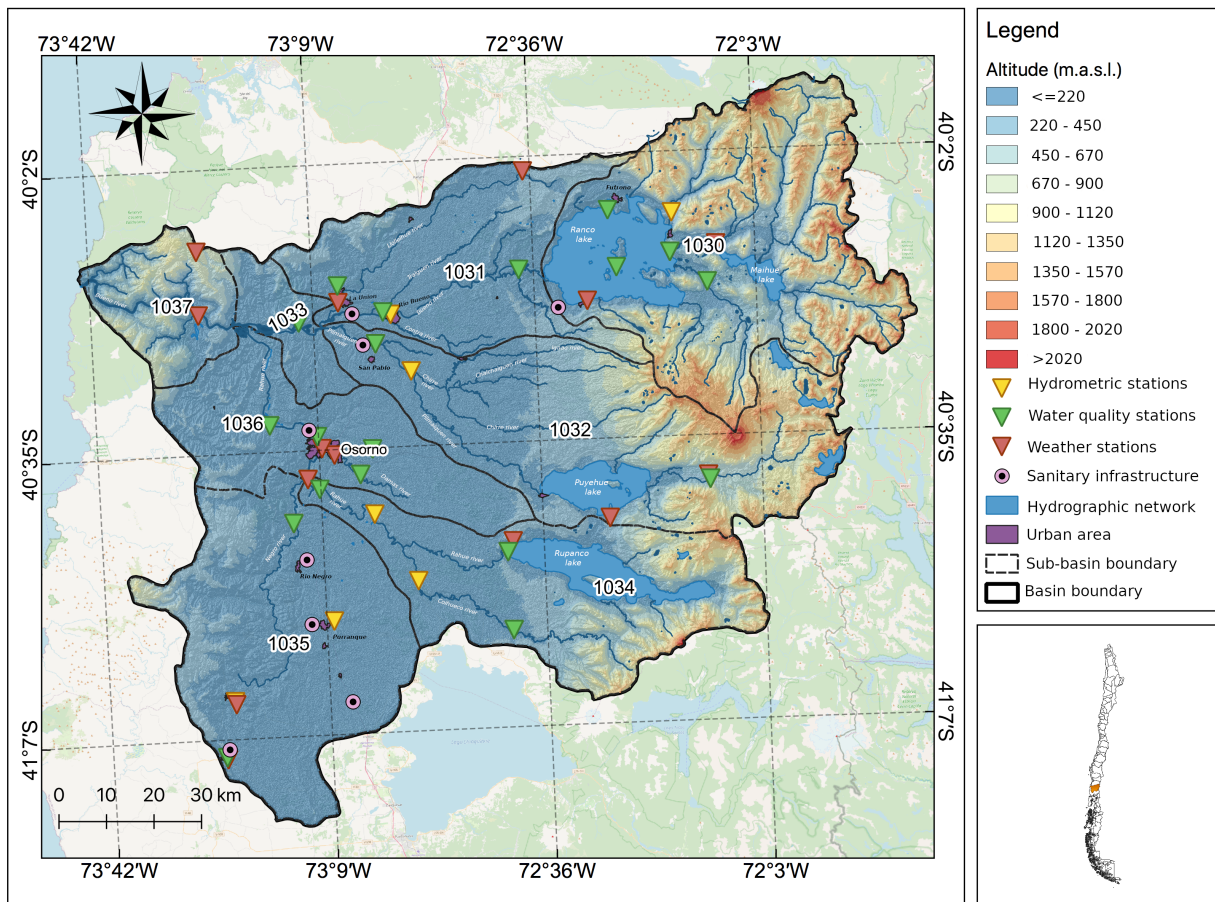


Figura 3.2 Ubicación geográfica y red hidrométrica de la cuenca del río Bueno. Subcuenas: afluentes del Lago Ranco (UC-1030), río Bueno entre Lago Ranco y río Pilmaiquén (IC-1031), río Pilmaiquén (UC-1032), río Bueno entre río Pilmaiquén y río Rahue (IC-1033), río Rahue antes de junta con río Negro (UC-1034), río Negro (IC-1035), río Rahue bajo (IC-1036) y río Bueno bajo (DC-1037). Además, el mapa contiene la información de estaciones fluviométricas (amarillo), meteorológicas (rojo) y de calidad del agua (verde), y se geolocalizan los puntos operacionales de ESSAL.

subcuenas. Además, el registro de mediciones es insuficiente para el período de estudio 1985/2015. En consecuencia, se utiliza el producto grillado CR2MET versión 2.0 (disponible en www.cr2.cl), el cual contiene información de precipitación, temperaturas extremas en una grilla rectangular de 0,05° latitud-longitud para el territorio de Chile continental.

Los datos del producto grillado comprenden el período histórico 1979-2018, por lo cual son aptos para el desarrollo del estudio. El producto de precipitación fue construido a partir del reanálisis atmosférico ERA5 (*pág. web ECMWF*), mediante la utilización de modelos estadísticos y características de la topografía local (DGA, 2019). De igual forma, se construyó el producto grillado de temperaturas extremas, el que considera de forma adicional los datos de temperatura superficial de productos MODIS LST (Hulley *et al.*, 2016). En resumen, se extrae **una serie temporal** de precipitación y temperaturas desde el producto grillado CR2MET v2.0 para cada subcuenca del río Bueno.

3.2. Métodos

En la presente sección, se describen, detallan, y ejemplifican los métodos y modelos empleados en el desarrollo de la investigación. Primero, se identifican los modelos climáticos globales (GCM), utilizados en el análisis de proyecciones climáticas 2030/2060. Luego, se presenta el modelo *Variable Infiltration Capacity* (VIC), usado en las simulaciones de caudales, 1985/2015 y 2030/2060.

Posteriormente, se exponen y explican los indicadores e índices hidroclimáticos, se muestran los métodos de cálculo para el Índice de Calidad de agua (WQI), y se presentan los criterios de evaluación del modelo de calidad de aguas, desarrollado en el Capítulo 4, Acápite 4.4.

3.2.1. Escenarios de cambio climático

Las perturbaciones en los sistemas naturales del clima generan preocupación en el mundo científico debido al comportamiento que han presentado las variables atmosféricas, físicas, y dinámicas que controlan nuestro planeta. El proyecto CMIP5 (*Coupled Model Intercomparison Phase 5*) engloba las pautas necesarias para estudiar la interacción entre el océano y atmósfera. En primer lugar, se estudia la relación entre distintos estados del clima y su respuesta frente a los ciclos de carbono. La modelación climatológica puede basarse en alguna de las cuatro Trayectorias de Concentración Representativas (RCP, por sus siglas en inglés), definidas por el IPCC, siendo cada trayectoria un posible desarrollo de emisión en función del forzamiento radiativo aplicado (van Vuuren *et al.*, 2011; Chou *et al.*, 2014) (ver diagrama de Figura 3.3). En segundo lugar, el proyecto evalúa la capacidad que presenta cada GCM en la predicción del clima a distintas escalas temporales.

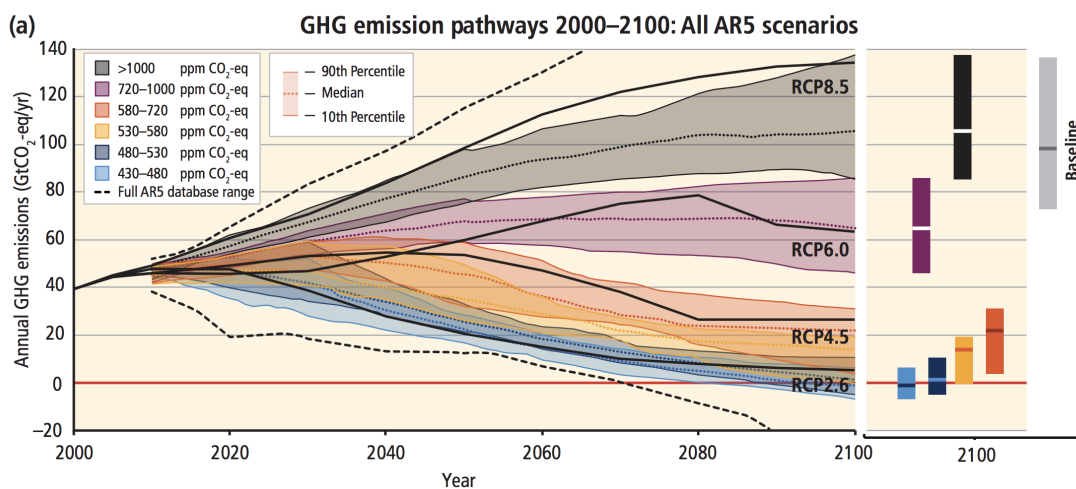


Figura 3.3 Emisiones globales de gases de efecto invernadero (GEI). Gigatonelada de CO₂-equivalente por año (GtCO₂-eq/año) en los escenarios de referencia y de mitigación para distintos niveles de concentración a largo plazo. Fuente: Jarraud y Steiner (2012).

3.2.1.1. Modelos Climáticos Globales (GCM)

El planeta tierra es un sistema altamente complejo que consta de cinco elementos principales: atmósfera, hidrósfera, criósfera, litósfera y biósfera y las continuas interacciones entre ellas. Los Modelos Climáticos Globales (también conocidos como Modelos de Circulación General), buscan representar los patrones climáticos de la Tierra mediante la resolución de ecuaciones matemáticas que describen los procesos atmosféricos, físicos y químicos. Para que esto ocurra, los GCM son acoplados a los RCP. De esta forma, se realizan proyecciones climáticas capaces de representar la dinámica interna de la tierra, además de forzamientos externos, como aumentos en el nivel del mar, cambios en la temperatura, erupciones volcánicas, fenómenos extremos, entre otros y forzamientos antropogénicos relacionados con los cambios en el uso de suelo, como también la composición de la atmósfera.

3.2.1.2. Selección de GCM

Las proyecciones climáticas se realizan bajo el escenario RCP 8.5, acopladas a un subconjunto de cuatro GCM. La selección de los modelos se basa en la serie de criterios publicados en DGA (2017), que consideran una alta correlación de las simulaciones históricas con las oscilaciones ENSO (zona sur) y SAM (zona austral). La Tabla 3.1 muestra las principales características de los GCM seleccionados.

Tabla 3.1 Selección de Modelos Climáticos Globales

Id	Nombre modelo	Sensibilidad	Fuente
C3.6	CSIRO-Mk3.6	Baja extrema	Collier <i>et al.</i> (2011)
C4	CCSM4	Baja moderada	Danabasoglu <i>et al.</i> (2012)
ME	MIROC-ESM	Alta moderada	Watanabe <i>et al.</i> (2011)
IC5	IPSL-CM5A-LR	Alta extrema	Dufresne <i>et al.</i> (2013)

3.2.1.3. Acuerdo entre modelos climáticos

Para determinar el acuerdo de los GCM, se calcula la variación fraccional entre la proyección y la línea base (expresión 3.1). Luego, el factor de acuerdo de los GCM por subcuena (expresión 3.2). Y finalmente, el acuerdo con la ecuación 3.3.

El acuerdo de los GCM puede ser: (1) negativo absoluto, (2) negativo intermedio, (3) neutro, (4) positivo intermedio, y (5) positivo absoluto. Un acuerdo negativo absoluto indica que los cuatro modelos climáticos proyectan condiciones de humedad menores a las registradas en el período histórico (i.e., el factor de acuerdo $f_{C4, C3.6, IC5, ME}^{BNA} = -1,0$). Un acuerdo negativo intermedio indica que tres de cuatro GCM presentan $f_{GCM}^{BNA} = -1,0$. Un acuerdo neutro, señala que dos modelos proyectan aumentos en las condiciones de humedad y los dos restantes proyectan descensos. Respecto a los acuerdos positivos, es el inverso de los negativos.

$$\Delta f_{index}^{BNA_j} = \frac{GCM^{Fut} - GCM^{Hist}}{GCM^{Hist}} \quad (3.1)$$

$$f_{GCM_i}^{BNA_j} = \begin{cases} 1,0 & \text{si } f_{index}^{BNA_j} > 1 \\ -1,0 & \sim \end{cases} \quad (3.2)$$

$$f_{Aagree.}^{BNA_j} = \frac{1}{4} \cdot \sum f_{GCM_i}^{BNA_j} \quad (3.3)$$

donde, i son los modelos C4, C3.6, IC5, y ME; j las subcuencas del río Bueno, f_{index}^{BNA} es el factor de cambio denotado por la razón entre la proyección y línea base de cada GCM, y, $f_{Aagree.}^{BNA}$ el acuerdo de los GCM.

3.2.2. Modelo hidrológico: *Variable Infiltration Capacity* (VIC)

El modelo hidrológico *Variable Infiltration Capacity* (VIC; Liang *et al.* (1994)) es un modelo distribuido de base física capaz de representar, en cada celda del sistema, procesos tales como evaporación (E), evapotranspiración (E_t), infiltración (i), variaciones de humedad en las capas de suelo, acumulación y derretimiento de nieve, escorrentía superficial (R) y el flujo base (B) (ver Apéndice B para más detalles del modelo).

Los caudales utilizados en el presente estudio fueron simulados por el modelo VIC, el cual fue configurado con archivos de entrada del producto grillado CR2MET v2.0 y las forzantes meteorológicas de los GCM seleccionados. Además, se ingresaron características del suelo propias de la cuenca.

3.2.3. Indicadores hidroclimáticos

Los indicadores hidroclimáticos se definen en función de variables hidroclimáticas, tales como precipitación, temperatura y caudal. La cuenca del río Bueno se caracteriza por poseer altas tasas de precipitación media anual (DGA, 2016), donde los peaks de precipitación se concentran en la temporada invernal, revelando el régimen mayormente pluvial de la zona de estudio.

Considerando el punto anterior, se calculan los días lluviosos: RR'X (X = 10, 25, 50, 70, 90, y 100), el período seco/húmedo más largo: LYP (Y = D o W), y los días secos: DD y DD10 de la Tabla C.1. Los indicadores se basan en el cumplimiento de una determinada condición de precipitación, registrándose la cantidad de días en el año donde se presenta dicha condición (Aguilar *et al.*, 2005; Bedia-Jiménez, 2019; Bhatti *et al.*, 2020). Por ejemplo, RR10 es la cantidad de días lluviosos clasificados en un **rango de precipitación** de 10 a 25 mm, el LDP es la duración máxima de los **días consecutivos** con precipitación menor a 1 mm y, el DD representa el **total de días** en el año con precipitación menor a 1 mm.

Luego, se estudian las magnitudes de los caudales anuales provenientes de la transformación de la precipitación en escorrentía. Para ello, se calcula el caudal mínimo (Q_{min}), el asociado al percentil 10 (Q_{p10}), el medio (Q_{mean}), el asociado al percentil 90 (Q_{p90}) y el máximo (Q_{max}) de la serie de caudales medios anuales y, los caudales asociados a probabilidades de excedencia del 5% (Q_5), 50% (Q_{50}) y 95% (Q_{95}) de la curva de duración de caudales medios diarios (Tabla C.2) (Gustard *et al.*, 1992; Singh, 2015; Alvarez-Garreton *et al.*, 2018).

3.2.4. Índices hidroclimáticos

La presente sección da a conocer las principales características de los índices hidroclimáticos utilizados en el estudio de inundaciones y sequías. Más detalles pueden ser consultados en el Apéndice C, sección C.2.

La mayoría de los índices descritos a continuación han sido construidos para la cuantificación exclusiva de sequías (e.g., McKee *et al.* (1993); Van-rooy (1965); Palmer (1965)). No obstante, los índices permiten evaluar condiciones extremas secas como también condiciones extremas húmedas. Por consiguiente, son considerados en el estudio de inundaciones bajo las consideraciones indicadas caso a caso.

3.2.4.1. Índice de Precipitación Estandarizado (SPI)

El Índice de Precipitación Estandarizado (SPI; McKee *et al.* (1993)), permite cuantificar el déficit y el superávit de precipitaciones en diferentes escalas de tiempo, reflejando los impactos y anomalías de las sequías y/o humedades en exceso en una determinada zona.

Usualmente, el SPI es utilizado para el estudio de sequías meteorológicas, siendo cuantificadas las desviaciones estandarizadas de las anomalías relativas a la precipitación media en alguna escala de tiempo aplicada. Por esta razón, también se utiliza para evaluar las inundaciones. Seiler *et al.* (2002) aplicaron el SPI para evaluar el posible riesgo de inundaciones en el sur de Córdoba (provincia de Argentina), donde concluyeron que el índice era capaz de explicar el desarrollo de las condiciones que generaron las tres inundaciones analizadas.

McKee *et al.* (1993) indicó que un $SPI = -1,0$ representa el comienzo de la sequía moderada y termina cuando el SPI se torna positivo, basado en ello, el presente estudio aplica la condición opuesta al comienzo de una inundación, es decir $SPI \geq 1,0$. La clasificación de las condiciones de humedad se presentan en la Tabla C.3.

Otra de las características relevantes del índice, es la escala temporal en la cual es calculado (Ortiz-Gómez *et al.*, 2018). La escala de tiempo mensual (SPI-1) es relevante para determinar sequías meteorológicas e incipientes sequías agrícolas, mientras que una escala trimestral (SPI-3) permite evaluar el comportamiento estacional de la precipitación, reflejando las condiciones de humedad a corto y mediano plazo. Luego, la escala semestral (SPI-6) estima la precipitación en el mediano plazo, la cual puede estar asociada con niveles en embalses y caudales anómalos. La escala anual (SPI-12) o superior revela los patrones de precipitación en el largo plazo relacionados con los niveles de los caudales de ríos, embalses y acuíferos, permitiendo identificar la sequía hidrológica.

3.2.4.2. Índice de Precipitación-Evapotranspiración Estandarizado (SPEI)

Basado en el Índice de Precipitación Estandarizado, el SPEI se crea para tener en cuenta la evapotranspiración potencial (PET) en la determinación de la sequía, a diferencia del SPI, el SPEI capta el principal impacto del aumento de las temperaturas en la demanda de agua (Vicente-Serrano, 2015).

El índice se determina de forma similar al SPI, siendo distinguidos por el *input* requerido, mientras que el SPI únicamente necesita la precipitación, el SPEI emplea la diferencia entre

la precipitación y evapotranspiración, conocido como *balance hídrico climático* (Beguería *et al.*, 2014). Para más detalles del índice revisar Vicente-Serrano *et al.* (2010a,b, 2011a,b, 2012), aquí, se presenta la completa teoría detrás del SPEI.

La clasificación de humedad del índice no difiere del SPI (i.e., Tabla C.3). El SPEI se enfoca en el monitoreo y cuantificación de los efectos de sequías en los sistemas agrícolas (Potop *et al.*, 2012) e hidrológicos (Lorenzo-Lacruz *et al.*, 2010; Wolf *et al.*, 2012). Además, ha sido utilizado en estudios de cambio climático (Wolf y Abatzoglou, 2011; Yu *et al.*, 2014).

3.2.4.3. Índice de Anomalía de Lluvia (RAI)

El Índice de Anomalía de Lluvia (RAI; Van-rooy (1965)) es una variante del SPI, utiliza los valores de precipitación media mensual de un determinado lugar, y su uso permite cuantificar los efectos de las sequías en la agricultura y recursos hídricos.

La clasificación del índice va desde extremadamente seco a extremadamente húmedo según Van-rooy (1965) (Tabla C.4). En este estudio, el comienzo de una sequía quedará determinado cuando el valor de RAI sea menor o igual umbral $-2,0$. En tanto, una posible inundación se define cuando el valor supere el umbral $2,0$.

3.2.4.4. Índice de Sequía (Hidrológica) Severo de Palmer (PDSI & PHDI)

El Índice de Sequía Severo de Palmer (PDSI) es un índice utilizado principalmente para evaluar las sequías meteorológicas. Palmer (1965) define una sequía como *un intervalo de tiempo, generalmente de meses o años, durante el cual el suministro de humedad real en un determinado lugar se encuentra constantemente por debajo del suministro de humedad apropiado para el clima.*

El Índice de Sequía Hidrológica de Palmer (PHDI), es una variación del PDSI. Evalúa los efectos de las sequías en el largo plazo que afectarán los almacenamientos de agua, las recargas subterráneas y la magnitud de caudales en ríos, lagos y esteros. El índice permite calcular el término de una sequía basándose en la precipitación necesaria, utilizando una relación entre la humedad recibida y la humedad requerida para terminar la sequía.

Ambos índices tienen una connotación para el estudio de sequías, donde las condiciones de extrema sequedad quedan representadas por los valores de PDSI/PHDI $< -4,0$ (Tabla C.5). El PDSI es utilizado para la determinación de sequías meteorológicas y agrícolas, en tanto, el PHDI permite determinar la sequía hidrológica. Considerando, que ambos índices permiten calcular condiciones extremas, son utilizados en el análisis de inundaciones.

3.2.4.5. Índice de Flujo Base (BFI)

El BFI es una medida relativa adimensional. Un valor cercano a cero significa que el río tiene una baja proporción de flujo base, asociado a características geológicas impermeables y bajas cantidades de agua subterránea. Un BFI cercano a uno, indica una alta proporción de flujo base, por lo cual la geología de la cuenca es permeable y las magnitudes de aguas subterráneas altas (Gustard *et al.*, 1992; Tallaksen y van Lanen, 2004).

El BFI se define como la relación entre el flujo base medio a largo plazo y el flujo total del río (Singh *et al.*, 2019). Es crucial para el entendimiento de las variaciones temporales que pueden experimentar los caudales, de esta forma es posible evaluar y realizar una gestión y planificación sostenible de los recursos hídricos. Durante períodos de escasez de precipitaciones, los caudales pueden reducirse de forma considerable en los ríos, sin embargo, aquellos ríos que presenten un BFI cercano a 1,0 indican que las afluencias de las napas subterráneas son capaces de solventar los caudales disminuidos por fenómenos climáticos anómalos.

3.2.5. Métodos de cálculo para el Índice de Calidad de Aguas

Horton (1965) propuso el primer Índice de Calidad del agua (WQI) para definir el estado de la calidad de agua natural de un río (Ecuación 3.4). Luego, autores como Dunnette (1979); House (1989); Kannel *et al.* (2007); Pesce y Wunderlin (2000) y Tunc Dede *et al.* (2013) crearon y desarrollaron variantes del WQI manteniendo la base científica.

$$WQI = \sum_{i=1}^n S_i \cdot w_i \quad (3.4)$$

donde WQI es el índice agregado; n es el número total de subíndices S_i ; w_i es ponderación del i-ésimo subíndice S_i . Las ponderaciones (w_i) indican la importancia relativa de los subíndices S_i .

El WQI es un número adimensional que engloba variables de interés en un rango de cero a cien, donde el límite inferior denota una calidad del agua pobre, mientras que el límite superior indica la calidad del agua ideal. Las variables se determinan mediante un juicio de expertos en el área, que determinan la selección de parámetros y su respectiva importancia, en conjunto a normativas nacionales o internacionales. Los WQI pueden considerarse como modelos de calidad del agua (Kachroud *et al.*, 2019), donde se seleccionan las variables y son definidos los métodos de ponderación y agregación de las mismas.

Un enfoque general del índice se define en los siguientes pasos:

1. **Selección de parámetros:** realizada mediante el juicio de expertos/profesionales, organismos y/o instituciones gubernamentales. Se seleccionan los parámetros de calidad de aguas que definen las variables de interés (también llamadas variables de importancia), tales como, niveles de oxígeno, aspectos sanitarios, peligros para la salud, riesgo de eutrofización, características físicas y sustancias disueltas que afectan la calidad de aguas (Dunnette, 1979; Boyacioglu, 2007).

Si y solo si el(los) autor(es) del índice lo indica(n), se establecen los **pesos de importancia**, los que son asignados en función de la importancia relativa y la influencia en el valor final del índice. Las ponderaciones pueden ser o no equitativas, autores como Harkins (1974); Cude (2001) y Saffran *et al.* (2001) utilizaron pesos equitativos para el desarrollo del WQI, debido a la subjetividad que pueden entregar los pesos relativos de un índice respecto a otro.

2. **Obtención de valores de subíndices:** debe realizarse una transformación a una escala común $S_i \in (0, 100)$, donde cada parámetro se transforma a un valor adimensional

a partir de su unidad (mg/L, porcentaje de saturación, recuentos/volumen, etc.). Los valores de los parámetros transformados a una escala común se conocen como subíndices. El desarrollo de las curvas de valoración (transformación) es subjetivo y se basa principalmente en el juicio del autor y de algunos de sus colaboradores.

3. **Agregación de subíndices con expresión matemática:** se utilizan de forma frecuente las medias aritméticas o geométricas.

Kachroud *et al.* (2019); Banda y Kumarasamy (2020) y Tyagi *et al.* (2020) entregan una completa y detallada descripción de las treinta o más variantes del WQI. Es preciso señalar que una vez calculado el WQI, el valor final del índice debe interpretarse en función del uso del agua, lo que ha llevado a que científicos e investigadores tengan dificultades para definir la calidad del agua y presentarla de forma consolidada.

3.2.6. Evaluación del modelo de calidad de aguas

Para evaluar la eficiencia del modelo HachM (desarrollado en el Capítulo 4, Acápite 4.4, sección 4.4.3) se utilizan los criterios recomendados por Gupta *et al.* (2009); Yilmaz *et al.* (2008) y Knoben *et al.* (2019), entre otros autores consultados en la literatura. La Tabla 3.2 resume la función objetivo del error de la raíz cuadrática media (RMSE), el coeficiente de determinación (R^2), la Eficiencia de Kling-Gupta (KGE, Gupta *et al.* (2009)), el coeficiente de correlación de Pearson (\hat{r}), la relación de desviación estándar/media simulada y calculada (r_{SD} ; r_M).

Tabla 3.2 Métricas de bondad de ajuste para la evaluación de HachM. La variable X_{calc} es el valor del WQI calculado, X_{sim} el valor simulado y n el tamaño de la muestra.

Función Objetivo	Ecuación	Óptimo	Fuente
RMSE	$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{sim,i} - X_{calc,i})^2}$	0	van Werkhoven <i>et al.</i> (2009)
R^2	$1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_{calc,i} - \overline{X_{sim,i}})^2}{\sum_{i=1}^n (X_{calc,i} - \overline{X_{calc}})^2}$	1	Krause <i>et al.</i> (2005)
KGE	$1 - \sqrt{(\hat{r} - 1)^2 + (r_{SD} - 1)^2 + (r_M - 1)^2}$	1	Gupta <i>et al.</i> (2009)
\hat{r}	$\frac{\hat{S}_{obs, sim}}{\hat{S}_{obs} \cdot \hat{S}_{sim}}$	1	-
r_{SD}	$\sigma_{sim} / \sigma_{obs}$	1	-
r_M	μ_{sim} / μ_{obs}	1	-

El RMSE es un indicador de la desviación estándar (dispersión) de los residuos y se define como una métrica absoluta de ajuste. Muestra que tan concentrados están los datos alrededor de la línea de mejor ajuste. Sin considerar el término algebraico $1/n$, la función objetivo del RMSE mantiene relación con la distancia euclidiana, heurísticamente esto indica que la métrica se puede considerar como una distancia normalizada entre los valores observados y simulados. Luego, al dividir por el tamaño de la muestra ($1/n$) se analiza que tan precisas son las simulaciones.

A diferencia del RMSE, el R^2 es una medida relativa de ajuste. La métrica varía de cero a uno, donde un valor cercano a cero indica que el modelo propuesto no mejora la predicción

sobre el modelo medio, y el valor $R^2 = 1,0$ indica una predicción perfecta. En otras palabras, el R^2 es la mejora proporcional en la predicción del modelo de regresión, en comparación con el modelo medio.

Por otro lado, el KGE se utiliza ampliamente para la calibración y evaluación de modelos hidrológicos, puesto que sus componentes permiten evaluar las características de volumen, tiempo y variabilidad de los flujos simulados y observados. Sin perjuicio de lo anterior, la métrica es utilizada como criterio de evaluación y calibración en HachM (modelo hidroestadístico), debido a la dependencia intrínseca del WQI con las variables hidroclimáticas que considera el modelo.

La determinación del KGE considera el coeficiente de correlación de Pearson (\hat{r}), la relación entre desviación estándar simulada y observada (r_{SD}) y la relación entre medias (r_M). Todo modelo busca que estas componentes entreguen valores cercanos a uno (Santos *et al.*, 2018; Knoblen *et al.*, 2019), de esta forma la distancia euclidiana compuesta por las tres métricas tiende a anularse, entregando un valor de KGE cercano al valor óptimo (i.e., $KGE = 1,0$).

Capítulo 4

Resultados & Discusión

En los siguientes acápitales se presentan y discuten los resultados del acuerdo de los modelos climáticos globales, la evaluación y proyección de inundaciones, el análisis de severidad-duración-frecuencia de sequías y, el desarrollo y construcción del modelo hidro-estadístico *Hydrology and chemistry of water quality* (HachM).

4.1. Acuerdo de los modelos climáticos globales

La cuarta acepción de la RAE define *modelo* como un *esquema teórico, generalmente en forma matemática, de un sistema o de una realidad compleja, como la evolución económica de un país, que se elabora para facilitar su comprensión y el estudio de su comportamiento*. Por tanto, debemos entender que los GCM representan un posible desarrollo de la dinámica del clima bajo distintas forzantes.

4.1.1. Acuerdo del producto grillado CR2MET, VIC, y simulaciones históricas

La Figura 4.1 muestra la clasificación de los días lluviosos según las observaciones del producto grillado CR2MET v2.0 (desde ahora, *observaciones*) y, las simulaciones de los GCM en el período 1985/2015. Del total de días (10.953), el 20,4 % es clasificado como lluvioso a excepcionalmente lluvioso según las observaciones, y el 20,5 % queda en la misma categoría según los modelos climáticos globales. El error promedio de los GCM en relación con las observaciones, es del 0,5 % con el modelo C4 y del 0,3 % con los modelos C3.6, IC5, y ME.

Luego, el total de días con precipitaciones menores a 10 mm se presenta en la Tabla 4.1. El indicador DD10 presenta un error promedio de 1,4 %, 2,1 %, 2,2 %, y 2,2 % según los modelos C4, C3.6, IC5, y ME, respectivamente y, del 0,2 % a 4,8 % entre las subcuencas del río Bueno. Por otro lado, los días secos (DD) simulados en comparación a los observados, muestran un error medio de 0,6 %, 1,1 %, 0,9 %, y 1,1 % acorde a los GCM.

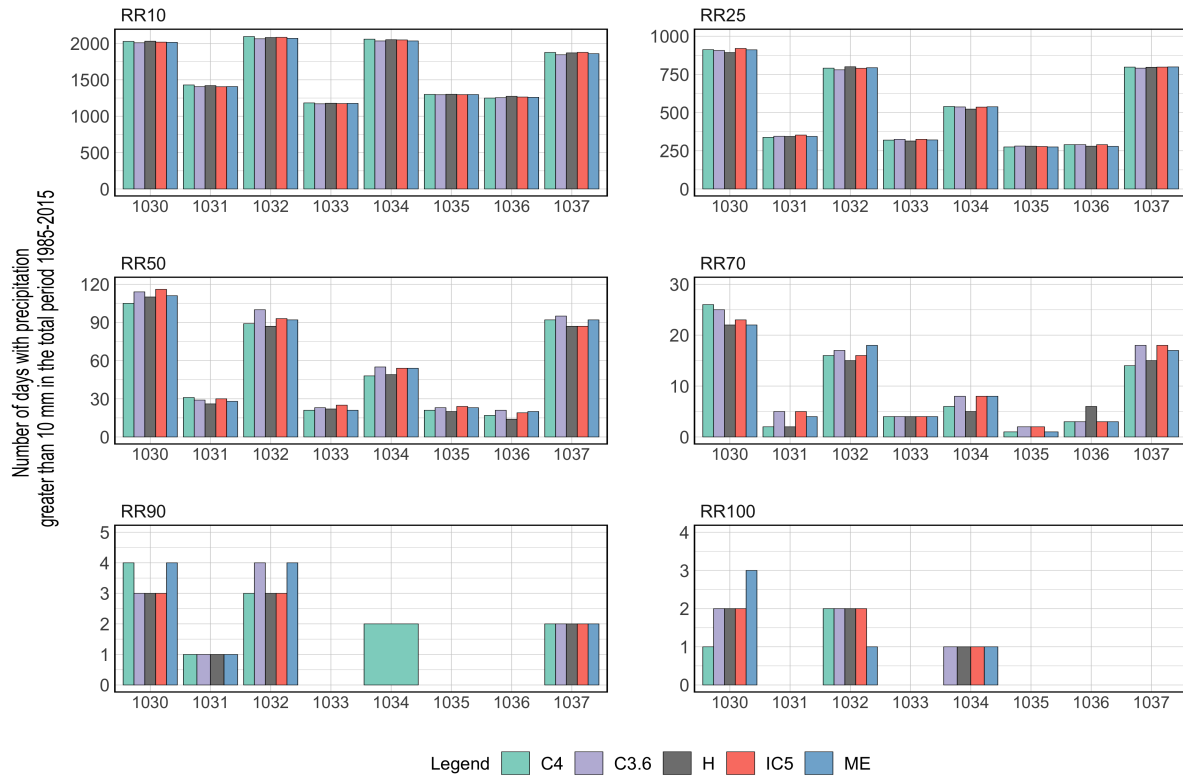


Figura 4.1 Clasificación de los días lluviosos en las subcuencas del río Bueno, análisis 1985/2015. Se presenta el total de días con precipitación sobre los diez milímetros según la clasificación de la Tabla C.1. La barra gris es el total de días lluviosos observados en el período histórico (H), las barras de colores (izquierda a derecha) son el total de días lluviosos simulados por los modelos CCSM4 (C4), CSIRO-Mk3.6 (C3.6), IPSL-CM5A-LR (IC5), y MIROC-ESM (ME).

Tabla 4.1 Clasificación de los días secos en las subcuencas del río Bueno, análisis 1985/2015. Se presenta el total de días con precipitaciones menores a diez milímetros y mayores a 1 mm (DD10) y, el total de días secos (DD).

Indicador	Análisis / BNA	UC-1030	IC-1031	UC-1032	IC-1033	UC-1034	IC-1035	IC-1036	DC-1037
DD10	Observaciones	2.306	3.076	2.521	2.980	2.926	3.534	3.245	2.804
	CCSM4	2.263	3.011	2.488	2.974	2.847	3.505	3.211	2.761
	CSIRO-Mk3.6	2.204	2.995	2.477	2.949	2.858	3.486	3.175	2.773
	IPSL-CM5A-LR	2.200	3.001	2.464	2.975	2.820	3.501	3.196	2.748
	MIROC-ESM	2.196	3.002	2.456	2.962	2.840	3.514	3.200	2.744
DD	Observaciones	5.585	6.083	5.443	6.454	5.397	5.817	6.134	5.377
	CCSM4	5.613	6.142	5.468	6.454	5.449	5.852	6.176	5.409
	CSIRO-Mk3.6	5.688	6.171	5.511	6.478	5.462	5.863	6.210	5.427
	IPSL-CM5A-LR	5.674	6.156	5.502	6.448	5.486	5.847	6.177	5.424
	MIROC-ESM	5.691	6.165	5.518	6.464	5.479	5.843	6.190	5.441

La Figura 4.2 muestra la curva de duración de caudales medios diarios modelados por VIC (en este estudio, *observaciones*) y, simulados por los GCM. El error de las FDC entre las observaciones y simulaciones en el período completo (1985/2015), es del 11 % al 26 %. En la región superior de la curva, se sobreestiman los caudales de las subcuencas cordilleranas UC-(1030, 1032, y 1034), intermedias IC-(1031, 1033, 1035, y 1036) y costera DC-1037 con los modelos IC5 y ME en un 1,2 % a 11,5 %, mientras que los modelos C4 y C3.6 subestiman los caudales entre un 0,1 % a 10,1 %. En la zona intermedia, se repite el patrón anterior, donde los caudales se sobreestiman hasta un 14,9 % y se subestiman hasta un 7,6 %. Luego, en la región inferior, con excepción del modelo C4, los GCM tienden a subestimar los caudales de las subcuencas del río Bueno ($\approx 2,9\%$ a $30,7\%$).

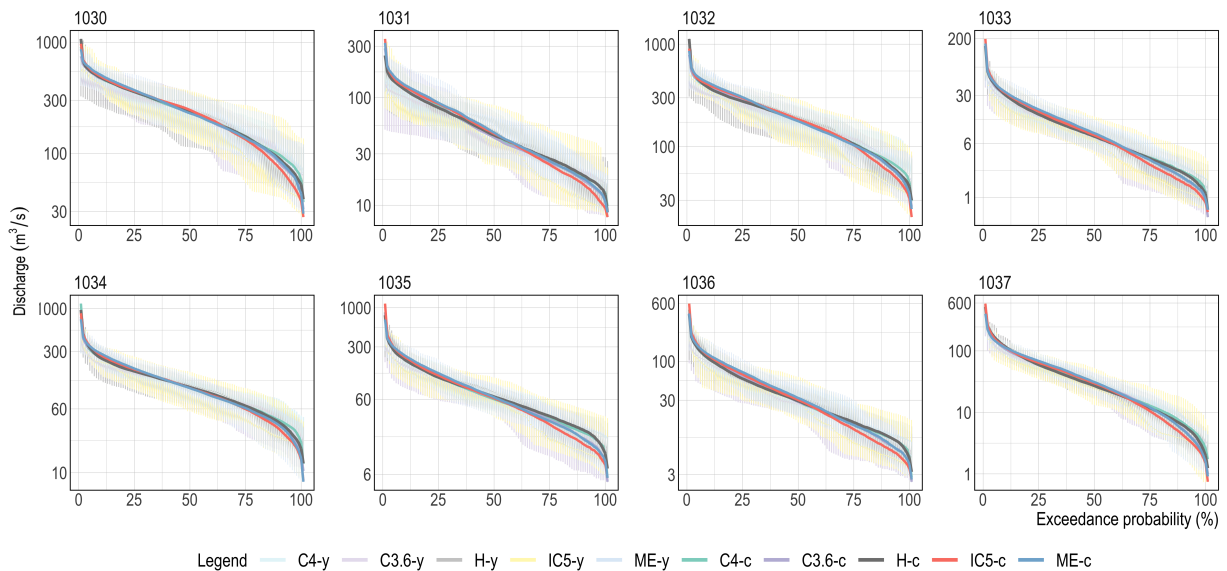


Figura 4.2 Curva de duración de caudales medios diarios de las observaciones y simulaciones climáticas, 1985/2015. Las barras verticales son los valores de las FDC por año hidrológico (-y), y la línea continua es la FDC del período completo 1985/2015 (-c).

4.1.2. Acuerdo de proyección climática

Los mapas de calor de las Figuras 4.3 y 4.4, representan la variación fraccional de la precipitación media mensual y cambios en los percentiles del 5, 10, 25, 50, 75, 80, 85, 90, 95 y 99 % de los caudales calculados en el largo plazo del período histórico y futuro. En la Figura 4.3, son observadas disminuciones del 30 % en la precipitación media mensual, siendo la temporada estival la que evidencia los cambios más bruscos y notorios en las subcuencas. Por el contrario, la proyección de la temporada pluvial acrecienta el régimen, dado que los GCM indican aumentos en las precipitaciones durante junio y agosto.

La variación porcentual de los caudales de diferentes percentiles presenta un comportamiento similar entre los GCM. La Figura 4.4 muestra disminuciones en la magnitud de los caudales bajo el percentil 50, reduciéndose en hasta un 70 % los caudales bajos (P5); del mismo modo, determinadas subcuencas registran disminuciones en los percentiles más altos (e.g., P75, P80, P85 en IC-1031).

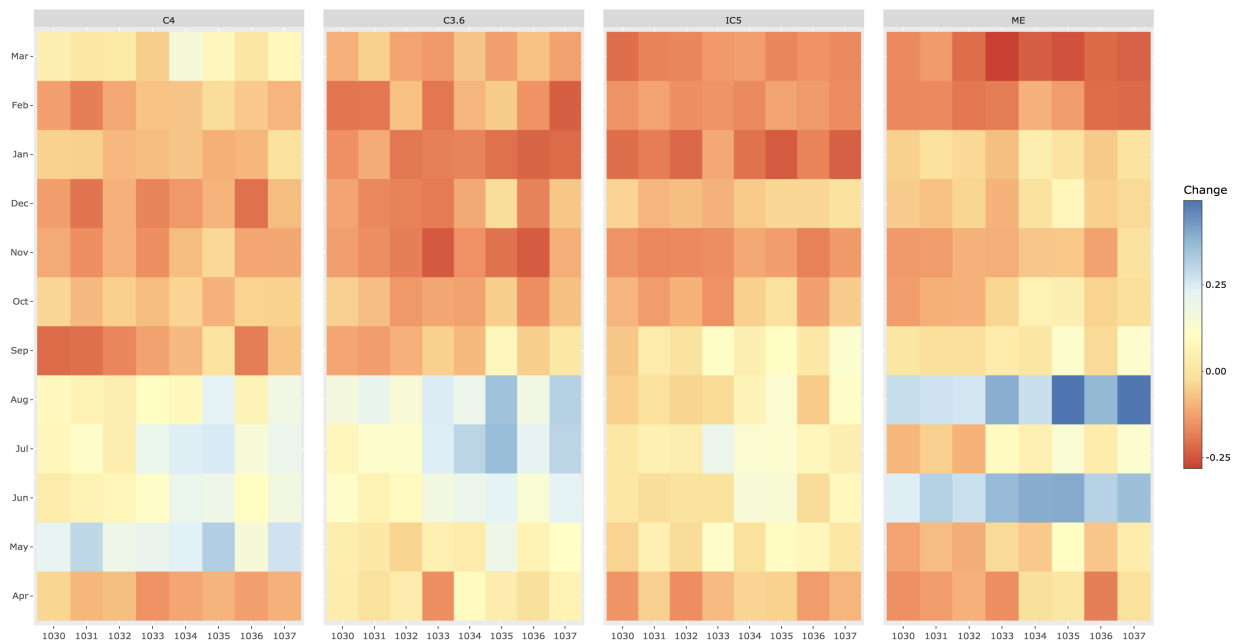


Figura 4.3 Variación fraccional de la precipitación media mensual en las subcuencas del río Bueno, entre 1985/2015 y 2030/2060. La figura es parte de un panel interactivo, descargable en el siguiente [link](#).

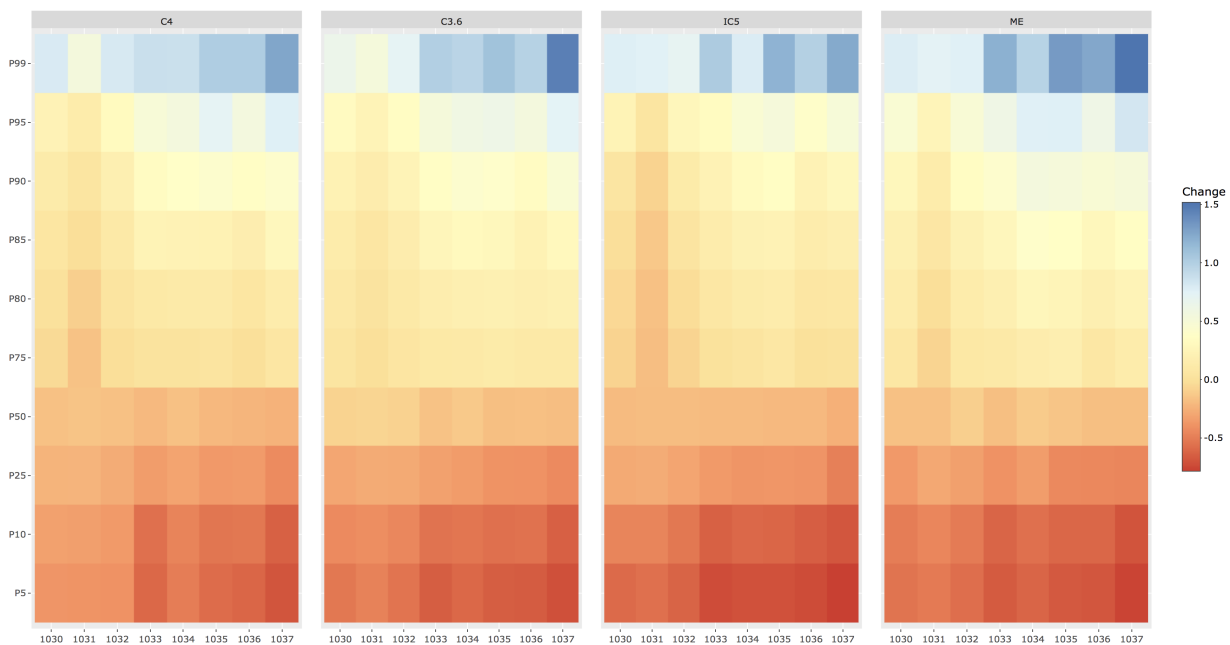


Figura 4.4 Variación fraccional del caudal, mediante percentiles calculados en el largo plazo, entre 1985/2015 y 2030/2060.

El acuerdo de los modelos climáticos se evalúa con los índices PDSI, PHDI, RAI y SPI-12, en la Figura 4.5. Cabe señalar que los índices han sido calculados a escala mensual, por lo cual se presenta una estadística de 360 meses (30 años).

El acuerdo de los GCM varía desde un 1% a 4% entre las subcuencas del río Bueno, el acuerdo negativo (absoluto e intermedio) es del 69%, 74%, 83% y 78%, el acuerdo neutro es del 24%, 20%, 13%, y 18%, y el acuerdo positivo es del 7%, 6%, 4%, y 4% según los índices PDSI, PHDI, RAI, y SPI-12, respectivamente. Esto equivale a que aproximadamente el 76% de los meses proyectados (equivalente a 23 años), presentan disminuciones en las condiciones de humedad respecto al período histórico.

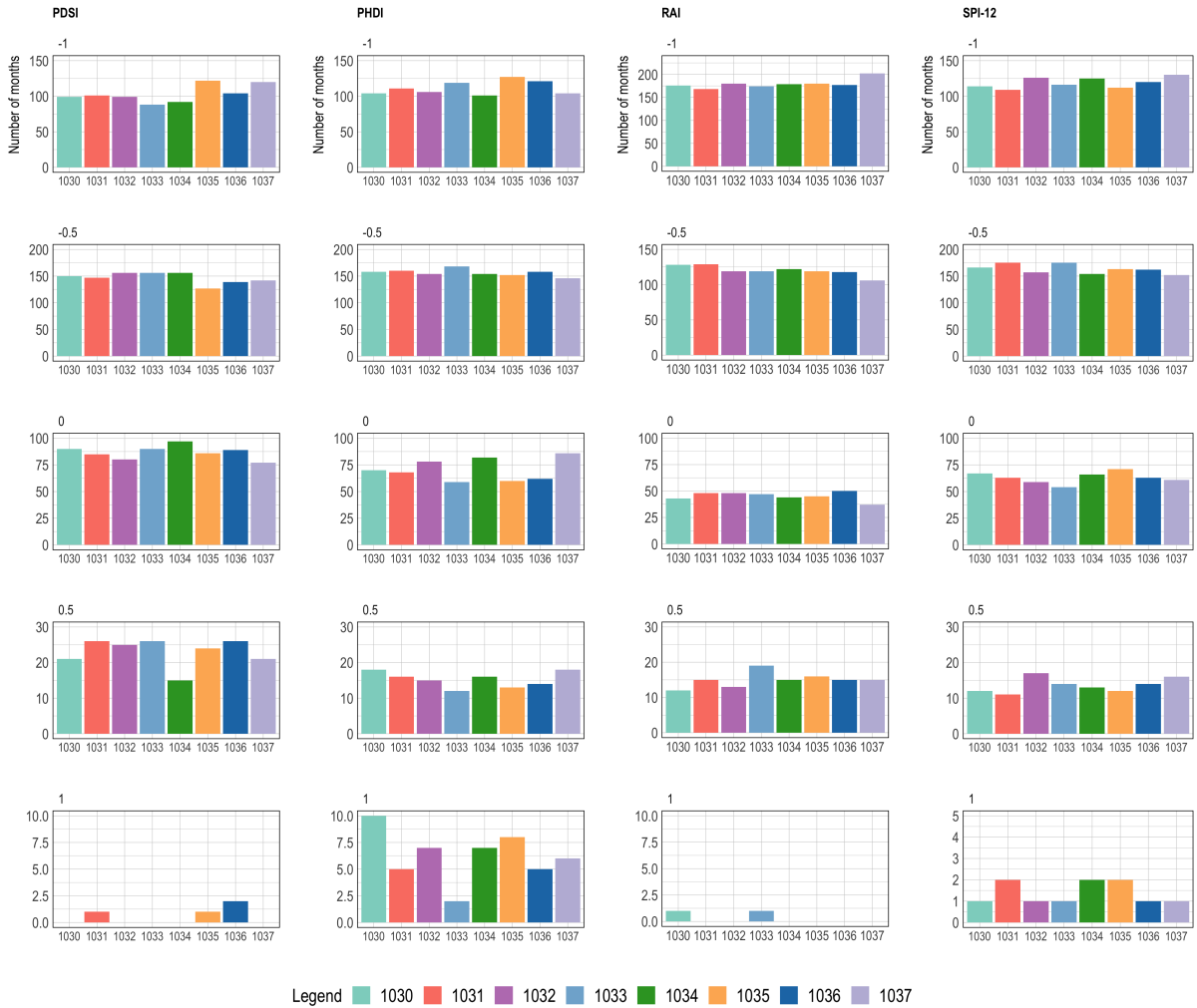


Figura 4.5 Clasificación de los factores de acuerdo f_{Agree}^{BNA} . Los valores -1,0, -0,5, 0,0, 0,5, y 1,0, representan el acuerdo negativo absoluto, negativo intermedio, neutro, positivo intermedio, y positivo absoluto, respectivamente.

Luego, se estudia el acuerdo de los GCM considerando solo aquellos valores de SPI-1, 3, y 6 $> 1,0$. Los resultados muestran que modelos climáticos globales varían en función de la escala temporal del SPI y de la condición de humedad evaluada (Tabla 4.2). El SPI-1 tiene cuatro subcuencas con acuerdo positivo (una con positivo absoluto), dos con acuerdo neutro y una con acuerdo negativo absoluto en las condiciones leves de humedad. Luego, seis subcuencas tienen un acuerdo positivo y, dos un acuerdo negativo según el análisis de las condiciones moderadas. Finalmente, las condiciones extremas indican que seis subcuencas tienen un acuerdo negativo y dos de ellas un acuerdo neutro.

Por otro lado, el SPI-3 y SPI-6 disminuyen la cantidad de meses de condiciones húmedas leves con relación al período histórico (acuerdo negativo intermedio y absoluto), las condiciones moderadas aumentan (acuerdo positivo intermedio y absoluto) y las condiciones extremas no exhiben una clara tendencia, manifestando variaciones entre las subcuencas.

Tabla 4.2 Acuerdo de los modelos climáticos globales en la región superior del SPI. Los colores rojo, naranja, negro, verde y azul, representan el acuerdo negativo absoluto, negativo intermedio, neutro, positivo intermedio, y positivo absoluto, respectivamente.

Índice	Condición/BNA	UC-1030	IC-1031	UC-1032	IC-1033	UC-1034	IC-1035	IC-1036	DC-1037
SPI-1	Leve	0,5	1,0	0,5	0,5	0,0	-1,0	0,5	0,0
	Moderada	-0,5	0,5	-0,5	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0
	Extrema	-1,0	-1,0	-0,5	-0,5	0,0	0,0	-1,0	-1,0
SPI-3	Leve	-0,5	0,0	-0,5	-0,5	-1,0	-0,5	-1,0	0,0
	Moderada	0,5	1,0	1,0	0,0	1,0	1,0	1,0	0,5
	Extrema	1,0	0,0	-0,5	0,5	0,5	-1,0	0,5	0,0
SPI-6	Leve	-1,0	-1,0	-0,5	-1,0	-1,0	0,0	-0,5	-1,0
	Moderada	0,5	0,5	1,0	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5
	Extrema	0,0	0,5	-0,5	0,0	0,0	0,0	-0,5	-0,5

4.2. Índices meteorológicos e hidrológicos para la evaluación y proyección de inundaciones

La presente sección muestra los resultados de la evaluación de inundaciones en la cuenca del río Bueno durante el período 1985/2015 y los cambios 2030/2060, con relación a la frecuencia y magnitud de los eventos extremos de precipitación extrema, con riesgo desencadenante en inundaciones urbanas y desbordes de ríos.

4.2.1. Análisis de inundaciones en el período base

El análisis histórico permite añadir nuevos eventos extremos a los ya registrados en la Tabla 2.5. Las subcuencas cordilleranas destacan por la cantidad de días con precipitaciones por sobre los 50 mm hasta 90 mm. Del análisis se extrae que los años 1990, 1993/1994, 1996/1997 y 2000 presentan las condiciones meteorológicas necesarias para haber registrado inundaciones en determinadas subcuencas del río Bueno, lo que se constata con los indicadores e índices presentados en el presente acápite.

El 80 % de los días de 1985/2015 las precipitaciones fueron menores a 10 mm en la cuenca del río Bueno, por consiguiente, los días lluviosos (RR10 a RR100⁵) suman el 20 % restante. La Figura 4.6 muestra la temporalidad del RR10 a RR70, los indicadores RR10 y RR25 son el 95 % de los días lluviosos reflejados por las precipitaciones de 10 a 50 mm. Luego el RR50,



Figura 4.6 Distribución de RR10, RR25, RR50 y RR70 en la cuenca del río Bueno, durante el período histórico 1985/2015. RR10: días lluviosos, RR25: días muy lluviosos, RR50: días fuertemente lluviosos, y RR70: días severamente lluviosos.

⁵Los nombres y definiciones de los indicadores/índices se encuentran en el Acápite 3.2.3 y 3.2.4. También pueden ser consultados en el Glosario del presente documento.

RR70, RR90 y RR100 representan el 1% de los días del período analizado (equivalente al 5% del 20%), siendo los días fuertemente, severamente, extremadamente, y excepcionalmente lluviosos.

Del análisis de los indicadores RR50 a RR100 se aprecia el riesgo que presentan las subcuencas cordilleranas UC-(1030, 1032, 1034) y costera DC-1037, debido la cantidad de días cuyos registros de precipitaciones superan los 50 mm o más. En particular, las características climáticas de los años 1997, 2006 y 2008 indican la probabilidad de inundaciones en la UC-1030 al ser analizado el RR50.

Los fenómenos de precipitación extrema se reducen en cantidad conforme aumenta la magnitud del evento. Sesenta y seis días del período histórico se clasifican como días de severas precipitaciones (RR70). No hay un patrón de periodicidad, como tampoco de cantidad. En específico, el año 2008 registra 4 de los 15 eventos RR70 en la DC-1037, mientras que la UC-1030 y UC-1032 tienen un total 22 y 15 eventos distribuidos de forma desagregada.

Un total de nueve días es catalogado como días extremadamente lluviosos (RR90), y cinco días alcanzan la categoría de días excepcionalmente lluviosos (RR100). La Tabla 4.3 resume los eventos registrados por subcuenca.

Tabla 4.3 Indicadores RR90 y RR100 en el período histórico 1985/2015. El valor en paréntesis es el número de veces en los cuales se presenta el indicador RR90 o RR100 durante el año señalado.

BNA	RR90	RR100
UC-1030	1993 (1); 1997 (2)	1993 (1); 2000 (1)
IC-1031	2000 (1)	-
UC-1032	1990 (1); 2000 (1); 2002 (1)	1993 (1); 1994 (1)
IC-1033	-	-
UC-1034	-	2004 (1)
IC-1035	-	-
IC-1036	-	-
DC-1037	2002 (1); 2004 (1)	-

Se constata que los registros de la Tabla 2.5 (debido a la falta de conectividad) no comprenden todos los siniestros de precipitación extrema, puesto que el análisis de los indicadores RR70 a RR100 permite añadir diez posibles eventos extremos (inundaciones) durante 1985/2002.

Como es sabido, las intensas precipitaciones de agua caída en un corto período de tiempo se relacionan con los fenómenos de crecidas, los cuales son influenciados intrínsecamente por los procesos hidrológicos al interior de la cuenca. Entre ellos, la capacidad de infiltración y retención que presentan los suelos, como también los niveles de permeabilidad, erosión y desertificación debido a los distintos tipos y usos de suelo que presenta la cuenca. Tras haber analizado la componente meteorológica de un extremo de inundación, se procede a evaluar la componente hidrológica. Para ello, son calculados los indicadores de la Tabla C.2.

La Figura 4.7 es un diagrama de caja en conjunto a la estimación de densidad de kernel (KDE, diagrama de violín). Muestra la distribución completa de los datos, siendo útil cuando se trata de datos multimodales, en otras palabras, la distribución tiene más de un pico. La zona más achatada de la curva representa los valores con menor probabilidad, fuera de los rangos normales y es por ello, outliers.

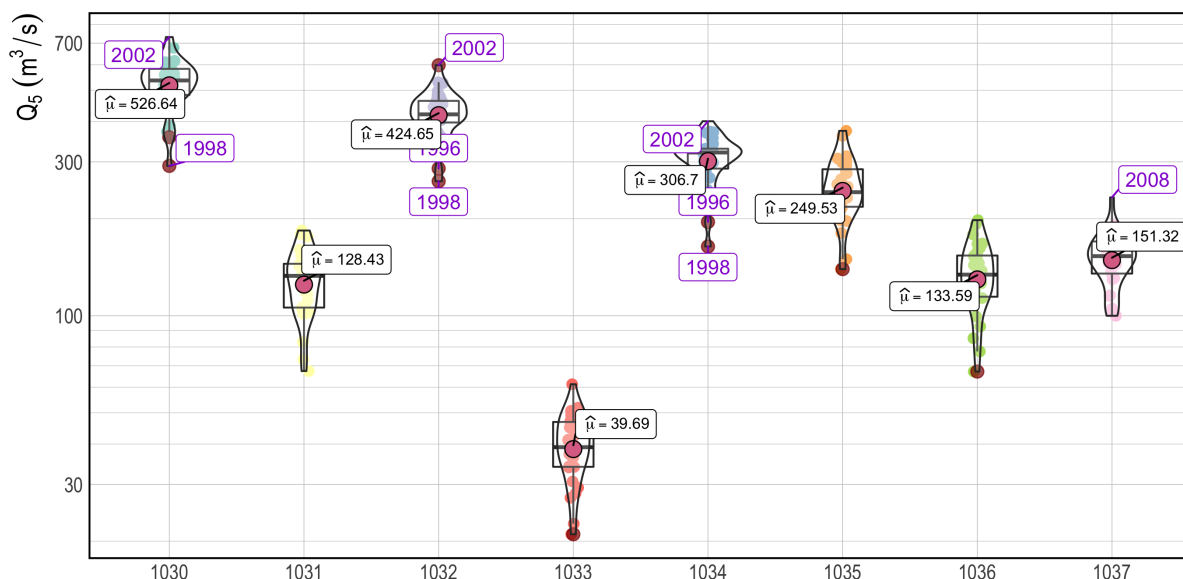


Figura 4.7 Quinto percentil de la curva de duración de caudales medios diarios. La mediana de las subcuencas queda representada por la línea negra dentro de las cajas del boxplot, la media se muestra con la letra griega $\hat{\mu}$, mientras que las distribuciones son las densidades de kernel de Q_5 rotada en cada lado del boxplot.

La mediana de Q_5 suele ser similar a la media, lo que señala una distribución simétrica de los datos. Las subcuencas UC-(1030, 1032, 1034) y DC-1037 pueden modelarse con una distribución $N(\mu = 0, \sigma = 1)$, en tanto, las subcuencas intermedias IC-(1031, 1033, 1035 y 1036) con una distribución $N(\mu = 0, \sigma = 5)$. Desde este punto, se infiere que las subcuencas IC son menos propensas a evidenciar los eventos extremos, lo que no implica que no se vean afectadas por los fenómenos. Se analiza la razón entre el valor de Q_5 por cada año hidrológico y el valor medio histórico, las subcuencas cuya razón sea superior al 20% se registran en la Tabla 4.4.

El contraste temporal de los indicadores RR'X con Q_5 , permite plasmar la dependencia temporal meteorológica e hidrológica de cuenca. Los días severamente (RR70), extremadamente (RR90) y excepcionalmente (RR100) lluviosos, predominan en los meses de junio, julio y agosto, así también, la respuesta hidrológica de la cuenca, en este caso denotada por Q_5 . Particularmente, se aprecia dicha dependencia en los años 2002, 2004, 2005, 2008, y 2014 (ver Tabla 2.5, Figura 4.6 - RR70, Tabla 4.3 y Tabla 4.4).

De los estadísticos de la serie de caudales medios diarios, la mediana de los datos observados es la misma que la media del indicador Q_{50} , siendo lógico debido a la definición del Q_{50} . Luego, el factor $f_{Q_{\max}} = Q_{\max}/Q_5(\text{Me})$ (Tabla 4.5) muestra que los caudales máximos regis-

Tabla 4.4 Eventos de caudales anómalos en las subcuencas del río Bueno. Se muestra el valor medio del quinto percentil de curva de duración de caudales medios diarios ($Q5_{\text{period}}$ (m^3/s)), la variación entre el indicador por año hidrológico y media según la subcuenca ($\Delta_{\text{BNA}} = 1 - Q5_{\text{year}}^{\text{BNA}}/Q5_{\text{period}}^{\text{BNA}}$) y, el caudal del evento anómalo, si y solo si $\Delta_{\text{BNA}} \geq 20\%$.

BNA	$Q5_{\text{period}}$ (m^3/s)	Variable/Año	1993	1997	2000	2001	2002	2004	2005	2006	2008	2009	2014
UC-1030	526,6	Δ (%)				29%	39%						
		Caudal (m^3/s)				677,0	731,3						
IC-1031	128,4	Δ (%)	25%		39%	37%			43%	24%			
		Caudal (m^3/s)	160,3		179,1	175,9			183,8	159,3			
UC-1032	424,6	Δ (%)					41%		25%			24%	
		Caudal (m^3/s)					598,1		529,5			526,2	
IC-1033	39,7	Δ (%)	21%	24%		31%			28%		54%		23%
		Caudal (m^3/s)	48,1	49,1		51,9			50,7		61,3		48,9
UC-1034	306,7	Δ (%)					31%	20%	21%			21%	
		Caudal (m^3/s)					400,9	368,8	372,3			370,8	
IC-1035	249,5	Δ (%)				25%		23%	21%		50%		45%
		Caudal (m^3/s)				312,5		307,2	301,0		374,4		361,2
IC-1036	133,6	Δ (%)			25%	34%		22%	25%		44%		48%
		Caudal (m^3/s)			167,5	178,6		162,5	166,9		192,1		197,9
DC-1037	151,3	Δ (%)					23%		26%		54%		
		Caudal (m^3/s)					186,2		190,8		232,8		

trados (Q_{max}) superan entre un 20 % a 120 % a la mediana de Q5. Por tal motivo, se descarta Q_{max} para el estudio de inundaciones, puesto que su variabilidad no entrega confianza en la evaluación de eventos extremos.

Por otro lado, Q_{p90} es un 15 % a 29 % menor que Q5 (Me), y 50 % superior a la mediana de Q50, por consiguiente, sus magnitudes son catalogadas como extremas y se mantiene su uso en el presente estudio.

Tabla 4.5 Factores $f_{Q_i} = Q_i/Q5(\text{Me})$ de indicadores basados en caudal. Los valores marcados en rojo indican los estadísticos que superan la mediana de Q5.

f_{Q_i} / BNA	UC-1030	IC-1031	UC-1032	IC-1033	UC-1034	IC-1035	IC-1036	DC-1037
$f_{Q_{\text{mean}}}$	0,48	0,43	0,48	0,31	0,41	0,37	0,33	0,30
$f_{Q_{\text{median}}}$	0,44	0,34	0,43	0,19	0,35	0,27	0,22	0,18
$f_{Q_{p90}}$	0,85	0,85	0,85	0,73	0,74	0,78	0,75	0,71
$f_{Q_{\text{max}}}$	1,19	1,23	1,50	2,21	1,81	1,87	1,85	2,26
$f_{Q50}(\mu)$	0,44	0,34	0,43	0,19	0,35	0,27	0,22	0,18
$f_{Q50}(\text{Me})$	0,43	0,34	0,43	0,20	0,35	0,27	0,22	0,18
$f_{Q5}(\mu)$	0,98	0,97	1,01	1,01	0,96	1,03	1,00	0,99

Finalizado el análisis de indicadores aplicados a inundaciones, se evalúan los índices hidroclimáticos. En primer lugar, se estudia el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI), en escalas temporales de 1, 3, y 6 meses (Figura 4.8).

Las inundaciones quedan –en general– representadas por cortas escalas de tiempo, debido a que el fenómeno extremo tiene una corta duración, pero intensa magnitud. Por lo tanto,

el análisis mensual del SPI permite ilustrar las precipitaciones extremas (i.e., inundaciones de baja y mediana intensidad con $1,0 \leq \text{SPI-1} < 1,5$). La escala de tres meses evalúa las condiciones de humedad en el corto plazo y las inundaciones moderadas y extremadamente húmedas ($1,5 \leq \text{SPI-3}$). Finalmente, las crecidas de deshielo se reflejan en la escala temporal de seis meses (SPI-6), así también, son estudiados los patrones de precipitación en el mediano plazo.

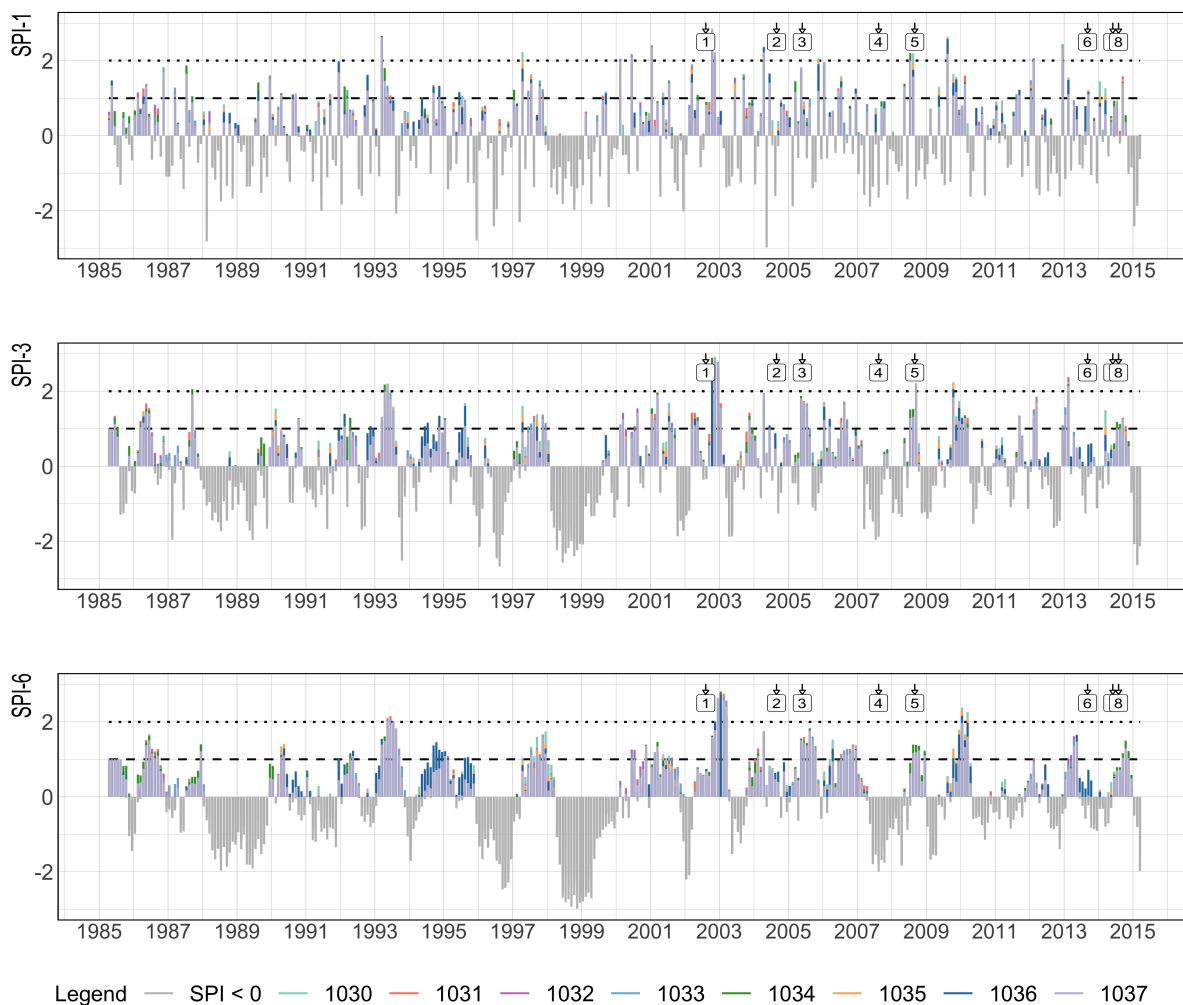


Figura 4.8 Región positiva del Índice de Precipitación Estandarizado en la cuenca del río Bueno. Las líneas segmentadas y punteadas representan límites en las condiciones de humedad, $\text{SPI} \geq 1,0$ es el inicio de una inundación de condición leve, $\text{SPI} \geq 1,5$ condición moderada (no se marca en la gráfica) y $\text{SPI} \geq 2,0$ condición extrema. Los números del 1 al 8 representan los eventos extremos indicados en el análisis de datos (Tabla 2.5).

Los eventos N.º 1, 2, y 5 de la Figura 4.8 son catalogados como inundaciones extremas al analizar el SPI-1, pero pierden la condición extrema al pasar al SPI-3 o SPI-6 (excepto el evento N.º 1). El evento N.º 4 es la inundación de menor severidad de acuerdo con el índice, mientras que los eventos N.º 3, 6, 7 y 8 responden a inundaciones moderadas.

El SPI muestra las anomalías de lluvias previas al año 2002, más de 20 eventos se clasifican como posibles inundaciones de baja-moderada intensidad ($1,0 \leq \text{SPI} < 2,0$). Y, un total de

seis eventos alcanzan la categoría de inundación extrema ($SPI \geq 2,0$).

Luego, los resultados del PDSI, PHDI y RAI muestran que el 50 % del tiempo en la cuenca del río Bueno, las condiciones son levemente áridas o denotan una sequía incipiente, reflejado por las curvas de duración de los índices PDSI y RAI de la Figura 4.9. El PHDI muestra que tres subcuencas (UC-1030, IC-1031, y UC-1032) tienen condiciones ligeramente húmedas en el mismo punto analizado ($p_{exc} = 0,5$).

Los fenómenos de inundación quedan representados por la zona más alta de la curva de duración (específicamente $0,0 < p_{exc} \leq 0,1$), donde $PDSI > 2,3$, $PHDI > 2,1$, y $RAI > 1,5$. Por consiguiente, los 36 meses de mayor humedad en la cuenca, presentaron condiciones moderadas y extremas capaces de provocar inundaciones.

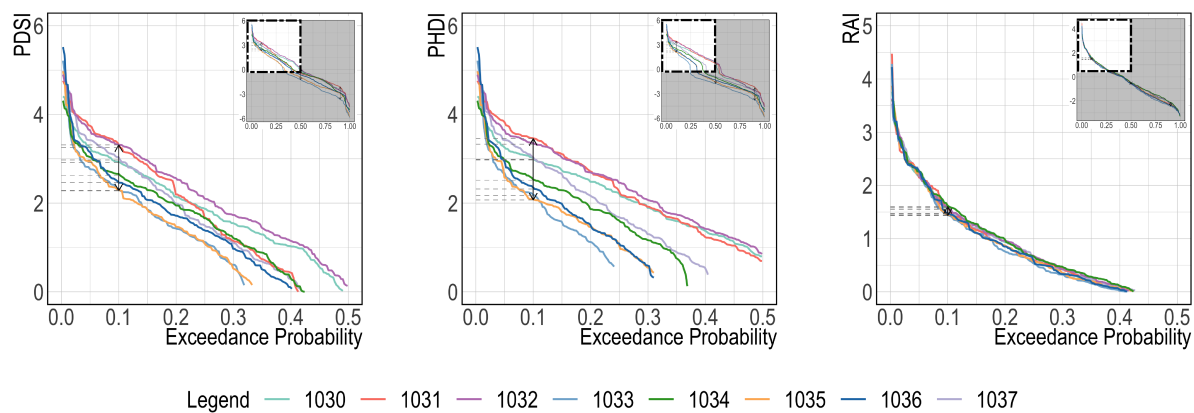


Figura 4.9 Curva de duración de los índices (mensuales) PDSI, PHDI y RAI. Las líneas punteadas horizontales indican la magnitud de los índices asociados a la probabilidad de excedencia del 10 %.

4.2.2. Evaluación de inundaciones según proyecciones climáticas

La Tabla C.8 muestra la diferencia del total de días con precipitaciones sobre los 10 mm, entre 1985/2015 y 2030/2060. Los resultados de las observaciones en el período 1985/2015 muestran que el 20 % de los días superan los 10 mm diarios⁶. Luego, la proyección 2030/2060 muestra una baja del 5 al 10 % en el número de días lluviosos en las subcuencas del río Bueno, esto implica que aproximadamente un 85 % de los días se proyectan con una precipitación menor a 10 mm.

La Figura 4.10 muestra la distribución de los días lluviosos en las subcuencas del río Bueno. El contraste de las ventanas temporales muestra que RR10 disminuye en un 31 %, 32 %, 36 %, y 32 %, y RR25 en 17 %, 22 %, 24 %, y 16 % acorde a los modelos C4, C3.6, IC5, y ME.

⁶Los resultados de las simulaciones climáticas, muestran un 21 % de días lluviosos. El análisis de las observaciones con relación a las simulaciones de los GCM en el período 1985/2015, se presenta en el Acápite 4.1

La proyección de RR50 difiere entre las subcuencas, entre un 10 % a 25 % se reduce la cantidad de días en las subcuencas UC-1030, UC-1032, y DC-1037. Por otro lado, las fuertes lluvias aumentan en cantidad (15 a 40 días) en las subcuencas IC-(1031, 1033, 1035, y 1036) y UC-1034.

Por su parte, el cambio de los indicadores RR70, RR90 y RR100 es superior al 100 % en todas las subcuencas. La Figura 4.10 muestra que las subcuencas cordilleranas UC-(1030, 1032, 1034) y costera DC-1037 son las más propensas de presentar eventos extremos, manteniendo el patrón histórico.



Figura 4.10 Clasificación de los días lluviosos en las subcuencas del río Bueno, análisis 1985/2015 y 2030/2060. Se presenta el total de días con precipitación sobre los diez milímetros según la clasificación de la Tabla C.1. La barra gris es el total de días lluviosos observados en el período histórico (H), consistente a los resultados de los GCM en el mismo período (ver Acápite 4.1).

Los resultados evidencian la radicalización de los eventos de precipitación extrema y, alertan sobre del déficit meteorológico. Si bien hay un aumento de días severamente, extremadamente y excepcionalmente lluviosos, la cantidad total de días lluviosos (RR10 a RR100) es menor a la registrada en 1985/2015, lo que refleja un aumento en los días secos.

Las variaciones porcentuales de Q_5 y Q_{p90} se presentan en la Tabla 4.6. El cambio de Q_5 denota aumentos del 30 % y bajas del 10 % en las subcuencas del río Bueno, desde un

4 % a 45 % se incrementan las magnitudes de Q5 con los modelos C4, C3.6 y ME, entre las distintas subcuencas; respecto al modelo IC5, se reportan disminuciones del 6 % y 7 % en las subcuencas UC-1030 y IC-1031 y, aumentos del 7 % al 35 % en las subcuencas restantes. Por otro lado, el indicador Q_{p90} exhibe variaciones positivas (2 % a 19 %), como también negativas (1 % a 14 %) respecto a los valores históricos.

Tabla 4.6 Variación porcentual de la proyección Q5 y Q_{p90} respecto a la mediana histórica de Q5. Los valores en rojo implican una reducción del indicador y los valores en azul un aumento en la magnitud media según el porcentaje señalado.

Modelo	Estad. /BNA	UC-1030	IC-1031	UC-1032	IC-1033	UC-1034	IC-1035	IC-1036	DC-1037
C4	Q5	8 %	4 %	23 %	31 %	34 %	28 %	34 %	43 %
	Q_{p90}	2 %	-10 %	4 %	-3 %	-2 %	13 %	-1 %	2 %
C3.6	Q5	18 %	13 %	28 %	28 %	34 %	46 %	27 %	51 %
	Q_{p90}	0 %	-7 %	3 %	-1 %	6 %	13 %	3 %	4 %
IC5	Q5	-6 %	-7 %	7 %	30 %	16 %	35 %	12 %	56 %
	Q_{p90}	-3 %	-14 %	-2 %	-13 %	-1 %	2 %	-9 %	-8 %
ME	Q5	14 %	14 %	40 %	31 %	45 %	36 %	41 %	38 %
	Q_{p90}	9 %	-2 %	14 %	4 %	14 %	19 %	7 %	10 %

Los resultados del SPI (1, 3, y 6) según los modelos climáticos globales (Figura 4.11), se traducen en 31 eventos de inundaciones leves, 18 eventos de condición moderada y 7 eventos de condición extrema, proyectando un total de 56 eventos en la cuenca del río Bueno. En general, los modelos C4 e IC5 tienen las mayores probabilidades de ocurrencia en inundaciones extremas y, los modelos C3.6 y ME preponderan en las inundaciones de carácter leve.

En términos de magnitud, el SPI plantea cambios en la frecuencia de inundaciones leves, moderadas y extremas. En consideración con el acuerdo de los GCM, el SPI-1 muestra aumentos del 6,1 % y 10,5 % en las inundaciones de carácter leves y moderadas, mientras que las inundaciones extremas disminuyen un 15,3 %. Por otro lado, el SPI-3 y SPI-6 disminuyen en la frecuencia de inundaciones leves (9,7 % y 16,5 %, respectivamente), pero aumentan los eventos moderados y extremos. Las inundaciones moderadas aumentan en 18,1 % y 41,9 % y las inundaciones extremas en 13,7 % y 25,6 %, de acuerdo con los resultados del SPI-3 y SPI-6, respectivamente.

Luego, dado el acuerdo del SPI entre sus distintas escalas temporales y el contraste con los indicadores $RR'X$ y Q_i son proyectados de 30 a 40 eventos de inundación moderada/extrema al período 2030/2060 en la cuenca, donde el número de eventos depende del GCM analizado.

Posteriormente, el cambio de los GCM en las probabilidades de excedencia del 10 %, 50 %, y 90 % ($p_{exc} = 0,1; 0,5$ y $0,9$) del PDSI, PHDI y RAI (Apéndice C, sección C.3.2), advierten variaciones en las condiciones de humedad para el período 2030/2060.

El PDSI (Tabla C.14) muestra descensos en la severidad de las inundaciones en 15 %, 18 % y 21 % con los modelos ME, C3.6 e IC5 al analizar el punto $p_{exc} = 0,1$. En cuanto a valores máximos registrados de los índices ($0,0 < p_{exc} \leq 0,1$), la subcuenca UC-1030 posee variaciones positivas del 8 %, 25 % y 31 % con los modelos C3.6, C4 e IC5, respectivamente, IC-1031 aumenta con C4 (8 %) y ME (9 %), mientras que UC-1034 incrementa los máximos

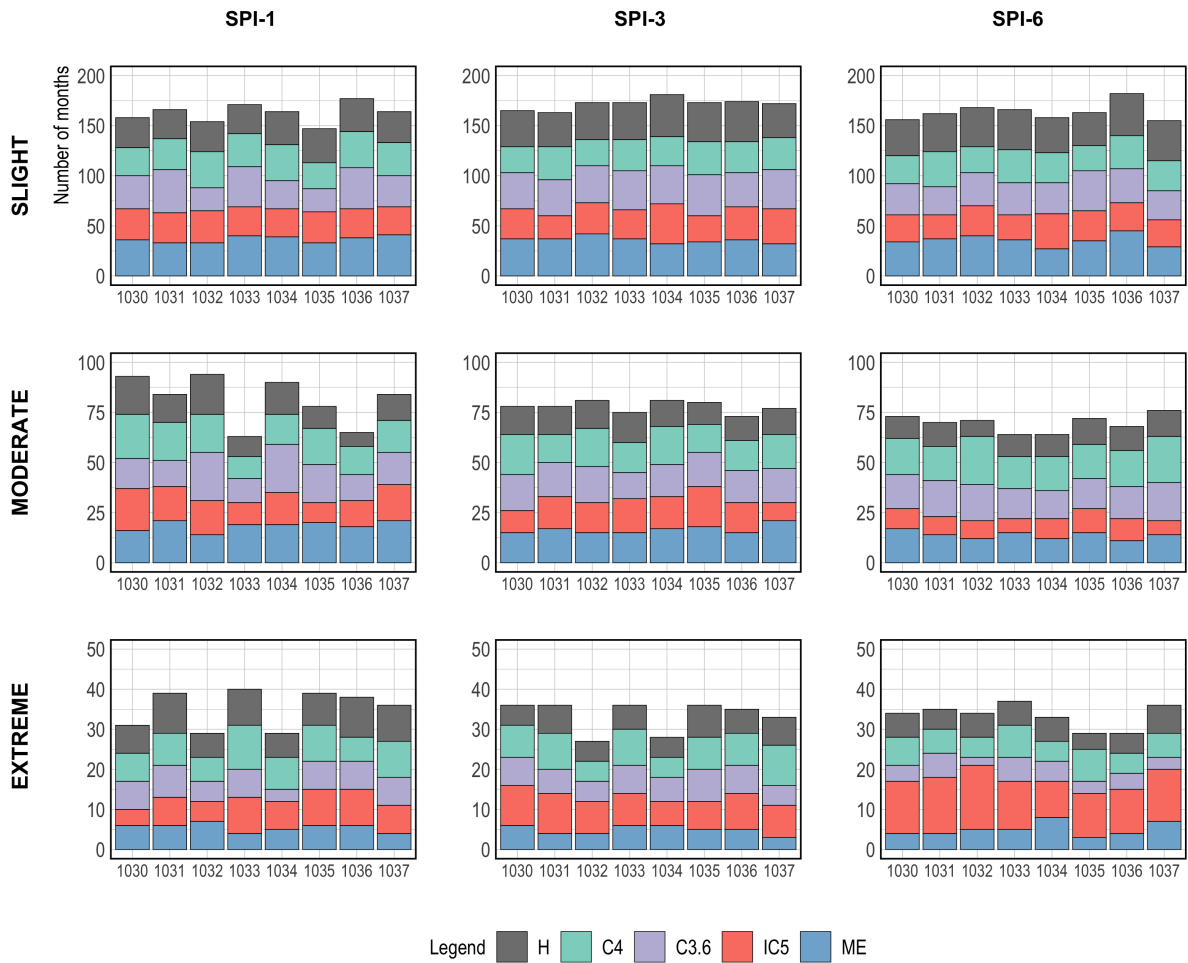


Figura 4.11 Frecuencia de las condiciones húmedas del SPI, entre 1985/2015 y 2030/2060. Se presenta la distribución por subcuenca de las condiciones húmedas (leves (slight), moderadas (moderate) y extremas (extreme)), registradas en el período histórico y aquellas proyectadas por los modelos climáticos globales. La Tabla C.9 contiene total de eventos promedio proyectados en la cuenca del río Bueno.

de PDSI con los modelos C4 (7%) y C3.6 (11%), en las subcuencas restantes los máximos disminuyen desde un 3% a 15% según el GCM examinado.

Luego, el PHDI (Tabla C.15) en el punto $p_{exc} = 0,1$ manifiesta un incremento del 1%, 9% y 22% con los modelos C3.6, ME y C4, en cambio el modelo IC5 muestra una disminución del 2%. Respecto a los valores máximos reportados por el índice, el PHDI presenta el mismo patrón de cambio que el PDSI, donde la subcuenca UC-1030 posee los mayores incrementos con un 7%, 25% y 31% según los modelos C3.6, C4 e IC5.

Finalmente, el RAI (Tabla C.16) evidencia descensos de las condiciones húmedas en toda la cuenca del río Bueno, proyectando inundaciones de menor intensidad, y sequías más severas.

4.2.3. Síntesis

Los indicadores e índices evaluados en el período histórico ratificaron los eventos de inundación datados en la Tabla 2.5, corroborando además la presencia de eventos anómalos de precipitación previo al año 2002, siendo consistentes en temporalidad los indicadores $RR'X$, Q_i e índice SPI. En cuanto a los índices PDSI, PHDI y RAI, su uso queda condicionado para evaluar las condiciones generales o de largo plazo en la cuenca y, no eventos particulares como las inundaciones, donde los umbrales asociados a $p_{exc} = 0,1$ permiten cuantificar el cambio de condiciones extremadamente húmedas.

Las proyecciones climáticas 2030/2060 revelan la probabilidad de 56 eventos de inundaciones provenientes de precipitaciones extremas, desbordes de ríos y crecidas de deshielo. Del total de fenómenos extremos, 30 a 40 eventos presentan mayor probabilidad de ocurrencia producto de la severidad (magnitud) moderada/extrema que adquieren los indicadores $RR'X$, Q_i y SPI.

En relación con la magnitud de los eventos, el SPI-3 refleja aumentos del 18,1 % y 13,7 % en las inundaciones de carácter moderado y extremo. Mientras que los resultados del SPI-6 reflejan aumentos superiores al 40 % en la frecuencia de inundaciones moderadas y sobre 25 % en las aquellas catalogadas como extremas.

Por otro lado, en términos de frecuencia, los resultados evidencian la radicalización de los eventos de precipitación extrema, expresando aumentos superiores al 100 % en los días severamente, extremadamente y excepcionalmente lluviosos (RR70, RR90 y RR100). No obstante, la cantidad total de días RR10 a RR100 disminuye entre un 5 % a 10 % entre las subcuencas del río Bueno en comparación al período 1985/2015, lo que refleja aumentos en los días con precipitaciones menores a 10 mm, proyectándose aproximadamente un 85 % de los días bajo dicha condición.

Si bien el presente capítulo tiene por objetivo evidenciar las condiciones de extrema humedad en la cuenca del río Bueno, es imposible no mencionar los cambios proyectados en las condiciones áridas, donde los índices SPI, PDSI, PHDI, y RAI indican que el 50 % del tiempo durante el período 2030/2060 la cuenca presentará los efectos de sequías leves a moderadas.

4.3. Análisis de severidad-duración-frecuencia de sequías meteorológicas, agrícolas e hidrológicas en una cuenca del sur de Chile

El presente apartado resuelve a las preguntas, ¿cuál es el registro de sequías meteorológicas, agrícolas e hidrológicas en la cuenca del río Bueno? y ¿se proyectan cambios en la severidad, duración y frecuencia de este tipo de evento extremo? Para responder a ambas, se aplican y analizan diversos indicadores e índices hidroclimáticos en la cuenca del río Bueno. Primero, es evaluado el período histórico 1985/2015 y, posteriormente se presenta el cambio proyectado 2030/2060, de acuerdo con los modelos climáticos globales.

4.3.1. Análisis de sequías en el período base

La Figura 4.12-(A) muestra los resultados de Q50, cuya mediana varía hasta un 97 % entre subcuencas (caso UC-1030 vs IC-1033), siendo este porcentaje equivalente a una diferencia de 224,3 m³/s. Por otro lado, Q95 (Figura 4.12-(B)) corresponde aproximadamente al 25 % del Q50 en órdenes de magnitud.

La Tabla 4.7 resume los estadísticos de Q50 y Q95, donde se observa que los dos períodos de sequías presentan indicadores bajo la media histórica, reflejando déficits hídricos en cada una de las subcuencas. La sequía del año 1998/1999 (2007/2008) muestra una disminución del 43,8 % (21,9 %) para Q50 y del 17,3 % (25,9 %) para el Q95, en relación con el valor medio de 1985/2015.

Tabla 4.7 Resumen de estadísticos de los indicadores Q50 y Q95 en el período histórico. Se presenta el valor medio de la cuenca, obtenido como el valor medio de cada subcuenca.

Indicador	Período	Media (μ)	Mediana (Me)	Desv. Estándar (σ)
Q50 (m ³ /s)	1985/2015	87,6	86,5	16,5
	1998/1999	49,2	34,9	40,9
	2007/2008	68,4	44,5	65,7
Q95 (m ³ /s)	1985/2015	27,7	27,1	7,5
	1998/1999	22,9	16,4	21,1
	2007/2008	20,5	13,4	21,2

Análisis adicionales muestran que los días secos representan el 53 % de los días del período 1985/2015 (el 27 % es representado por DD10 y el 20 % restante corresponde a días lluviosos), entregando una duración media consecutiva de 20 días (LDP; Figura 4.12-(D)). Las subcuencas UC y DC-1037 (Figura 4.12-(C)) representan la media de la cuenca, mientras que las IC reflejan condiciones de mayor aridez y, por lo tanto, una condición de mayor susceptibilidad a los efectos de las sequías. El análisis del año 1998/1999 (2007/2008) revela que se alcanzó un 62 % (57 %) de días secos, y un período consecutivo de 25 (35) días. Además, se destacan los años 1988, 1996, 2001 y el período que comienza en el año 2010, donde los días secos representan el 57 %, 59 %, 56 % y 55 % del total de los días del año.

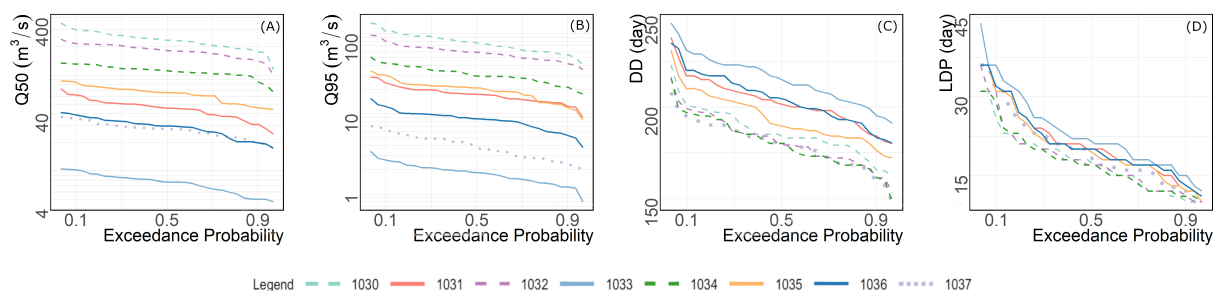


Figura 4.12 Curva de duración de indicadores hidroclimáticos durante el período 1985/2015. Desde izquierda a derecha: Q50 (A), Q95 (B), DD (C) y LDP (D).

Posteriormente, se analizan las magnitudes y características que definen los ríos de la cuenca del río Bueno. Una descomposición genérica es la división de los flujos del río en dos componentes principales, un flujo rápido y un flujo base. El flujo rápido depende directamente de la escorrentía directa de la cuenca hidrográfica y se ve altamente influenciado por las precipitaciones, por tanto, los flujos rápidos se relacionan a las crecidas de ríos provenientes de eventos de precipitación extrema. En cambio, el flujo base se compone de aguas subterráneas y de otras fuentes (ICGW, 1980; Fetter, 2001), las cuales pueden ser lagos interconectados, humedales, el derretimiento de nieve, almacenamientos temporales en las quebradas que componen el río principal y el flujo intermedio de movimiento lento (Bosch *et al.*, 2017).

La serie temporal del BFI (Figura 4.13) indica que la IC-1031 presenta un BFI $\approx 0,95$, siendo superior a su cuenca efluente (UC-1030; BFI $\approx 0,90$), y a la subcuenca UC-1032 (BFI $\approx 0,80$). Luego, las subcuencas IC-(1033, 1035 y 1036) y UC-1034 presentan un valor de BFI de 0,5 a 0,8, para concluir en el punto de salida de la cuenca DC-1037 con un BFI de 0,4.

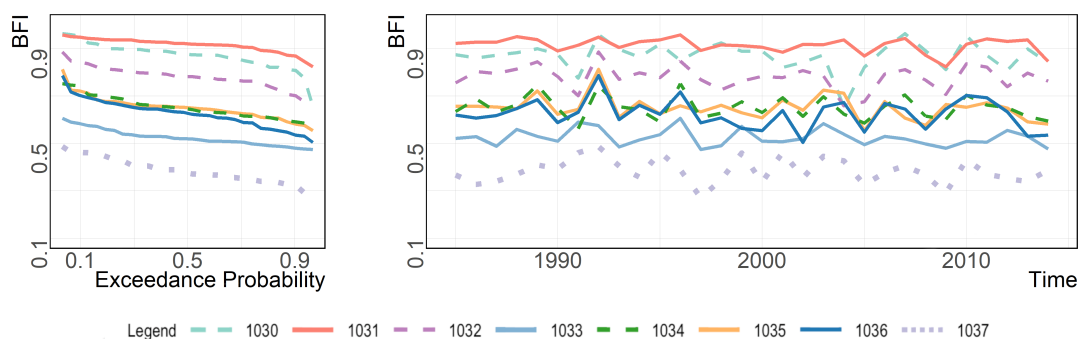


Figura 4.13 Índice de Flujo Base (BFI) en el período histórico 1985/2015. Se presenta la curva de duración del índice en el panel izquierdo y la serie temporal en el panel derecho.

Desde el análisis del BFI, se infiere que la proporción de flujo base en las cuencas intermedias es menor que en las cuencas cordilleranas. Por consiguiente, aguas abajo de las cuencas UC-(1030, 1032, y 1034), las condiciones geológicas disminuyen en permeabilidad, dando paso a mayor generación de escorrentía directa y menores almacenamientos en las napas subterráneas. El caso más notorio es la cuenca DC-1037, donde el 50% del tiempo el BFI tiene un valor menor a 0,4.

El análisis SIG del Estudio Agrológico del Suelo de la Región de Los Ríos y Los Lagos (CIREN, 2012, 2019), permite corroborar los resultados del BFI. En efecto, se documenta la existencia de una zona cordillerana con tierras sin uso agropecuario o forestal (su uso está limitado para la vida silvestre, recreación o protección de hoyas hidrográficas). La zona intermedia de la cuenca se caracteriza por suelos cultivables con ligeras, moderadas y severas limitaciones de uso, y riesgos de daños moderados a altos. Las principales limitaciones de uso de la zona intermedia se deben a la erosión por agua o viento, la excesiva humedad o riesgos continuos de inundaciones que restringen el desarrollo radicular, la baja capacidad de retención de agua, topografía ondulada, y permeabilidad variable (lenta a rápida). Finalmente, la zona baja de la cuenca se caracteriza por suelos aptos para pastoreo y forestación, pero con alta susceptibilidad a la erosión, muy baja capacidad de retención de humedad y drenaje pobre a muy pobre (Zelada y Maquire, 2005; CIREN, 2012, 2019)

La cuenca del río Bueno posee variabilidad en los caudales debido a la geografía de la subcuencas (ver Figura 4.2 y Tabla C.6). En términos generales, los caudales más altos y condiciones de mayor humedad responden a las cuencas cordilleranas (UC), mientras que los caudales más bajos y condiciones de aridez se presentan en las cuencas intermedias (IC), las cuales destacan por la cantidad de días secos.

Para evaluar los tipos de sequía se calculan los índices SPI, SPEI, PDSI, PHDI, y RAI. Se analizan los dos períodos registrados (**R**) en la sección 2.6 y tres períodos propuestos (**P**) –1988/1989, 1996/1997 y 2012/2015– a partir de los resultados de los indicadores (Q50, Q95, LDP, DD, y BFI). Desde ahora en adelante, *sequías R y P*.

La evaluación del Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) en sus distintas escalas temporales (1, 3, 6, y 12 meses), permite categorizar las sequías meteorológicas, agrícolas e hidrológicas. La Figura 4.14 muestra la serie temporal del índice, se identifican con la letra **R** las sequías del análisis de datos, y con la letra **P** aquellas propuestas mediante los indicadores hidroclimáticos del presente estudio.

Los resultados del SPI-1 (Figura 4.14 - (A)), muestran que las sequías **R** y **P**, tienen una duración menor o igual a 6 meses, con excepción de la sequía de 1998, que tiene una continuidad de 13 meses. La Figura 4.15 - (A) muestra las severidades acumuladas con relación a la duración de los eventos. Las sequías de 1988/1989, 1996/1997, y 2007/2008, presentan severidades leves, la sequía de 1998/1999 una severidad moderada, mientras que a finales de 2012 y 2015, las condiciones son de extrema sequedad. El SPI-3 (Figura 4.14 y 4.15 - (B)), muestra que las dos sequías **R** –cronológicamente– tienen duraciones (y severidades) de 19 meses (sequía severa-extrema) y 12 meses (sequía moderada). Luego, las sequías **P** presentan duraciones (y severidades) de 21 meses (sequía moderada), 15 meses (sequía moderada-extrema), e intervalos de sequía de cuatro a ocho meses, a partir del año 2012, con una categoría leve-extrema.

Las condiciones de humedad en el mediano plazo son determinadas con el SPI-6 (Figura 4.14 y 4.15 - (C)), reflejando los efectos de las sequías agrícolas y las incipientes adversidades de las sequías hidrológicas, las que se identifican con los resultados del SPI-12. Las sequías **R** con el SPI-6, presentan duraciones (y severidades) de 23 meses (sequía severa-extrema) y 12 meses (sequía moderada). Los resultados del SPI-6 en las sequías **P**, muestran duraciones (y severidades) de 23 meses (sequía moderada), 16 meses (sequía severa-extrema), e intervalos de

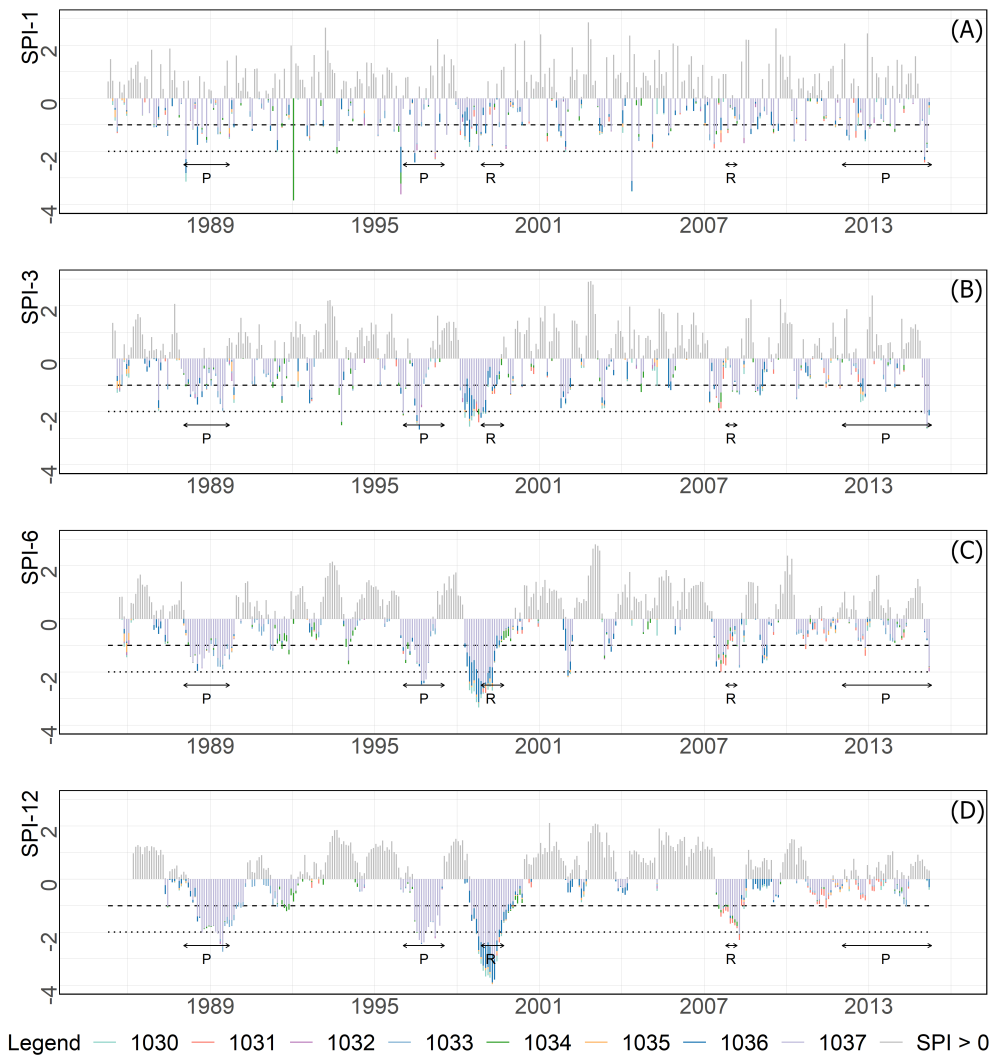


Figura 4.14 Región negativa del Índice de Precipitación Estandarizado en la cuenca del río Bueno. Las líneas segmentadas y punteadas son límites en las condiciones de humedad, $SPI \leq -1,0$ es el inicio de una sequía de condición leve, $SPI \leq -1,5$ condición moderada (no se marca en la gráfica) y $SPI \leq -2,0$ condición extrema. Los segmentos **R** y **P** son las sequías indicadas en el análisis de datos y las propuestas a partir de los resultados de indicadores, respectivamente.

sequía de 6 a 12 meses, a partir del año 2010, de categoría leve-moderada. El SPI-12 (Figura 4.14 y 4.15 - (D)) refleja el grado más severo y duraciones más extensas de las sequías. El período 1987/1990 presenta 30 meses continuos de condiciones áridas (**P**: sequía moderada-severa), seguido de 1998/2000 con 25 meses (**R**: sequía extrema), 1996/1997 con 19 meses (**P**: sequía severa-extrema), 2010/2012 con 18 meses (**P**: sequía leve-moderada) y, 2007/2008 con 13 meses (**R**: sequía moderada).

En consideración al período 1985/2015, las sequías meteorológicas (SPI-1), son leves (moderadas), y su frecuencia es de una vez cada 3 (9) meses, mientras que las sequías severas (extremas), tienen una recurrencia de una vez cada 2,5 (5) años. Por otro lado, el 64% de los meses con $SPI-3 < 0$ son clasificados como meses con sequía leve o incipiente, mientras

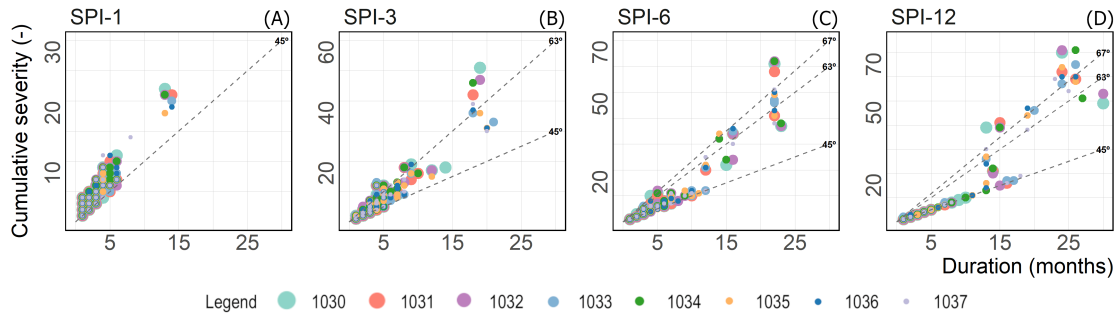


Figura 4.15 Severidad acumulada y duración consecutiva (meses) del Índice de Precipitación Estandarizado. La severidad acumulada (SA), se define como la suma de la severidad –otorgada de acuerdo con la Tabla C.3– de cada mes del evento; en notación matemática, $SA = \sum_{i=1}^n S_i$, donde n es el total de meses del evento (i.e., duración) y S_i toma valores 1, 2, 3, o 4. Por lo tanto, la severidad media (\bar{S}) de cada evento es, $\bar{S} = SA/n$. Luego, los eventos posicionados en la recta de 45° tienen $\bar{S} = 1$ (sequía leve) y, los eventos **sobre** la pendiente de 45° aumentan en severidad conforme aumenta la pendiente.

que un 4% tiene características de sequía extrema, presentándose esta condición en los años 1996/1997, 1998/1999 y 2015. En términos de frecuencia, una sequía leve (moderada) se presenta al menos 2 veces cada 7 (9) meses, y las sequías severas (extremas) cada 1,8 (4,1) años. De acuerdo con la Tabla C.7 la frecuencia relativa de las sequías agrícolas (SPI-6) con una severidad leve (moderada) es una vez cada 3 (12) meses y, la de sequías severas (extremas) es de 2,0 (2,7) años. Finalmente, las sequías hidrológicas (SPI-12) leves muestran una recurrencia de 2 veces cada 7 meses y las sequías moderadas, severas y extremas, se presentan una vez cada 1,5, 1,7 y 1,9 años, respectivamente.

Con relación a los índices PDSI, PHDI, RAI, el 50% del tiempo las condiciones de humedad son levemente áridas o denotan una sequía incipiente en la cuenca del río Bueno. De la Figura 4.16 se extrae que los extremos áridos (cola inferior de la curva; $0,9 \leq p_{exc} \leq 1,0$) presentan rangos de $-5,9 < PDSI/PHDI < -2,2$ y $-3,3 < RAI < -2,1$.

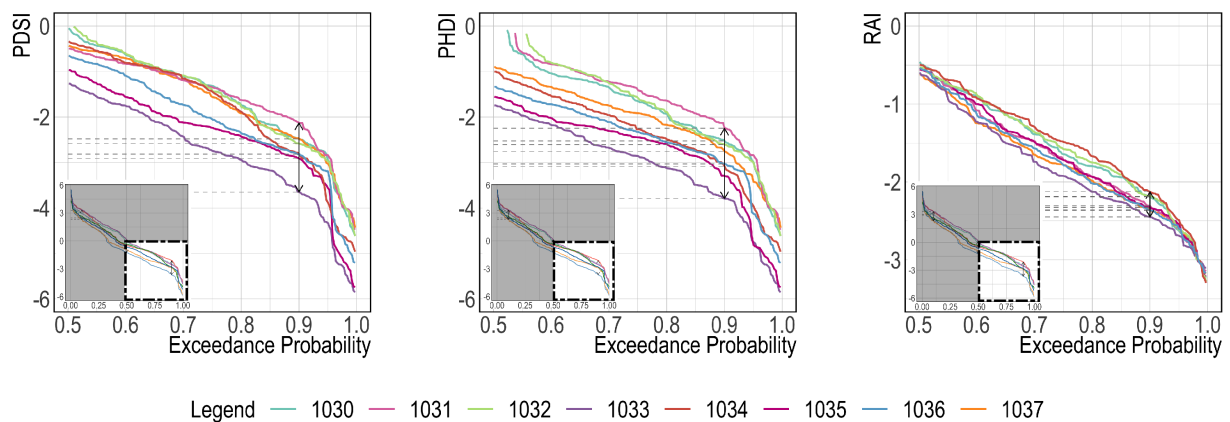


Figura 4.16 Curva de duración de los índices (mensuales) PDSI, PHDI y RAI. Las líneas punteadas horizontales indican la magnitud de los índices asociados a la probabilidad de excedencia del 90%.

Finalmente, el estudio del SPEI es consistente con el SPI, ratificando los dos períodos de sequías registrados en la cuenca del río Bueno. Además, indican períodos de sequía en los años 1988/1989, 1996/1997 y 2010/2014, siendo estos años consistentes con los resultados de los indicadores Q50, Q95, LDP, DD e Índice de Flujo Base. En consecuencia, en la cuenca del río Bueno, durante el período histórico se registraron cinco sequías con duraciones comprendidas entre 10 a 30 meses.

4.3.2. Frecuencia, duración y severidad proyectada

El análisis de los días secos (DD) revela un incremento promedio entre las subcuencas del río Bueno en el rango 20 a 30 %, con respecto al período histórico. Luego, el indicador LDP muestra una variación fraccional positiva del 20 % a 35 % con los GCM. De acuerdo con la Figura 4.17-(panel superior), los días secos presentan una variación fraccional promedio del 25 %, análogo al aumento del 13 % en DD. Por lo tanto, el 66 % de los días de 2030/2060 se proyectan como días secos según C4, C3.6 y ME, mientras que el valor proyectado por modelo IC5 es del 67 %, equivalente a 244 días con precipitaciones menores a 1 mm en el año. En el caso de los períodos secos más largos con la condición $RR < 1$ mm, se registran 52, 47, 57 y 44 días consecutivos, con una media representada por 23, 24, 26, y 24 días según C4, C3.6, IC5, y ME, respectivamente.

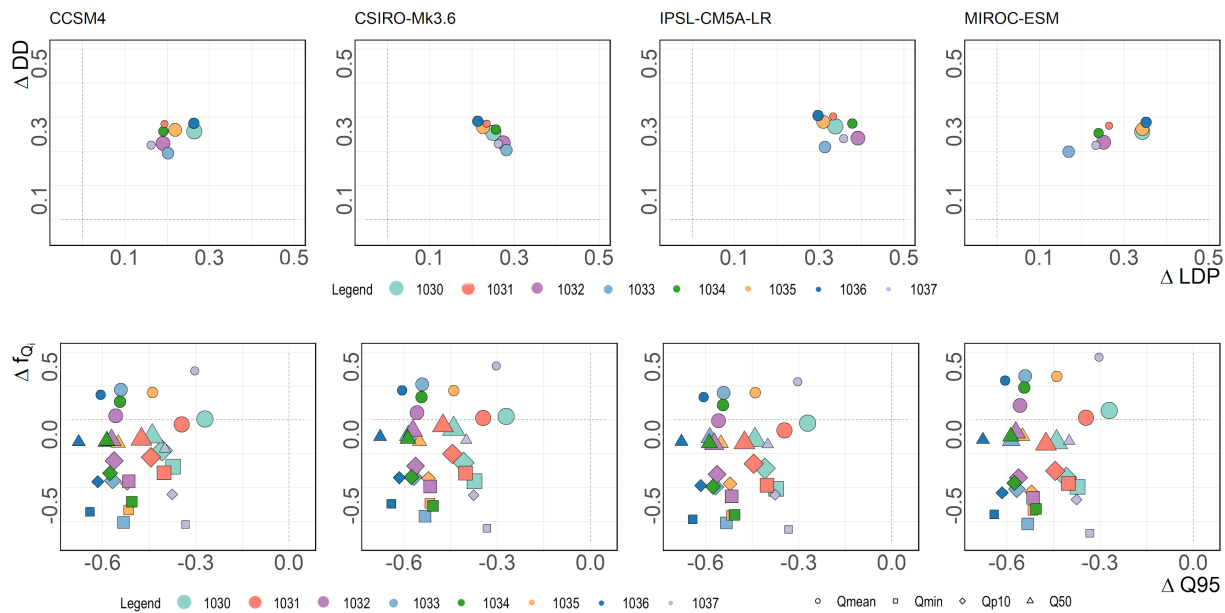


Figura 4.17 Variación fraccional de los indicadores DD, LDP, factores f_{Q_i} y Q95, entre 1985/2015 y 2030/2060. El panel superior muestra la variación media por subcuenca de los indicadores DD y LDP. El panel inferior muestra la variación de los factores $f_{Q_i} = Q_i/Q95$, donde Q_i son los indicadores Q_{mean} , Q_{min} , Q_{p10} y $Q50$. La variación se calcula como $(X_{GCM}^{Fut} - X_{GCM}^{Hist})/X_{GCM}^{Hist}$, donde X es el indicador DD o LDP, GCM los modelos CCSM4 (C4), CSIRO-Mk3.6 (C3.6), IPSL-CM5A-LR (IC5), y MIROC-ESM (ME), y Fut – Hist los períodos 2030/2060 y 1985/2015.

La Figura 4.17-(panel inferior) muestra la variación fraccional de cada métrica de caudal respecto de la mediana de Q95 en el período base. Con la excepción de Q_{mean} , que presenta

una variación **positiva** del 16 % promedio, los indicadores $Q_i = Q_{\min}, Q_{p10},$ y $Q50$ disminuyen un 62 %, 43 %, y 14 % en relación con los valores históricos, respectivamente. El caudal medio anual aumenta un 7 % promedio en las subcuencas cordilleranas UC-(1030, 1032, y 1034), un 17 % promedio en las subcuencas intermedias IC-(1031, 1033, 1035, y 1036) y, un 38 % en la desembocadura de la cuenca del río Bueno (DC-1037).

Luego, el caudal mínimo anual se reduce un 54 % en las subcuencas cordilleranas (UC), un 63 % en las subcuencas intermedias (IC) y 81 % en la subcuenca costera (DC). El mismo patrón de cambio lo presentan los indicadores Q_{p10} y $Q50$, donde los caudales de UC se reducen un 38 % y 13 %, en IC bajan un 43 % y 15 % y, en DC se registra una disminución del 56 % y 18 %, respectivamente. Por último, el indicador $Q95$ presenta una variación **negativa** media del 45 %, 47 %, 50 %, y 53 % con los modelos C4, C3.6, IC5 y ME. Las variaciones de $Q95$ en las subcuencas cordilleranas son del orden del 40 % UC-(1030 = 37 %, 1032 = 42 %, y 1034 = 41 %), en las subcuencas intermedias del 50 % IC-(1031 = 35 %, 1033 = 56 %, 1035 = 55 %, y 1036 = 55 %) y, la cuenca costera DC-1037 del 64 %.

Posteriormente, el BFI se reduce en promedio un 30 % en la cuenca del río Bueno (Tabla 4.8), consistente a los indicadores previos. Las subcuencas intermedias (IC) y costera (DC) presentan los mayores efectos adversos, llegando proyectar bajas del 60 %. A partir de los resultados del índice es posible aducir futuros problemas en los niveles de aguas subterráneas, los cuales pueden asociarse a los cambios de permeabilidad del suelo, revelando la geología impermeable con baja o mediana capacidad de infiltración y captación de las subcuencas (CIREN, 2012, 2019).

Tabla 4.8 Variación fraccional del Índice de Flujo Base, período 1985/2015 y 2030/2060.

Modelo/BNA	UC-1030	IC-1031	UC-1032	IC-1033	UC-1034	IC-1035	IC-1036	DC-1037
C4	-0.12	-0.11	-0.17	-0.43	-0.32	-0.30	-0.31	-0.59
C3.6	-0.13	-0.11	-0.16	-0.47	-0.31	-0.31	-0.32	-0.60
IC5	-0.13	-0.10	-0.17	-0.43	-0.32	-0.29	-0.30	-0.55
ME	-0.15	-0.11	-0.15	-0.44	-0.29	-0.32	-0.32	-0.56

La Tabla 4.9 muestra el cambio de la recurrencia media del SPI en el período 2030/2060 en la cuenca del río Bueno, el detalle por subcuenca se presenta en el Apéndice C, apartado C.3; Tablas C.10 a C.13. Desde lo macro a lo micro, el total de meses con $SPI-1, 3, 6,$ y $12 < 0$, de acuerdo con los modelos C4 y ME presentan una variación porcentual positiva del 2 % al 21 %; el modelo C3.6 disminuye un 3 % la cantidad de meses registrados con $SPI-1$ y, aumenta en 6 %, 22 %, y 44 % los meses de $SPI-3, 6,$ y 12 . Con relación al modelo IC5, los resultados muestran disminuciones del 6 % en las condiciones de sequías meteorológicas e incipientes agrícolas, y aumentos del 9 % en las sequías hidrológicas.

Luego, el análisis por subcuenca indica que la incidencia del cambio climático difiere entre las subcuencas del río Bueno, por ejemplo, desde un 5 % a 40 % son proyectados los aumentos de sequías meteorológicas, agrícolas e hidrológicas de carácter leve con el modelo C4, mientras que las sequías moderadas se reducen en un 30 % en el caso del $SPI-1$ o aumentan hasta un 120 % con el $SPI-12$.

Tabla 4.9 Variación fraccional de la frecuencia del Índice de Precipitación Estandarizado, entre 1985/2015 y 2030/2060. Se presenta la variación de la frecuencia absoluta y relativa media ($\Delta\bar{n}_i$ y $\Delta\hat{f}_i$) del índice, en la cuenca del río Bueno.

Mod.	Índice	Δ Frecuencia absoluta media, $\Delta\hat{n}_i$				Δ Frecuencia relativa media, $\Delta\hat{f}_i$			
		Leve	Moderada	Severa	Extrema	Leve	Moderada	Severa	Extrema
C4	SPI-01	0,13	-0,26	0,19	0,14	0,51	-0,26	0,19	0,14
	SPI-03	0,15	-0,13	0,14	-0,09	0,15	-0,13	0,14	-0,09
	SPI-06	0,17	-0,01	0,10	-0,43	0,17	-0,01	0,10	-0,43
	SPI-12	0,19	0,58	-0,16	-0,43	0,19	0,58	-0,16	-0,43
C3.6	SPI-01	0,07	-0,22	0,08	0,77	0,42	-0,22	0,08	0,77
	SPI-03	0,17	-0,21	0,21	-0,23	0,17	-0,21	0,21	-0,23
	SPI-06	-0,04	0,33	0,39	-0,60	-0,04	0,33	0,39	-0,60
	SPI-12	-0,10	1,14	0,28	-0,70	-0,10	1,14	0,28	-0,70
IC5	SPI-01	0,05	-0,21	-0,03	0,55	0,40	-0,21	-0,03	0,55
	SPI-03	0,22	-0,24	0,02	-0,04	0,22	-0,24	0,02	-0,04
	SPI-06	0,19	-0,04	-0,04	-0,36	0,19	-0,04	-0,04	-0,36
	SPI-12	0,19	0,35	-0,28	-0,34	0,19	0,35	-0,28	-0,34
ME	SPI-01	0,06	-0,23	0,30	0,28	0,42	-0,23	0,30	0,28
	SPI-03	0,05	-0,02	0,05	0,07	0,05	-0,02	0,05	0,07
	SPI-06	-0,02	0,11	-0,02	0,02	-0,02	0,11	-0,02	0,02
	SPI-12	-0,08	0,57	-0,14	-0,10	-0,08	0,57	-0,14	-0,10

La Figura 4.18 muestra la severidad acumulada con relación a la duración de los eventos proyectados según el SPI, en las escalas temporales de uno, tres, seis y doce meses. Los resultados del SPI-1 manifiestan sequías meteorológicas con duraciones de dos a tres meses y de grado bajo-moderado. Con relación a la frecuencia del SPI-1, los GCM coinciden en las sequías de condición leve, moderadas, y severas, reportando las condiciones una vez cada tres meses, cada doce meses y cada dos años, respectivamente.

Luego, el SPI-3 entrega una duración media de cuatro a cinco meses con períodos máximos de 18 a 25 meses, donde sequías leves y moderadas se reportan con la misma frecuencia que el SPI-1. Por otro lado, las sequías severas (extremas) con los modelos C4 y C3.6 se presentan una vez por cada 1,5 (5) años, mientras que los resultados de IC5 y ME indican una frecuencia relativa de sequías severas (extremas) una vez por cada 1,8 (4,5) años.

La duración media de las sequías agrícolas con la evaluación del SPI-6 es de cuatro meses, donde las condiciones leves (moderadas) poseen una frecuencia relativa de una vez cada 3 (12) meses, de acuerdo con los GCM. Las condiciones severas varían desde una vez por cada 1,5 a 2 años según cada GCM, y las condiciones extremas se presentan una vez por cada 3 años con el modelo ME, y cada 4, 5, y 7 años con los modelos IC5, C4 y C3.6.

En cuanto a las sequías hidrológicas, para el SPI-12 se proyectan períodos de aridez de hasta 48 meses con el modelo IC5 y de 35-36 meses con C4, C3.6 y ME. Si bien la severidad del SPI-12 es baja-moderada (Figura 4.18), la severidad de los eventos con duraciones superiores

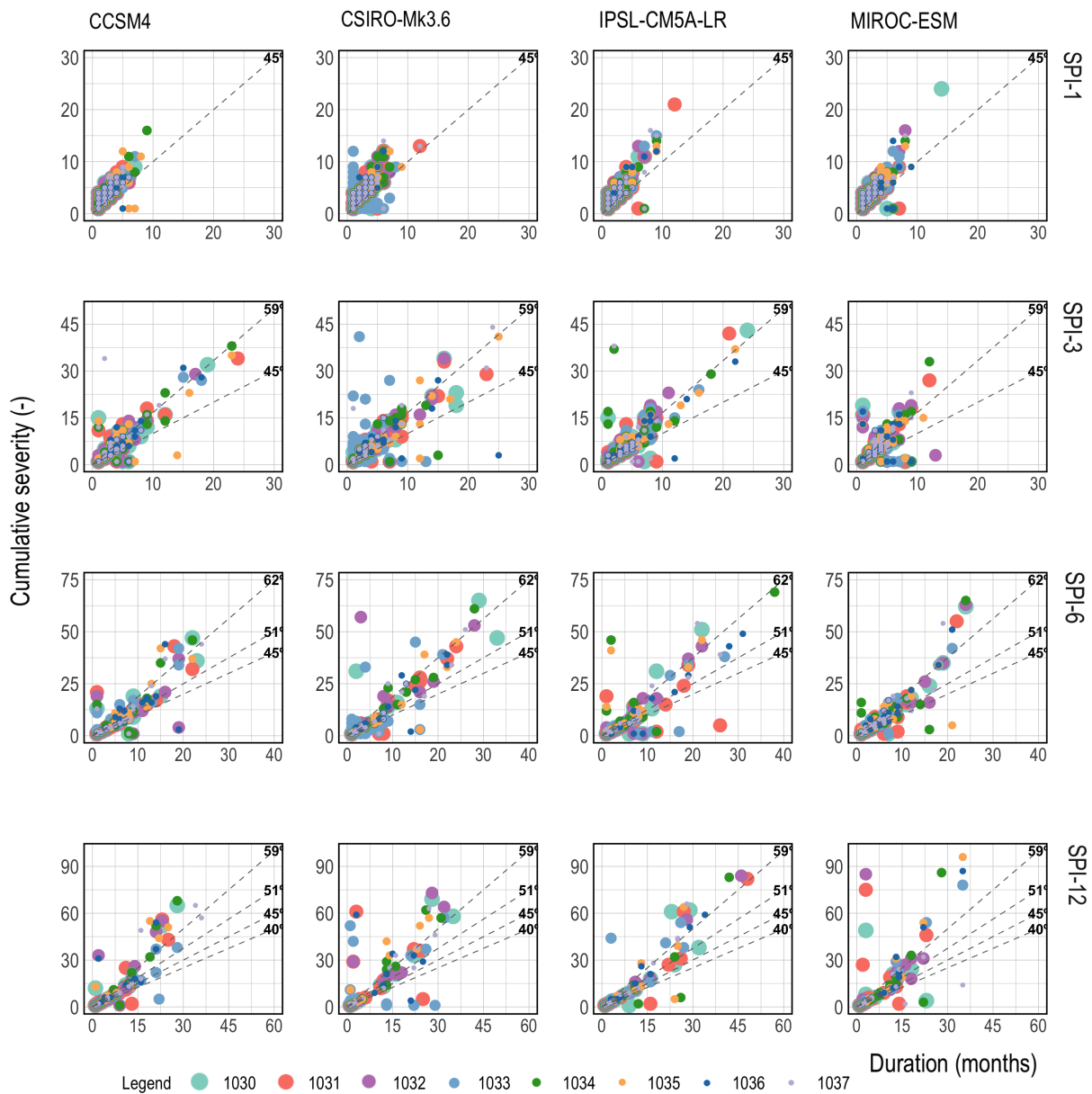


Figura 4.18 Severidad acumulada y duración consecutiva (meses), de acuerdo con la proyección 2030/2060 del Índice de Precipitación Estandarizado.

a diez meses es categorizada como moderada-extrema debido a la acumulación del déficit hídrico.

Posteriormente, el análisis del PDSI indica que el 50 % del tiempo del período 2030/2060 se presentan sequías incipientes con los modelos C4 e IC5 ($p_{exc} = 0,5$; Tabla C.14). Los extremos áridos expresados por la probabilidad de excedencia del 90 %, quedan en el rango $-3,0 < PDSI < -2,1$, los valores mínimos en $-5,3$ a $-4,3$ en el caso de C4 y desde $-6,6$ a $-4,7$ con el modelo IC5, donde los rangos de variación dependen de la subcuenca analizada. Por otro lado, el modelo ME entrega condiciones de sequía leve para la mitad del tiempo y condiciones de extrema sequedad en el punto $p_{exc} = 0,9$, donde los mínimos registrados oscilan

desde $-6,9$ a $-4,9$. Por último, el modelo C3.6 muestra ligeros aumentos de las condiciones húmedas en la zona media de la curva ($p_{exc} = 0,5$), no así en la zona baja, donde también son apreciables condiciones de sequía extrema, $PDSI_{min} = \{-5,1, \dots, -4,5\} \in \mathbb{R}$.

Los resultados del PHDI (Tabla C.15) difieren de condiciones de humedad entregadas por el PDSI para la mitad del tiempo en la cuenca. Los modelos C3.6 y ME muestran sequías incipientes, mientras que los modelos C4 e IC5 indican rangos normales de humedad. Respecto a la zona baja de la curva, los GCM manifiestan sequías moderadas a extremas con valores de PHDI comprendidos de $-6,9$ a $-4,3$.

Por último, el RAI muestra descensos de las condiciones húmedas en cada una de las subcuencas, siendo el único índice en presentar dicho patrón (Tabla C.16). Se observa que para la mitad del tiempo, las condiciones de humedad son moderadamente secas y para $p_{exc} = 0,9$ son extremadamente secas. Con relación al SPEI, se presenta un acuerdo en frecuencia y duración de los eventos proyectados con el SPI.

4.3.3. Síntesis

Los indicadores Q50, Q95, LDP, DD e índices BFI, SPI y SPEI ratificaron los dos eventos de sequía registrados en el período 1985/2015. El evento de 1998/1999 proviene de una sequía meteorológica ($SPI-1_{dur} = 13$ meses), la cual se desarrolla en una sequía agrícola severa ($SPI-3_{dur} = 19$ meses y $SPI-6_{dur} = 23$ meses) y, sequía hidrológica extrema, con una duración promedio de 25 meses, según el índice SPI-12. De igual forma, la sequía de 2007/2008 presenta un déficit meteorológico, agrícola e hidrológico, pero con una duración de trece meses y severidad moderada.

El período histórico registra tres eventos adicionales de sequía en la cuenca del río Bueno (1988/1990, 1996/1997 y 2010/2014). El primer y segundo evento evidencian déficits meteorológicos, agrícolas e hidrológicos; sin embargo, la sequía de 1988/1990 tiene una severidad moderada, mientras que la sequía de 1996/1997 es de grado extremo. Por otro lado, el período 2010/2015 presenta intervalos de déficits hídricos severos-extremos, desde cuatro a dieciocho meses, los que se ven acrecentados por sequías estivales que presenta la cuenca durante el período octubre-marzo. Tomando como referencia el punto anterior, se destaca la importancia que tienen las sequías estivales en la frecuencia del Índice Estandarizado de Precipitación. Del total de meses clasificados con sequías leves y moderadas, el 30 % de cada categoría responde a sequías estivales, propias del comportamiento de la cuenca del río Bueno.

Con respecto al período 2030/2060, el 85 % de los días se proyectan como secos. El indicador DD presenta un aumento del 13 % en la cantidad de días con precipitación menor a 1 mm, en relación con el período histórico. Por consiguiente, los días secos se manifiestan el 66 % del tiempo del período 2030/2060 (el 19 % restante de días secos se representa por el indicador DD10).

Luego, los caudales medios (Q_{50}) y bajos (Q_{min} , Q_{p10} , y Q_{95}) se reducen conforme aumenta la longitud de las subcuencas (desde aguas arriba hacia aguas abajo, ver Figura 3.2). En otras palabras, el caudal de las subcuencas cordilleranas (UC) disminuye menos en relación con las subcuencas intermedias (IC) y costera (DC). De forma general, Q_{min} disminuye entre un 54 % a 81 %, Q_{95} varía desde un 37 % a 64 %, Q_{p10} desde un 38 % a 56 %, y Q_{50} presenta

una menor variación entre 13 % a 18 % en las subcuencas del río Bueno.

Finalmente, la proyección del Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) revela la probabilidad de ocurrencia de cuatro sequías hidrológicas moderadas-extremas, con duraciones mínimas de 20 meses y máximas de 36, 35, 48, y 35 meses de acuerdo con los modelos CCSM4, CSIRO-Mk3.6, IPSL-CM5A-LR, y MIROC-ESM.

En términos generales de frecuencia, duración y severidad, las sequías meteorológicas leves, severas, y extremas aumentan un 10 %, 13 %, y 43 %, respectivamente. Las sequías agrícolas leves (severas) aumentan un 16 % (14 %), mientras que las sequías moderadas (extremas) disminuyen un 12 % (20 %). Por último, las sequías hidrológicas leves (moderadas) varían positivamente en un 20 % (60 %), en comparación al período histórico.

4.4. Relación entre eventos extremos y calidad del agua. HachM, un modelo hidro-estadístico para el estudio, análisis y proyección de la calidad del agua

En las siguientes secciones se presenta el análisis químico de la calidad del agua en la cuenca del río Bueno, durante la línea base (1990/2015), y se define el nivel o grado de potabilización que tienen los ríos, atendiendo al *Instructivo Presidencial* para la Dictación de Normas Secundarias de Calidad Ambiental para Aguas Continentales Superficiales (CONAMA, 2003).

Posteriormente, se construyen, diseñan, y desarrollan los Índices de Calidad de Agua Potable y de Riego (DWQI e IWQI por sus siglas en inglés). El primero está enfocado en el uso/consumo de agua potable, bajo las directrices principales de la Norma Chilena 409 (INN, 2005). El segundo evalúa el recurso destinado a riego, en consideración a la Norma Chilena 1.333 (INN, 1987) y la *Guía para la Elaboración de Normas Secundarias de Calidad Ambiental en Aguas Continentales y Marinas* (MMA, 2017).

Finalmente, se presenta el diseño y construcción del modelo *Hydrology and chemistry of water quality* (HachM). Se exponen los resultados de calidad del agua del período histórico, y el cambio de la calidad del agua asociado a las proyecciones climáticas.

4.4.1. Calidad del agua en la línea base

Del total de parámetros químicos medidos por la Dirección General de Aguas (DGA), se seleccionan veintisiete parámetros químicos debido a la extensión temporal de cada uno. Para el análisis, se consideran los requerimientos de la Norma Chilena 409/1 (INN, 2005), la Norma Chilena 1.333 (INN, 1987), las *Guías de calidad del agua potable, 4^{ta} edición*, desarrolladas por la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2011), entre otros documentos consultados.

4.4.1.1. Caracterización química de los ríos

El análisis químico se realiza principalmente con relación a la Norma Chilena 409/1 (INN, 2005). Por consiguiente, si un parámetro químico excede la norma, no necesariamente significa que el agua no es apta para potabilizar, sino que no cumple con la norma para su consumo directo; es decir, el agua debe tener un tratamiento antes de ser destinada al uso/consumo de agua potable. Además, es utilizada la Norma Chilena 1.333 (INN, 1987), para evaluar aquellos parámetros que no se encuentren normados por la NCh409/1 (e.g., CE, OD, T_a) y, los valores de referencia del documento *Guías de calidad del agua potable, 4^{ta} edición* (WHO, 2011).

En las Tablas D.2 y D.3 se presentan los estadísticos (media, mediana, desviación estándar y número de muestras) de los parámetros químicos seleccionados. El cadmio (Cd), hierro (Fe), y mercurio (Hg), exceden o igualan los límites máximos permisibles de la NCh409/1. Por otro lado, el aluminio (Al) y boro (B), superan los valores de referencia de las *Guías de calidad del agua potable* (WHO, 2011).

Los parámetros restantes presentan concentraciones bajo los límites máximos permisibles. No obstante, las Figuras D.1 a D.4, muestran que los parámetros PO_4^{3-} , Na, NO_3^- , Mg, y Mn, presentan valores outliers. De forma excepcional, en los años 2006 y 2007, se registran concentraciones de nutrientes, PO_4^{3-} y NO_3^- , entre 2,17 a 6,76 mg/L y 1,23 a 6,97 mg/L, respectivamente.

4.4.1.2. Límites de detección (LD)

El límite de detección (LD) se determina para cada parámetro químico obtenido como resultado de laboratorio, cuando sostenidamente se repite el valor, el parámetro debe ser descartado de posteriores análisis de calidad de agua. En las Figuras D.1 a D.4 se analizan los LD de los parámetros físicos y químicos, parámetros inorgánicos, y elementos (no-) esenciales en la cuenca del río Bueno.

Los resultados indican que el arsénico ($\text{As} < 0,001 \text{ mg/L}$), cadmio ($\text{Cd} < 0,01 \text{ mg/L}$), plata ($\text{Ag} < 0,01 \text{ mg/L}$), plomo ($\text{Pb} < 0,01 \text{ mg/L}$), selenio ($\text{Se} < 0,001 \text{ mg/L}$), y zinc ($\text{Zn} < 0,01 \text{ mg/L}$), se repiten permanentemente como resultado del análisis de laboratorio. Por lo tanto, estos parámetros quedan excluidos de posteriores análisis de la calidad del agua de la cuenca.

4.4.1.3. Análisis de potabilización

El nivel de potabilización del agua natural se determina mediante las clases de calidad de la Tabla D.1; extraídas y adaptadas del *Instructivo Presidencial*, para la Dictación de Normas Secundarias de Calidad Ambiental para Aguas Continentales Superficiales (CONAMA, 2003). La Tabla D.4 expone los resultados cualitativos de la calidad de agua natural de los ríos de las subcuencas.

De acuerdo con los resultados, los ríos de las subcuencas cordilleranas e intermedias presentan calidades similares. En clase excepcional, se encuentra el Cl⁻, CE, Cr, Fe, Mn, OD, SDT, y SO_4^{2-} . En clase 1 –particularmente– el Mn en la subcuenca IC-1036; en clase 2, el Cu, Mo, y Mn en la subcuenca IC-1035. En clase 3, el Al; y en clase 4, el B, y Hg.

Las aguas que contengan parámetros químicos clasificados en la clase 4, indican que el agua no es adecuada para la conservación de comunidades acuáticas, ni para usos prioritarios, **sin perjuicio de su utilización en potabilización con tratamiento apropiado o uso industrial**. En el Apéndice D, sección D.2 se presentan las principales características y perjuicios de los parámetros clasificados en clase 4.

Con relación al pH, la Figura 4.19 muestra las variaciones del indicador según la temporada evaluada. En términos generales, el pH se mantiene en el rango óptimo (6,5 a 8,5), de acuerdo con la NCh409/1 (INN, 2005). El pH más ácido se presenta en las temporadas frías (otoño-invierno), con mínimos registrados de 5,29 y 3,74 en las subcuencas IC-1035 e IC-1036, respectivamente. Por otro lado, el pH avanza a condiciones alcalinas con el aumento de lluvias y temperaturas, siendo 9,91 y 9,12 los máximos registrados en las subcuencas IC-1031 y UC-1032.

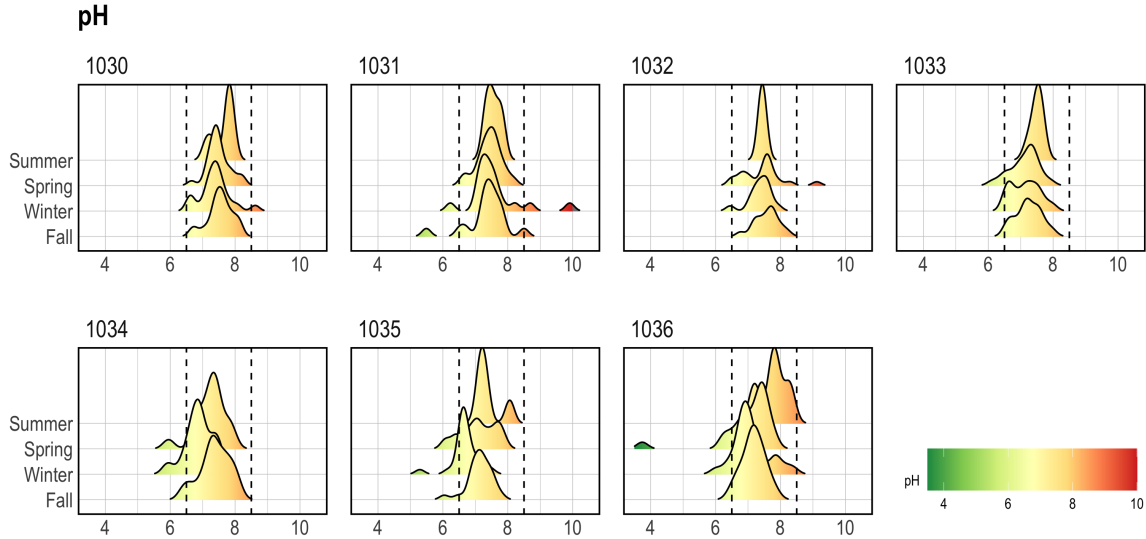


Figura 4.19 Histogramas de variación estacional del pH. Las líneas punteadas denotan los límites máximos permitidos para el pH (6,5 - 8,5) de acuerdo con la NCh409/1 INN (2005). Se presentan las temporadas de otoño (fall), invierno (winter), primavera (spring) y verano (summer).

Posteriormente, la Figura D.5 muestra la correlación del ortofosfato (PO_4^{3-}) y nitrato (NO_3^-), con relación a la temperatura del agua (T_a). Los resultados indican que no hay una correlación significativa entre los nutrientes y la temperatura, pero es factible apreciar la relación inversamente proporcional del PO_4^{3-} y NO_3^- .

De la misma figura, se refleja que las concentraciones de PO_4^{3-} exceden el límite para la conservación de un estado oligotrófico, de acuerdo con los límites establecidos en la *Guía para la Elaboración de Normas Secundarias de Calidad Ambiental en Aguas Continentales y Marinas* (MMA, 2017). Específicamente, los ríos de las subcuencas UC-1030, UC-1032, e IC-1035 presentan una transición de estado oligotrófico a mesotrófico. De acuerdo con la Figura 3.2, el río Rahue (en el sector de la subcuenca IC-1036) y su tributario, el río Negro (subcuenca IC-1035), presentan descargas de ESSAL. El análisis de la Figura D.5, revela que el río Rahue presenta altas concentraciones de PO_4^{3-} , identificando una de las características de ríos eutróficos.

Con relación a las concentraciones de nitratos, los valores se ubican bajo el límite oligotrófico. La presencia de outliers puede deberse a la aplicación excesiva de fertilizantes, o a la filtración de aguas residuales u otros residuos orgánicos en las aguas superficiales y subterráneas.

El diagrama de la Figura 4.20 muestra las relaciones de los ríos efluentes y afluentes, indicándose los factores naturales incidentes en la calidad del agua y los principales usos del agua de las subcuencas. Además, se presentan los posibles cambios tróficos de los ríos,

de acuerdo con los resultados de la caracterización química, los estudios de DGA (2011) y Zelada (2017). Desde el diagrama se infiere que el principal problema de contaminación son las altas concentraciones de nutrientes, producto de las descargas de pisciculturas y plantas de tratamiento.

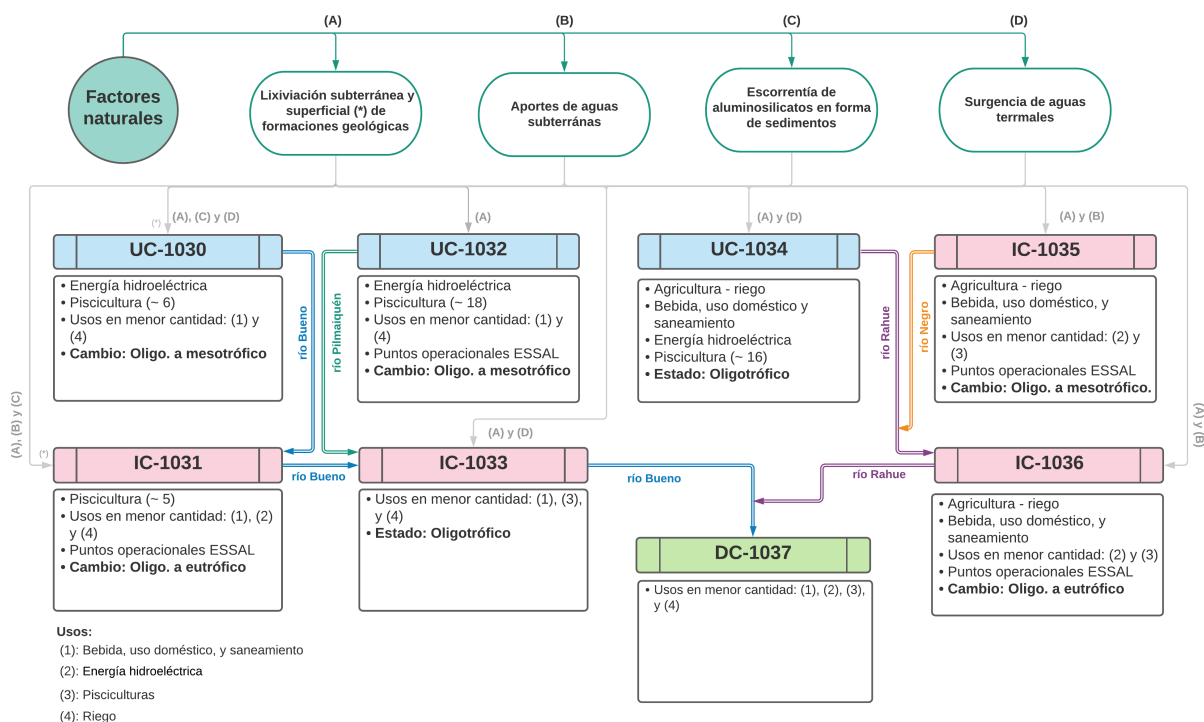


Figura 4.20 Factores naturales, usos del agua y estado trófico de los ríos de las subcuencas del río Bueno. La construcción del diagrama considera la información del presente documento y, aquella consultada en DGA (2004), *Consulta DGA, diciembre 2020*, y *Snifa-Catastro de Unidades Fiscalizables, mayo 2021*.

En consecuencia, la calidad del agua superficial en las subcuencas del río Bueno es *buena*, según la clasificación de calidad de la Tabla D.4. Sin embargo, las actividades agropecuarias y servicios sanitarios –debido a las descargas de nutrientes– comprometen la calidad del agua destinada a usos prioritarios (e.g., captación para bebida y uso doméstico).

Concerniente a la potabilización del agua, los ríos son aptos para dicha actividad con el tratamiento apropiado. La mayoría de los parámetros químicos son clasificados en clase excepcional, sin embargo, el B, Hg, Al, Cu, y Mo, se clasifican en clase 2, 3 o 4.

4.4.2. Uso y desarrollo de los WQI para el análisis de la calidad de agua en la línea base

El concepto *uniqueness of place*, analizado bajo el enfoque hidrológico de Beven (2000), indica que cada lugar es único y presenta singularidades que los modelos muy escasamente pueden representar. La calidad del agua, alterada por factores naturales y antropogénicos (Tunc Dede *et al.*, 2013; Kachroud *et al.*, 2019), es una de las singularidades de cada cuenca.

La toma de decisiones metodológicas para definir la calidad del agua de un cuerpo fluvial o lacustre es un proceso subjetivo. Diversas son las normas, guías, y/o lineamientos nacionales e internacionales que indican (a modo de sugerencia) las concentraciones máximas permitidas (dependiendo del uso) de contaminantes que afectan el recurso.

El Índice de Calidad de Agua (WQI, Horton (1965)), surge como una herramienta de evaluación general de la calidad del agua (sección 3.2.5). A continuación, se presenta el diseño y construcción de dos índices de calidad del agua, enfocados en usos particulares del recurso, (1) el uso/consumo de agua potable (aquella destinada a potabilización), y (2) el uso agrícola (i.e., riego). Los índices se identifican con los acrónimos DWQI e IWQI.

4.4.2.1. Selección de parámetros

El desarrollo de modelos de calidad de agua se realiza sobre la base de parámetros químicos, medidos y calculados en laboratorio por la DGA. Posteriormente, la información se solapa con un subconjunto de parámetros incluidos en el *Instructivo Presidencial*, para la Dictación de Normas Secundarias de Calidad Ambiental para Aguas Continentales Superficiales (CONAMA, 2003), la Norma Chilena 409 (INN, 2005), la Norma Chilena 1.333 (INN, 1987), las ordenanzas dictaminadas por la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2011), y recomendaciones de expertos en calidad del agua (e.g., Dunnette (1979); Cude (2001); European Council (1991); Boyacioglu (2007); Lumb *et al.* (2011)).

Se incluyen parámetros físicos y químicos, parámetros inorgánicos, y metales (no-) esenciales. La selección considera los parámetros que se ven alterados por intervención antrópica y/o generan efectos perjudiciales en la salud. Los parámetros seleccionados se identifican en las secciones 4.4.2.2 y 4.4.2.3.

Los parámetros **no seleccionados** responden a las siguientes razones:

- Parámetros sin registro en la cuenca (e.g., color, CN^- , DBO, F^- , NH_4^+ , y SST).
- Parámetro medido, pero con problema de límite de detección (e.g., Ag, As, Cd, Pb, Se, y Zn).

4.4.2.2. Índice de Calidad de Agua de Potable (DWQI)

El DWQI evalúa la calidad del agua destinada al uso/consumo del agua potable en Chile. Es por ello, que la selección de parámetros se basa en aquellos parámetros críticos (tipo II y IV) publicados en la NCh409/1 (INN, 2005), además del ortofosfato, nitrato y temperatura como indicadores de requisitos ecológicos (MMA, 2017). La Tabla 4.10 muestra los parámetros seleccionados y sus respectivos pesos de importancia.

Con relación a los pesos de importancia, Khan *et al.* (2005) y Boyacioglu (2007), indican que conviene clasificar los contaminantes químicos en función de su importancia, considerando la inclusión de los más relevantes en las normas y programas de monitoreo nacional. En el caso específico del DWQI, se consideran las categorías (elementos, metales, sustancias, parámetros, etc.) indicadas en la NCh409/1 (INN, 2005), las ordenanzas de las *Guías de calidad del agua potable* (WHO, 2011), y la *Guía para la Elaboración de Normas Secundarias de Calidad Ambiental en Aguas Continentales y Marinas* (MMA, 2017).

Tabla 4.10 Selección y pesos de importancia del DWQI.

Categoría	Elemento	Unidad	Límite máximo	Peso asignado	Ponderación
Elementos (no-) esenciales *	Cu	mg/L	2,00	3	0,08 $\bar{3}$
	Cr	mg/L	0,05	3	0,08 $\bar{3}$
	Fe	mg/L	0,30	3	0,08 $\bar{3}$
	Mn	mg/L	0,10	3	0,08 $\bar{3}$
	Hg	mg/L	0,001	4	0,11 $\bar{1}$
Parámetros inorgánicos **	Cl ⁻	mg/L	400	2	0,05 $\bar{6}$
	SO ₄ ²⁻	mg/L	500	3	0,08 $\bar{3}$
	pH	-	6,5 - 8,5	2	0,05 $\bar{6}$
	SDT	mg/L	1500	3	0,08 $\bar{3}$
Requisito ecológico ***	PO ₄ ³⁻	mg/L	0,025	4	0,11 $\bar{1}$
	NO ₃ ⁻	mg/L	0,7	4	0,11 $\bar{1}$
	T _a	°C	Δ3	2	0,05 $\bar{6}$

*Categoría Tipo II de la NCh409/1 (INN, 2005).

**Categoría Tipo IV de la NCh409/1 (INN, 2005).

***Límites limnológicos MMA (2017) y requisitos generales de aguas destinadas a vida acuáticas, NCh1333 (INN, 1987).

La generación de los subíndices sigue la metodología empleada por Cude (2001), asignando curvas de regresión no lineal a los parámetros seleccionados (Apéndice E, sección E.1). Cada subíndice es convertido a una escala de calidad relativa donde el rango 0 a 39 representa un agua pobre en calidad y desde 95 a 100 es lo ideal, indicando una calidad del agua excelente. Por último, la agregación del índice se realiza con la ecuación 3.4.

La calidad del agua natural destinada al uso/consumo de agua potable, según el DWQI puede ser *excelente* (95 a 100), *buena* (75 a 94), *regular* (60 a 74), *marginal* (40 a 59), y *pobre* (0 a 39). Se aplica una clasificación conservadora, en consideración a la falta de información de parámetros químicos perjudiciales en la salud humana (e.g., As, CN⁻, F⁻, *E. coli*), y las opiniones de expertos en calidad del agua.

4.4.2.3. Índice de Calidad de Agua de Riego (IWQI)

En Chile, la Norma Chilena 1.333 (INN, 1987) indica los requisitos de las aguas destinadas a diferentes usos, entre ellos, el riego. A modo de sugerencia, la norma establece las concentraciones máximas permitidas de elementos químicos, orgánicos y/o microbiológicos que puede contener el recurso. No obstante, la norma no es obligatoria, por lo cual no existe (ni debe existir) un ente fiscalizador que regule el recurso hídrico destinado a riego.

Sin perjuicio de lo anterior, se crea y diseña el Índice de Calidad de Agua de Riego (IWQI, por sus siglas en inglés), para el estudio de la calidad del agua destinada al uso agrícola. El índice considera los requisitos de la NCh1333 (INN, 1987), el *Instructivo Presidencial* para la Dictación de Normas Secundarias de Calidad Ambiental para Aguas Continentales Superficiales (CONAMA, 2003), y la *Guía para la Elaboración de Normas Secundarias de Calidad Ambiental en Aguas Continentales y Marinas* (MMA, 2017).

La Tabla 4.11 muestra los parámetros seleccionados y los pesos de importancia otorgados. La generación de los subíndices se realiza mediante curvas de transformación, basadas en

cuatro clases de calidad de agua (excepcional, 1, 2, 3). El Apéndice E, sección E.1 contiene las curvas de transformación y las ecuaciones aplicadas en cada subíndice. Finalmente, la agregación del índice se realiza mediante la ecuación 3.4.

Tabla 4.11 Selección y pesos de importancia del IWQI.

Categoría	Parámetro	Unidad	Límite máximo	Peso asignado	Ponderación
Requisito para riego [†]	Al ^{**}	mg/L	5,00	3	0,065
	Cl ^{***}	mg/L	200,00	2	0,043
	Cu ^{**}	mg/L	0,20	3	0,065
	Cr ^{**}	mg/L	0,10	3	0,065
	Fe ^{**}	mg/L	5,00	3	0,065
	Mn ^{**}	mg/L	0,20	3	0,065
	Hg ^{**}	mg/L	0,001	4	0,087
	Mo ^{**}	mg/L	0,01	2	0,043
	SO ₄ ^{2-***}	mg/L	250,00	3	0,065
	SDT ^{***}	mg/L	1500	4	0,087
Requisito ecológico ^{††}	OD _{min} [*]	mg/L	5,00	4	0,087
	pH [*]	-	6,0 - 9,0	2	0,043
	PO ₄ ^{3-***}	mg/L	0,025	4	0,087
	NO ₃ ^{***}	mg/L	0,7	4	0,087
	T _a [*]	°C	Δ3	2	0,043

* Indicadores físicos y químicos

** Metales (**no-**) esenciales

*** Parámetros inorgánicos

[†]Concentraciones máximas de elementos químicos en agua para riego. NCh1333 (INN, 1987)

^{††}Límites limnológicos MMA (2017) y requisitos generales de aguas destinadas a vida acuáticas, NCh1333 (INN, 1987).

La calidad del agua natural destinada al uso agrícola, según el IWQI puede ser *excelente* (90 a 100), *bueno* (70 a 89), *regular* (50 a 69), *marginal* (25 a 49), y *pobre* (0 a 24). La clasificación considera las clases de calidad de agua con las cuales son construidas las curvas de transformación, y las opiniones de expertos en el área.

4.4.2.4. Evaluación de WQI

El Índice de Calidad de Agua Potable (DWQI, Figura 4.21-panel superior) muestra una tendencia de calidad de agua *marginal-regular*. Las subcuencas cordilleranas UC-1032 y UC-1034 presentan la mejor calidad de agua destinada a potabilización. Por otro lado, las subcuencas intermedias IC-1035 e IC-1036 (ambas con descargas de ESSAL) presentan la más baja calidad para el mismo objetivo, en comparación a las subcuencas restantes.

Luego, los resultados del Índice de Calidad de Agua de Riego (IWQI, Figura 4.21-panel inferior), muestran una calidad de agua *regular* para el recurso destinado al uso agrícola. La evaluación del IWQI ratifica a las subcuencas cordilleranas (UC-1032 y UC-1034) como aquellas con la mejor calidad de agua superficial en la cuenca del río Bueno.

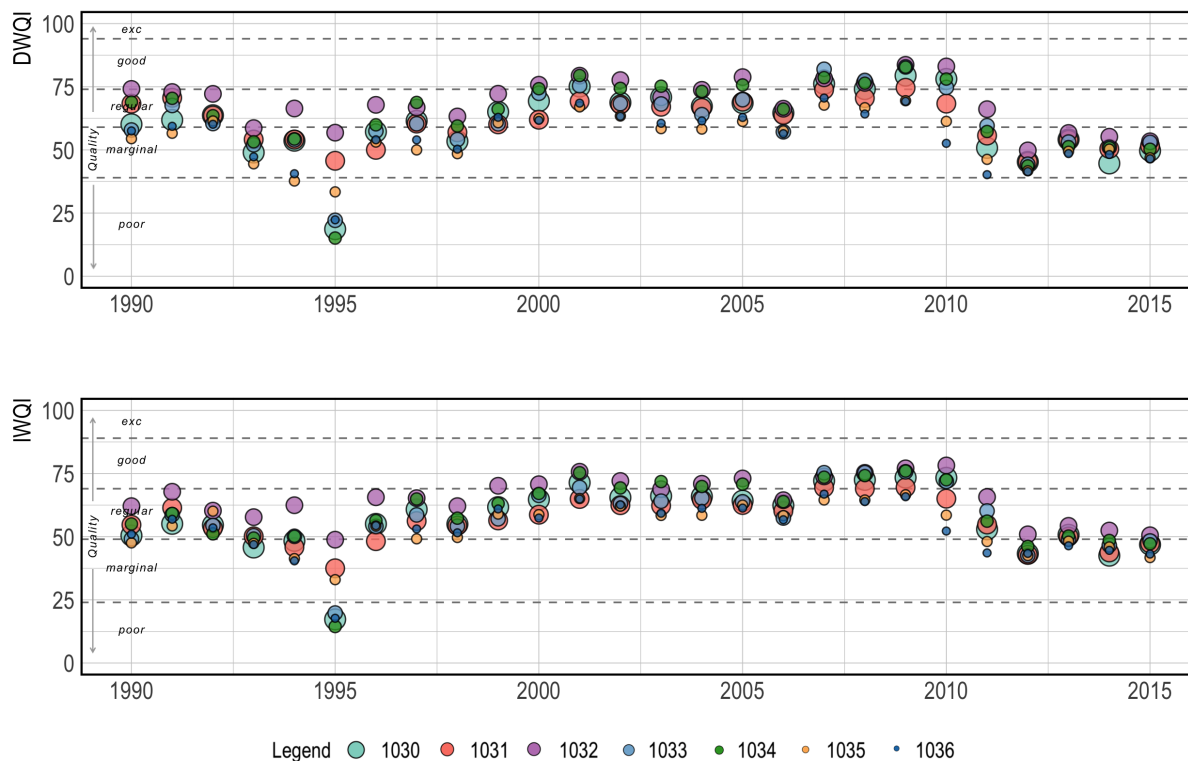


Figura 4.21 Índices de Calidad de Agua en el período 1990/2015.

Los índices tienen una variación de 13 puntos promedio en la cuenca y, los resultados de cada subcuenca varían 5 puntos promedio. El análisis por temporada indica que otoño es la temporada con los mejores niveles de calidad de agua, presentándose una calidad *buena* durante 2000/2009. Las temporadas restantes presentan muestreos puntuales (e.g., invierno en 2009/2010 y primavera en 2002) sobre el límite inferior de la calidad de agua *buena*, sin embargo, la media y mediana se clasifican en clases *marginales* y *regulares*. Los resultados del verano quedan condicionados a los escasos registros, limitándose la interpretación de los resultados.

Desde la Figura 4.21 es evidente el cambio de calidad de agua del año 1994 a 1995, o de 2010 a 2011 en adelante. El cambio responde a las alteraciones químicas del agua, las cuales se deben a la alta presencia de metales con relación a la condición normal de la cuenca (ver Tablas D.2 y D.3). Por ejemplo, los resultados de los índices de calidad de agua los años 2011 y 2012 tienen concentraciones de $Al > 3,0 \text{ mg/L}$, $Fe > 4,0 \text{ mg/L}$, $CE > 100 \text{ mg/L}$ y cambios de temperatura superiores a 4° C .

4.4.2.5. Análisis crítico de los índices de calidad de agua

El DWQI permite interpretar la calidad del agua destinada a la potabilización para el uso/consumo de agua potable en Chile, siendo relevante en la toma de decisiones destinadas al recurso hídrico. Sin embargo, la construcción del índice no considera todos los parámetros reglamentados por la NCh409/1.Of2005 (INN, 2005). Parámetros microbiológicos (e.g., *E. coli* y coliformes totales) y de turbiedad han sido descartados debido a su inexistente registro

en las estaciones de calidad. Por el mismo motivo, los elementos radiactivos y parámetros organolépticos -físicos- (color, olor y sabor) quedan excluidos. También quedan fuera de la construcción del índice, determinados elementos o sustancias químicas de importancia para la salud (e.g., As, Cd, CN⁻, F⁻, Pb, Se y Zn) debido a su falta de registro o falla en el límite de detección.

Para ejemplificar la relevancia del DWQI en la toma de decisiones, se presenta el caso de dos cuencas ficticias A y B, la primera tiene un valor de DWQI = 85 (*calidad buena*), mientras que la cuenca B tiene un valor igual a 30 (*calidad pobre*). Esto implica que el costo de potabilizar el agua en la cuenca A será menor en la cuenca B. Lo anterior puede deberse a la baja presencia de contaminantes en la cuenca A, o su alta capacidad de dilución frente a una misma concentración de contaminantes en comparación a la cuenca B. Además, con el concepto *uniqueness of place* se recuerda la singularidad de cada lugar, por lo tanto las actividades antrópicas como las fuentes de contaminación naturales pueden ser por sí solas los factores que enaltecen el costo de potabilización del agua (el que debe ser cancelado por cada usuario de acuerdo con su consumo en m³).

Nota 2: En Chile las empresas sanitarias mantienen una tarifa diferenciada para el agua potable y saneamiento entre las diversas ciudades. Los costos más elevados en US\$/m³ según las capitales regionales del país, se presentan en Coyhaique (3,43; Aguas Patagonia), Antofagasta (3,10; Aguas de Antofagasta), Copiapó (3,05; Aguas Chañar), Iquique (2,61; Aguas del Altiplano), Punta Arenas (2,52; Aguas Magallanes), Puerto Montt (2,39; ESSAL) y Valparaíso (2,21, ESVAL) (*Consulta tarifas SISS-reporte 2019, junio 2021*).

Por otro lado, el IWQI se calcula con base en la NCh1333 (INN, 1987), y permite tomar decisiones del recurso hídrico destinado a actividades agrícolas. Hoy en día, Chile no cuenta con una herramienta o ente gubernamental que regule y/o fiscalice el agua empleada a riego, desde ahí surge la importancia de la creación del IWQI.

Al igual que el DWQI (Tabla 4.10), el IWQI está condicionado a los parámetros químicos seleccionados (Tabla 4.11), siendo indicadores físicos y químicos, metales (no-) esenciales y parámetros inorgánicos. Por consiguiente, su interpretación debe realizarse teniendo presente los parámetros químicos no incluidos por el índice (e.g., Al, As, Cd, CN⁻, F⁻, Ag, Pb, entre otros).

En términos de similitud, ambos índices de calidad incluyen requisitos ecológicos (NO₃⁻, PO₄³⁻ y T_a), con el objetivo de evaluar el estado y los posibles cambios tróficos de los cuerpos de agua (oligotrófico a mesotrófico a eutrófico a hipertrófico).

Por último, se señala la importancia de los índices de calidad de agua en el marco de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (Ods), donde el objetivo 6 busca garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua —además— el saneamiento para todos (más detalles del ODS 6 en el siguiente [link](#)).

4.4.3. Construcción, diseño y desarrollo del modelo *Hydrology and chemistry of water quality* (HachM)

Las siguientes subsecciones muestran el paso a paso de la construcción y desarrollo del modelo *Hydrology and chemistry of water quality* (HachM). En primer lugar, se estudia la correlación de los parámetros químicos con las variables hidroclimáticas. Luego, son seleccionadas las variables predictoras para su uso en la predicción de los WQI. Finalmente, se aplica HachM en tres períodos de entrenamiento y testeo.

4.4.3.1. Correlación de parámetros químicos y variables hidroclimáticas

Los resultados de la correlación de Pearson (\hat{r}) y de Spearman (ρ) se presentan en el Apéndice E, sección E.2. Como caso de estudio, la Figura 4.22 muestra las correlaciones altas de Pearson ($\hat{r} \geq |0,5|$) de los parámetros químicos y de las variables hidroclimáticas de la subcuenca cordillerana UC-1030.

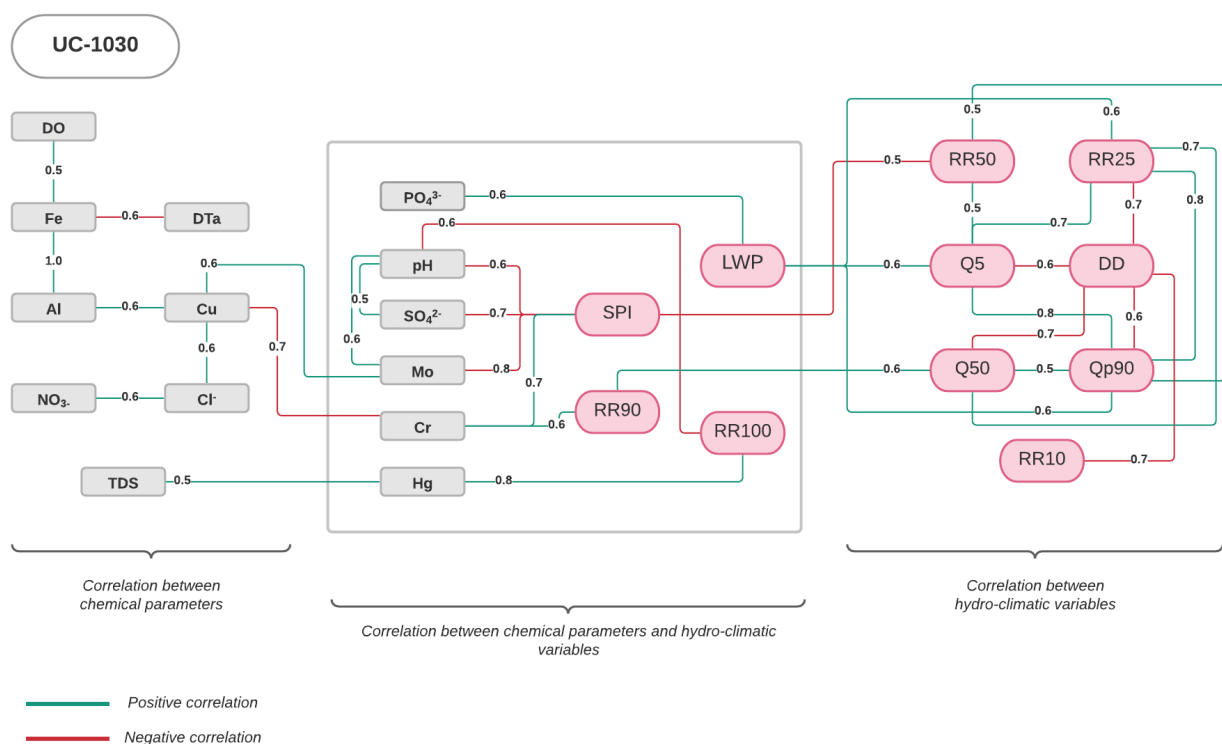


Figura 4.22 Correlación alta de Pearson en la subcuenca UC-1030. El diagrama muestra la correlación de los parámetros químicos (utilizados en la construcción del DWQI e IWQI) y de las variables hidroclimáticas (representantes de eventos extremos).

De acuerdo con la figura, los indicadores RR90, RR100 y LWP (representantes de condiciones extremas húmedas) se correlacionan positivamente con el cromo (Cr), mercurio (Hg) y ortofosfato (PO_4^{3-}), respectivamente. Mientras que el SPI-12 (desde ahora SPI), se correlaciona positivamente con el Cr, y negativamente con el pH, sulfato (SO_4^{2-}) y molibdeno (Mo).

La alta correlación de variables hidroclimáticas se presenta entre los indicadores de caudal (e.g., Q_{p90} , Q_5 , Q_{95}) y los días (no-) lluviosos (e.g., RR10, RR25, RR50, y DD). Por otro

lado, la correlación de los parámetros químicos se concentra en un nodo, el cobre (Cu).

El mismo ejercicio se aplica en las subcuencas restantes. Los resultados concuerdan en la alta correlación del SPI, DD, y RR25 con parámetros químicos, tales como Cr, Cl⁻, Al y Mo. Entre las variables hidroclimáticas el indicador Q_{p90} es el nodo principal, en conjunto a Q5 y RR25. Finalmente, la correlación de la química confluye a tres puntos principales, el molibdeno (Mo), el cobre (Cu) y cromo (Cr).

4.4.3.2. Selección de variables hidroclimáticas

Las variables hidroclimáticas seleccionadas deben cumplir tres criterios, 1) alta correlación de Pearson con parámetros químicos ($\hat{r} \geq |0,5|$), 2) el tipo de fuente de contaminación (puntual, difusa o ambas) debe representarse por el indicador seleccionado, y 3) no mantener una alta correlación con otra variable seleccionada, a fin de evitar problemas de multicolinealidad. Además, como cuarto criterio se considera la opinión de expertos en ambas áreas de estudio (i.e., calidad de agua e hidrología).

El análisis de la dependencia de los parámetros químicos (enfocados en estudios particulares de la calidad del agua), con indicadores hidroclimáticos en los puntos de salida de cada subcuenca del río Bueno, permite seleccionar un set de variables (predictores) para la construcción de HachM (Figura 4.23). A continuación, se presentan las variables seleccionadas y su respectiva relación con la calidad del agua.

1. **Índice de Precipitación Estandarizado (SPI)**: se correlaciona con indicadores físicos y químicos (pH y T_a), parámetros inorgánicos (NO₃⁻, SO₄²⁻ y SDT) y metales (Mo, Al y Cr). De estos últimos, con el Mo se correlaciona negativamente en todas las subcuencas del río Bueno. El índice es inversamente proporcional al aumento de las concentraciones de los parámetros químicos (con excepción del Cr), y permite representar las fuentes de contaminación puntuales y difusas. En relación con las variables hidroclimáticas, se correlaciona significativamente con el número de días fuertemente lluviosos (RR50).

El SPI solo depende de la precipitación media mensual (ver sección 3.2.4.1), por lo cual su alta correlación con las fuentes de contaminación difusas (Mo y Cr) responde a la lixiviación subterránea y superficial de formaciones geológicas (factor natural de contaminación en toda la cuenca, ver Figura 4.20); y en segundo lugar, a la escorrentía de aluminosilicatos (Al₂SiO₅), presente en el río Bueno desde su nacimiento hasta desembocadura. Con relación a las fuentes de contaminación puntuales, los parámetros inorgánicos proceden principalmente de las descargas residuales (IC-1031, IC-1035, e IC-1036).

2. **Período húmedo más largo (LWP)**: se relaciona con los nutrientes (PO₄³⁻ y NO₃⁻), por lo cual representa la contaminación puntual y difusa. La primera procedente de descargas industriales y residuales y, la segunda asociada a productos y/o actividades agrícolas. También presenta correlación con los metales —específicamente— Al y Cr, ambos presentes en la litología de la cuenca, por lo tanto su presencia en los ríos se debe a los aportes de aguas subterráneas y lixiviación de las mismas. Con relación al cloruro este procede de fuentes naturales, **aguas residuales y vertidos industriales**,

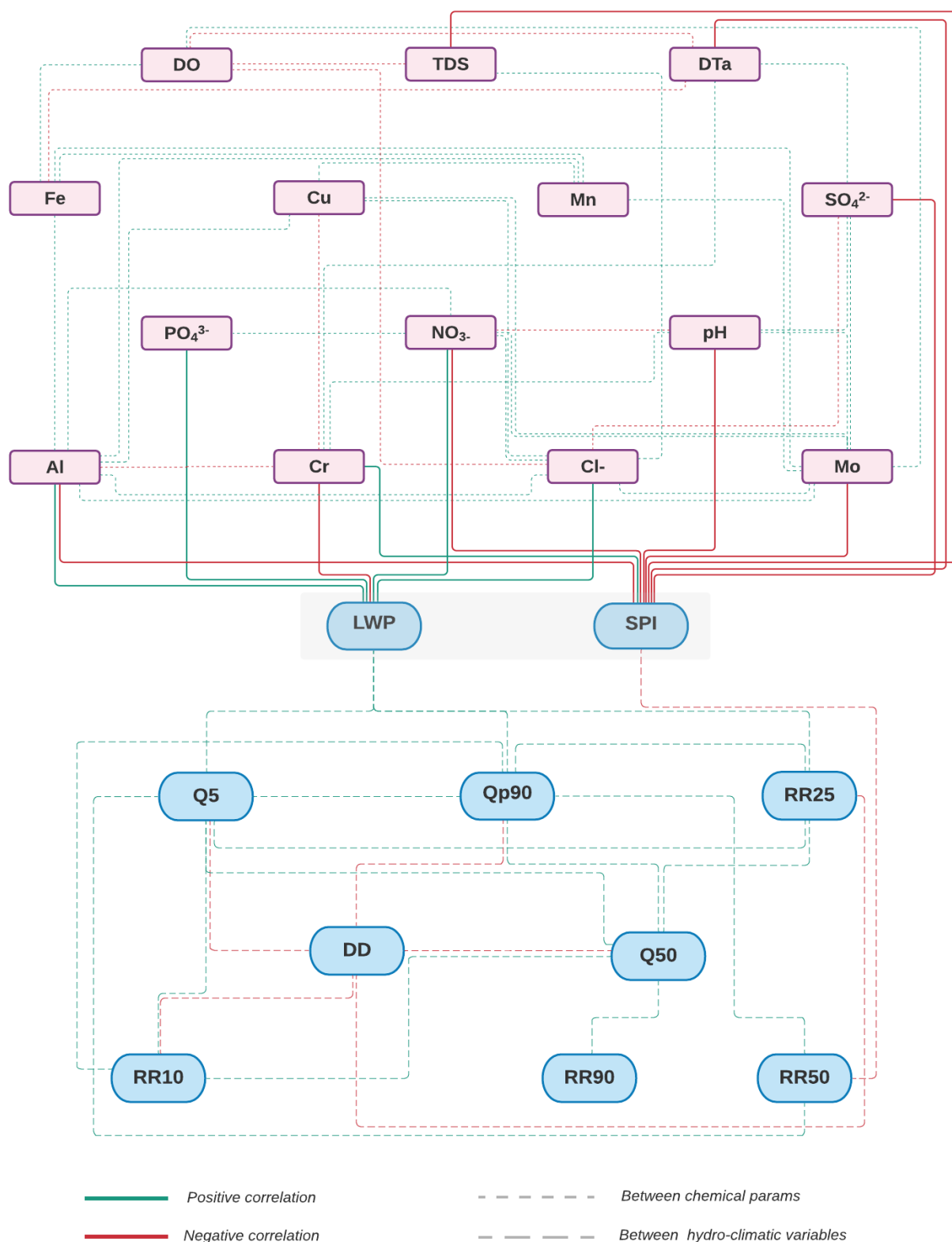


Figura 4.23 Diagrama de relación entre la calidad de agua e hidrología. Las líneas punteadas representan la correlación entre los parámetros químicos (PQ), las líneas segmentadas entre las variables hidroclimáticas (VH) y las líneas continuas entre PQ y VH.

y escorrentía urbana. El LWP mantiene dependencia positiva con indicadores altos de caudal (e.g., Q_5 y Q_{p90}) y con el número de días muy lluviosos (RR25).

4.4.3.3. Construcción estadística del modelo

HachM es un modelo hidro-estadístico, que permite representar el Índice de Calidad de Aguas (WQI, Horton (1965)), mediante indicadores e índices evaluados en eventos extremos. Se construye como un modelo de regresión lineal múltiple (Ec. 4.1), producto de la alta correlación de Pearson de parámetros químicos con variables hidroclimáticas, y la capacidad de estos últimos para representar las fuentes de contaminación puntuales y difusas que describen los contaminantes.

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 \cdot X_{1i} + \beta_2 \cdot X_{2i} + \dots + \beta_n \cdot X_{ni} + \varepsilon_i \quad (4.1)$$

donde Y es la variable endógena, X las variables exógenas. Luego, β_0 es la ordenada en el origen, el valor de la variable dependiente Y cuando todos los predictores X_i son cero, y $\beta_{i=1,2,\dots,n}$ es el efecto promedio que tiene el incremento en una unidad de la variable predictora X_i sobre la variable dependiente Y , manteniéndose constantes el resto de variables. Se conocen como coeficientes parciales de regresión, o parámetros. Y , ε es el residuo (error), la diferencia entre el valor observado y el estimado por el modelo.

De acuerdo con la selección de variables de la sección 4.4.3.2, la ecuación a modelar por HachM es:

$$WQI_i = \beta_0 + \beta_1 \cdot SPI + \beta_2 \cdot LWP + \varepsilon \quad (4.2)$$

donde $\beta_0 \in (0, 100)$; $\beta_1 \in (-30, 30)$; $\beta_2 \in (-10, 10)$; e i es el índice de calidad de agua a modelar, DWQI o IWQI.

Para interpretar correctamente HachM, se definen y estudian los períodos de *entrenamiento* (calibración) y *testeo* (validación) del modelo. En el período de entrenamiento, según se detalla a continuación, se evalúan y analizan las hipótesis básicas de todo modelo de regresión.

1. **Linealidad:** la relación entre predictando (WQI) y predictores (SPI y LWP) debe ser lineal. Para comprobarlo se estudian los *residuos en función de cada predictor*; si la relación es lineal, los residuos se distribuyen de forma aleatoria en torno a cero.
2. **Independencia** (no autocorrelación): los residuos en la medición de las variables explicativas deben ser independientes entre sí. Es decir, los valores obtenidos de una unidad experimental no deben afectar los valores obtenidos por otra. Para evaluar el supuesto de independencia, se representan los *residuos ordenados de acuerdo con la línea de tiempo de las observaciones*; si existe algún patrón en la serie hay indicios de autocorrelación.
3. **Homocedasticidad:** los residuos deben tener una varianza constante, en otras palabras, los residuos son constantes en todo el rango de observaciones. Si el supuesto no

se cumple, los resultados de las pruebas de inferencia no son confiables. Para evaluar la homocedasticidad se recurre a gráficas de dispersión de *residuos estandarizados vs predichos*. La situación óptima se obtiene cuando los residuos se distribuyen de forma aleatoria manteniendo una dispersión, sin ningún patrón específico ni datos atípicos. Un ejemplo de **no** cumplimiento (i.e., *heterocedasticidad*) es una distribución cónica, cuadrática o con valores outliers.

4. **Normalidad:** los residuos se distribuyen de acuerdo con la distribución normal. Para su evaluación se analizan los gráficos $Q - Q_{\text{plot}}$, donde se presenta la *distribución de los residuos respecto de los cuantiles teóricos de una distribución normal*. Se espera que los residuos sean cercanos a la recta; si existen desviaciones la distribución de los residuos no es normal, por tanto, no se cumple con el supuesto.
5. **No colinealidad o multicolinealidad:** las variables independientes no deben estar correlacionadas entre ellas. La correlación de Pearson y/o Spearman debe ser menor a $|0,5|$.

4.4.3.4. Calibración y validación de HachM

HachM es desarrollado y automatizado en el software R-studio, la rutina *RMarkdown* puede ser consultada en el siguiente [link](#). La calibración del modelo considera tres períodos de entrenamiento, cada uno con el 50 %, 60 %, y 70 % de las observaciones. Lo anterior se realiza para evaluar y evitar posibles problemas de sobreajuste, debido a la baja cantidad de observaciones (26 puntos). Los períodos de entrenamiento (calibración) y testeo (validación) se identifican en la Tabla 4.12.

Tabla 4.12 Casos de entrenamiento y testeo de HachM. Se presenta el porcentaje de la data y el período (años) representado por cada caso.

Caso	Calibración	Validación
T1	70 % – 1990/2007	30 % – 2008/2015
T2	60 % – 1990/2005	40 % – 2006/2015
T3	50 % – 1990/2002	50 % – 2003/2015

Los parámetros son calibrados de forma automática, HachM entrega un set de parámetros iniciales $(\beta_0, \beta_1, \beta_2)$ de acuerdo con el valor mínimo de AIC y BIC. Luego, los parámetros son ingresados al modelo para dar comienzo al ciclo de iteraciones en busca del mejor set de coeficientes de regresión, considerando la optimización de la Raíz del Error Cuadrático Media (RMSE), en otras palabras $RMSE \approx 0$. Además, se analiza el Coeficiente de determinación (R^2) y la Eficiencia de Kling-Gupta (KGE, Gupta *et al.* (2009)).

A continuación, se sintetizan los resultados de la calibración (Tablas E.1 a E.3), y se señala el cumplimiento o no cumplimiento de los supuestos de linealidad, independencia, homocedasticidad y normalidad para cada caso de análisis. En el caso de la multicolinealidad, fue considerada en la selección de variables hidrológicas (sección 4.4.3.3). Por consiguiente, los predictores SPI y LWP presentan una correlación menor a $|0,5|$, atingente al tercer requisito de selección.

- Casos T1, T2 y T3

Para **T1** la dispersión de los residuos es de 10 puntos promedio, con valores de RMSE menores a una unidad. Luego, los resultados del coeficiente de determinación (R^2) indican que HachM representa sobre 90% de la variabilidad de las observaciones. Por otro lado, los valores de KGE revelan un rendimiento muy bueno ($0,9 \leq KGE$), de acuerdo con lo postulado por Kling *et al.* (2012) y Thiemiig *et al.* (2013). En relación con los resultados de los casos de entrenamiento **T2** y **T3**, estos no difieren de **T1**, entregando valores de $RMSE < 1$, R^2 y $KGE > 0,9$.

Posteriormente, la Figura 4.24 resume los resultados de cuatro hipótesis básicas del modelo (linealidad, independencia, homocedasticidad y normalidad) para el IWQI en el período de entrenamiento **T2**. Los resultados son representativos del comportamiento general de HachM en la calibración de los índices de calidad de agua. Los diagramas de cada caso pueden ser consultados en Apéndice E, sección E.3.

De acuerdo con la figura, los residuos presentan distribuciones aleatorias en torno a cero en relación con el SPI y LWP, por lo cual HachM cumple con el supuesto de linealidad. También se cumple la independencia y homocedasticidad, la primera puesto que los residuos no reflejan patrón alguno en función de la línea de tiempo; y la segunda, dado que los residuos estandarizados se distribuyen de forma aleatoria manteniendo una dispersión, sin patrón específico.

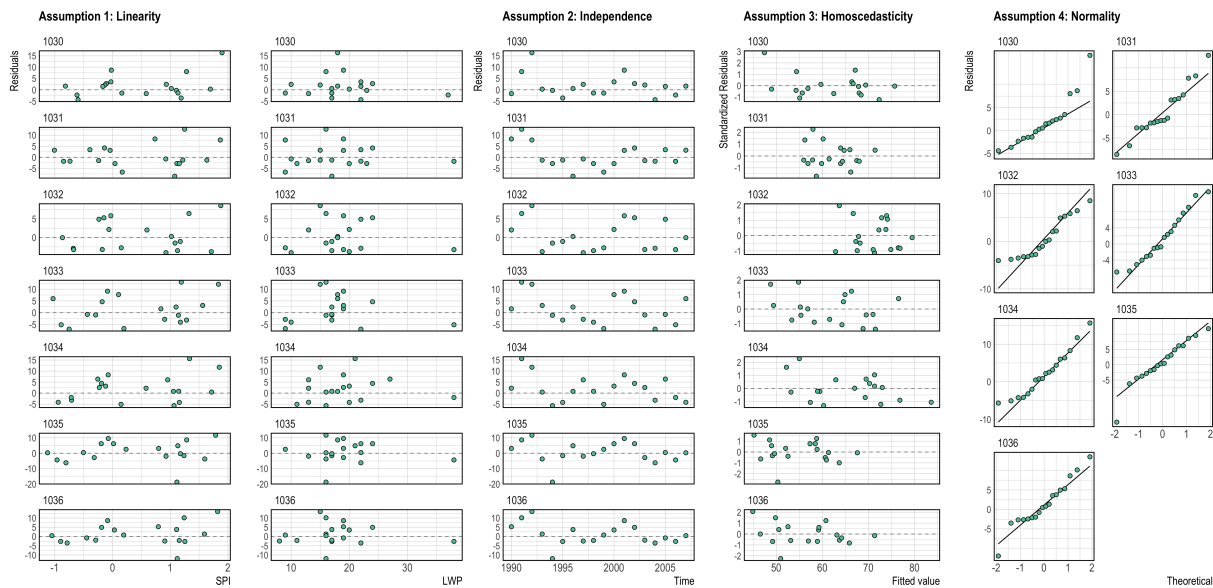


Figura 4.24 Test de hipótesis básicas en HachM - caso T2. Se presentan los resultados de los supuestos, desde izquierda a derecha, linealidad, independencia, homocedasticidad, y normalidad para la calibración 1990-2005 del Índice de Calidad de Agua de Riego.

Con relación al supuesto de normalidad, las distribuciones de los residuos respecto a los cuantiles teóricos de la distribución normal muestran que las subcuencas presentan un cercano ajuste a la recta, pero con desviaciones en las zonas extremas. Dichas desviaciones forman distribuciones en S , las que indican colas largas (e.g., UC-1032 e IC-1035) o cortas (e.g., IC-1031 e IC-1033) de los residuales, siendo interpretadas como un factor que altera la normalidad. Además, la gráfica muestra la presencia de posibles valores outliers, situados en los extremos inferiores de las distribuciones (ver UC-1034 e IC-1036).

Posteriormente, la Figura 4.25 muestra comportamiento del modelo en los períodos de testeo. Los resultados indican que al calibrar HachM con **T1**, **T2** o **T3** se obtienen sobreestimaciones de los índices de calidad del agua. A raíz de aquello, se analiza el contraste temporal de las observaciones y simulaciones de HachM en los tres períodos de calibración y validación en la Figura E.4.

El modelo hasta el año 2010 mantiene un buen acuerdo con las observaciones, esto implica que reproduce correctamente los valores hasta tres años después del período más largo de calibración (**T1**), y hasta ocho años del período más corto (**T3**). Luego, los años 2011 y 2012 presentan bajas de 15 a 30 puntos de calidad con relación a los valores medios de cada subcuenca (en unidades de los WQI); sin embargo, HachM no refleja este descenso. Tal como se presenta en la Figura E.4 el modelo sobrestima la calidad del agua superficial de la cuenca desde al año 2011 en adelante. Cabe señalar que desde el año 2013 la sobreestimación es 10 puntos promedio, reflejándose un mejor ajuste a la línea de observaciones en comparación a los años iniciales señalados.

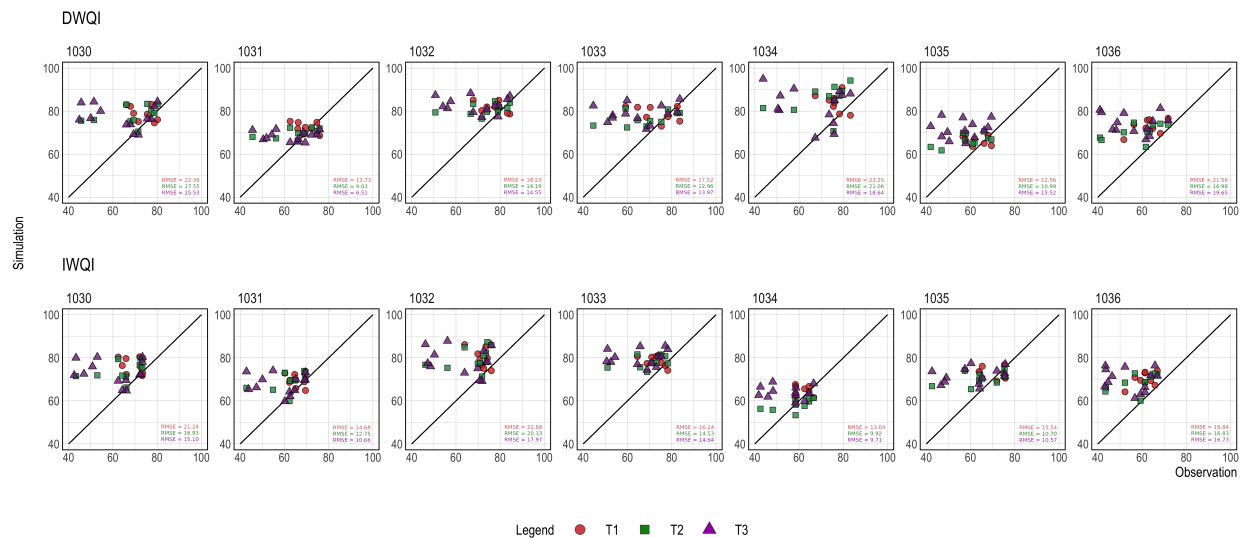


Figura 4.25 Observaciones vs simulaciones de HachM en períodos de validación.

De acuerdo con los resultados estadísticos de los períodos de testeo (Tabla E.2) y el análisis gráfico de la Figura 4.25, se seleccionan los coeficientes de regresión del período de entrenamiento **T2** para la proyección 2035/2060 de la calidad de agua. Lo anterior en consideración al error que entrega HachM al entrenarse con el 60 % de los datos y el porcentaje de varianza explicado en el 40 % restante.

En síntesis, HachM cumple con cuatro de cinco hipótesis básicas de un modelo de regresión, siendo linealidad, independencia, homocedasticidad y no colinealidad. Con relación a la normalidad, las simulaciones muestran desviaciones en las zonas inferiores y superiores de las distribuciones, indicándose una leve falta de normalidad en el modelo. En consideración a lo anterior, se proponen dos mejoras en la construcción de HachM, 1) utilizar un modelo más complejo que incluya la falta de normalidad (e.g., GLM), y 2) robustecer la base de información de calidad de agua, idealmente a una escala mensual con el objetivo de poseer a lo menos 312 muestreos (26 años x 12 meses).

La mejora N.^o 1 ha sido estudiada en la presente investigación, obteniéndose resultados desfavorables y alejados de la realidad de la calidad del agua de la cuenca. También fueron aplicadas transformaciones polinómicas y logarítmicas a las variables hidroclimáticas, los resultados tampoco resuelven las cinco hipótesis básicas. Por consiguiente, construir HachM como un modelo más complejo no mejora la leve falta de normalidad.

Con relación a la mejora N.^o 2, queda fuera de los alcances del presente trabajo y es planteada como desafío futuro en el Capítulo 5. Sin perjuicio de lo anterior, HachM se utiliza en la proyección 2035/2060 para evaluar y analizar el cambio en la calidad de agua superficial con usos particulares.

4.4.4. Aplicación de HachM para la proyección de la calidad del agua

La proyección 2035/2060 de la calidad del agua y por ende, el cambio de la calidad en relación con el período 1990/2015 se realiza de acuerdo con los coeficientes de regresión de la Tabla 4.13. La tabla muestra los parámetros del caso base (A) y cinco escenarios de cambio (B, C, D, E y F).

Los escenarios se definen con objetivo de realizar un análisis de sensibilidad en el parámetro β_0 , el cual en su interpretación define un estado general (línea base) de la calidad del agua en cada subcuenca. En tanto, los parámetros β_1 y β_2 ponderan los cambios de la calidad del agua reflejados por la hidrología, particularmente por los indicadores SPI y LWP.

Previo a continuar con la proyección de la calidad del agua, es fundamental comprender el significado que adquiere cada coeficiente de regresión. Tal como se indica más arriba, β_0 es la línea base de cada subcuenca sin la intervención de la hidrología, es decir, cuando $SPI = LWP = 0$. En consecuencia, β_0 representa las fuentes de contaminación naturales y antropogénicas, tales como, centros acuícolas (cría de salmónidos), descargas residuales e industriales, pesticidas, fertilizantes, entre otros. En consideración a la falta de información sobre el aumento que pueden presentar estas fuentes de contaminación en el futuro cercano y lejano, los escenarios de cambio de la Tabla 4.13, responden exclusivamente a la perturbación del parámetro β_0 .

Por otro lado, β_1 y β_2 ponderan a variables hidroclimáticas, que si bien mantienen correlación con fuentes de contaminación puntuales y difusas (i.e., antrópicas), además de fuentes de contaminación naturales (e.g., lixiviación); los parámetros no requieren ser perturbados, puesto que el cambio está incluido en la evaluación del SPI y LWP con los GCM.

Tabla 4.13 Coeficientes de regresión de índices de calidad de agua y escenarios de cambio. Se presentan los resultados de HachM en el período de entrenamiento T2.

Caso	BNA	DWQI			IWQI		
		β_0	β_1	β_2	β_0	β_1	β_2
A	UC-1030	69,57	-10,17	-0,15	65,19	-10,71	-0,15
	IC-1031	66,36	-5,04	-0,11	66,72	-8,13	-0,36
	UC-1032	76,17	-6,14	-0,10	69,59	-12,54	-0,18
	IC-1033	67,36	-9,54	-0,08	72,65	-7,33	-0,15
	UC-1034	81,95	-12,70	-0,54	54,57	-5,82	-0,14
	IC-1035	54,94	-7,41	0,19	58,67	-8,37	0,14
	IC-1036	65,20	-8,97	-0,26	64,00	-9,28	-0,32
B				1,15 · β_0 ; β_1 ; β_2			
C				1,05 · β_0 ; β_1 ; β_2			
D				0,95 · β_0 ; β_1 ; β_2			
E				0,85 · β_0 ; β_1 ; β_2			
F				0,75 · β_0 ; β_1 ; β_2			

La Tabla 4.14 resume los resultados del acuerdo medio de los cambios unitarios y porcentuales del DWQI. La proyección con el escenario A (caso base) indica que la cuenca del río Bueno (promedio subcuencas) tiene una variación porcentual negativa del 2,7% (equivalente a una disminución de 1,9 puntos); solamente la subcuenca UC-1034 refleja un aumento del 3,9% ($\approx 2,3$ puntos). Si bien el caso A implica un descenso en la calidad del agua, el cambio no es el suficiente para variar la clasificación de la calidad del agua en relación con el período histórico, manteniéndose una calidad *regular*.

Luego, los escenarios B y C responden a la perturbación positiva del parámetro β_0 en un 15 y 5%, respectivamente. Los resultados para el primer escenario se ubican en el límite inferior de la calidad *buena* (75 puntos), puesto que el caso B refleja un aumento de 8,5 puntos promedio en la calidad del agua destinada a potabilización. Por otro lado, el caso C muestra un aumento de 1,6 puntos, manteniendo la calidad *regular* del período histórico.

Posteriormente, los casos D, E y F muestran disminuciones de 5,3 ($\Delta\% = -8,2$), 12,2 ($\Delta\% = -19,7$) y 19,1 ($\Delta\% = -32,3$) puntos promedio en la cuenca. Los resultados del DWQI con el caso D se clasifican en el límite inferior de la calidad *regular* (≈ 60 puntos), mientras que los casos E y F representan proyecciones de calidades *marginales*, con medias de 54,6 y 47,5, respectivamente.

El análisis por subcuenca del DWQI indica que la subcuenca UC-1032 presenta los mayores cambios negativos en la proyección del caso base y los escenarios de cambio (caso A: $\Delta\% = -10,2$ y caso F: $\Delta\% = -45,5$) en relación con las subcuencas restantes. Mientras que la subcuenca UC-1034 aumenta su calidad en el caso base, por ende, también en los escenarios B y C, y reporta las menores disminuciones en los casos D a F.

Los resultados de cambio por cada GCM se presentan en la Figura E.5. Las variaciones porcentuales entre los GCM son del mismo orden en el caso base y escenarios de cambio, con

Tabla 4.14 Resultados de cambios unitarios y porcentuales del DWQI. Se presentan los cambios del acuerdo medio de los GCM según el escenario de evaluación.

Escenario	Cambio	UC-1030	IC-1031	UC-1032	IC-1033	UC-1034	IC-1035	IC-1036
A	Δ_{unidad}	-1,93	-1,23	-7,06	-1,11	2,27	-1,03	-2,95
	$\Delta \%$	-2,9 %	-1,9 %	-10,2 %	-1,5 %	3,9 %	-1,6 %	-5,1 %
B	Δ_{unidad}	8,51	8,72	5,16	10,32	10,51	9,07	6,83
	$\Delta \%$	12,6 %	13,2 %	7,3 %	13,5 %	17,5 %	13,6 %	11,1 %
C	Δ_{unidad}	1,55	2,09	-2,96	2,70	5,02	2,34	0,31
	$\Delta \%$	2,4 %	3,2 %	-4,1 %	3,6 %	8,5 %	3,6 %	0,5 %
D	Δ_{unidad}	-5,41	-4,55	-11,16	-4,91	-0,48	-4,40	-6,21
	$\Delta \%$	-8,4 %	-7,2 %	-16,4 %	-6,7 %	-0,8 %	-6,9 %	-10,8 %
E	Δ_{unidad}	-12,36	-11,18	-19,35	-12,53	-5,97	-11,14	-12,73
	$\Delta \%$	-19,9 %	-18,3 %	-29,9 %	-17,8 %	-10,6 %	-18,1 %	-22,9 %
F	Δ_{unidad}	-19,32	-17,82	-27,55	-20,15	-11,46	-17,87	-19,25
	$\Delta \%$	-32,5 %	-30,5 %	-45,5 %	-29,7 %	-21,1 %	-30,3 %	-36,5 %

excepción del modelo C4 en los escenarios E y F, donde el modelo refleja una disminución del 23% y 42%, equivalente a bajas de 11,8 y 18,7 puntos promedio en la calidad del agua de la cuenca del río Bueno.

Con relación a las proyecciones del IWQI, el cambio promedio de los GCM (Tabla 4.15) concuerda con el comportamiento de cambio observado con el DWQI. La calidad del agua con fines agrícolas disminuye 1,9 puntos ($\Delta \% = -3,3$) en la evaluación del caso base, es decir, si perduran las condiciones actuales de la cuenca del río Bueno (en términos de contaminación), la calidad del agua disminuye, pero manteniendo una clasificación de agua *regular*.

Tabla 4.15 Resultados de cambios unitarios y porcentuales del IWQI. Se presentan los cambios del acuerdo medio de los GCM según el escenario de evaluación.

Escenario	Cambio	UC-1030	IC-1031	UC-1032	IC-1033	UC-1034	IC-1035	IC-1036
A	Δ_{unidad}	-2,01	-3,82	-1,92	-1,99	1,54	-1,76	-3,63
	$\Delta \%$	-3,3 %	-6,5 %	-3,7 %	-3,1 %	2,5 %	-2,6 %	-6,5 %
B	Δ_{unidad}	7,77	6,18	6,27	8,45	10,34	9,14	5,97
	$\Delta \%$	12,5 %	10,1 %	11,9 %	12,7 %	16,5 %	12,8 %	10,1 %
C	Δ_{unidad}	1,25	-0,49	0,81	1,49	4,47	1,87	-0,43
	$\Delta \%$	2,1 %	-0,8 %	1,6 %	2,3 %	7,3 %	2,7 %	-0,8 %
D	Δ_{unidad}	-5,27	-7,16	-4,65	-5,47	-1,39	-5,39	-6,83
	$\Delta \%$	-8,8 %	-12,4 %	-9,2 %	-8,7 %	-2,3 %	-7,9 %	-12,4 %
E	Δ_{unidad}	-11,79	-13,83	-10,10	-12,43	-7,26	-12,66	-13,23
	$\Delta \%$	-20,5 %	-24,9 %	-20,8 %	-20,6 %	-12,5 %	-19,3 %	-25,1 %
F	Δ_{unidad}	-18,31	-20,50	-15,56	-19,39	-13,13	-19,92	-19,63
	$\Delta \%$	-33,4 %	-39,0 %	-33,4 %	-33,7 %	-23,4 %	-31,7 %	-39,4 %

Luego, los escenarios de cambio B y C muestran una variación porcentual positiva de 12,4% y 2,1%, respectivamente. En contraste a los casos D, E y F, que reflejan una baja porcentual del 5,2%, 20,5% y 33,4% en el Índice de Calidad de Agua de Riego. La clasificación de la calidad del agua con los escenarios B, C, D y E es *regular*, con valores medios de 69,5, 63,1, 56,7 y 50,2, respectivamente. Únicamente el caso F, con una media de 43,7 puntos altera la clasificación de la cuenca, imponiendo el cambio a una calidad de agua *marginal*.

De acuerdo con la Tabla 4.15, las subcuencas IC-1031 e IC-1036 presentan los mayores cambios negativos en la evaluación del caso base y los escenarios C a F. En caso de mantenerse las condiciones actuales de contaminación en la cuenca, las proyecciones de los GCM entregan bajas de 4 puntos en ambas subcuencas, las que pueden aumentar a 20 puntos de descenso (caso F) si aumentan las fuentes de contaminación naturales y antropogénicas.

Finalmente, con relación al acuerdo de los GCM, el comportamiento de los modelos es equivalente a lo observado con el DWQI. El detalle puede ser consultado en la Figura E.6.

4.4.5. Relación de eventos extremos y calidad del agua

Los eventos extremos registrados en la cuenca del río Bueno —netamente en términos de sequías meteorológicas, agrícolas e hidrológicas— se reportan en los años 1988/1990, 1996/1997, 1998/1999, 2007/2008 y 2010/2014. De acuerdo con los resultados históricos del DWQI, la cuenca presenta una calidad *pobre-marginal* durante el período 1993/1997, y *marginal* desde 2011 a 2015. Mientras que el IWQI tiene una calidad *pobre-marginal* en 1995/1996, y *marginal* desde 2011 a 2015. En consideración con la escala temporal de evaluación de los WQI (anual), no es factible establecer una conexión significativa entre los eventos de sequía y los cambios de calidad del agua. Si bien los índices de calidad disminuyen en dos períodos coincidentes con eventos de sequías registradas en la cuenca, la evidencia no es suficiente para validar la hipótesis que las sequías son las responsables de la disminución de la calidad del agua.

Las razones que no permiten sostener la hipótesis son, 1) el evento de 1988/1990 no es incluido en el análisis, debido a las observaciones disponibles de calidad de agua, 2) el evento de 1998/1999 se clasifica en una calidad *marginal-regular* con el DWQI y *regular* con el IWQI, y 3) el evento de 2007/2008 presenta una calidad *regular-buena*. En consecuencia, un evento queda fuera del análisis, dos eventos presentan una calidad *regular-buena*, y los dos restantes se clasifican en una calidad *pobre-regular*.

En relación con las inundaciones registradas en la cuenca (e.g., 2002, 2004, 2008), los resultados muestran una calidad *regular*. Sin embargo, las anomalías generadas por dichos eventos tampoco se aprecian producto de la escala temporal aplicada en los índices de calidad. De acuerdo con lo indicado en la Acápita 4.2, la cuenca del río Bueno tiene un registro de al menos 40 inundaciones por eventos de precipitación extrema, lo que indica al menos un evento anómalo por año, por lo que es necesario evaluar en particular el mes con la anomalía y el valor del índice de calidad del agua para indicar si una inundación perturba la calidad del agua en la cuenca.

En conclusión, no es factible de representar una relación significativa entre los eventos extremos con la calidad del agua al considerar una escala temporal anual. A lo menos es

requerida una escala mensual de los índices de calidad de agua, para establecer algún tipo de conexión con las precipitaciones extremas desencadenantes en inundaciones y/o déficit de precipitaciones medias mensuales en caso de presentarse el evento opuesto (sequías).

Sin embargo, el desarrollo de HachM sí plantea una relación entre la calidad del agua y los eventos extremos. Las variables hidroclimáticas con las cuales se construye el modelo, provienen de indicadores utilizados en la evaluación de inundaciones y sequías. Particularmente, el SPI representa ambos eventos extremos, puesto que refleja las condiciones normales y anómalas de humedad de una cuenca.

A partir de lo anterior, se plantea como desafío futuro en el Capítulo 5 la necesidad de **ampliar la red de monitoreo y muestreo de calidad de aguas** con el objetivo de poseer un registro de información robusto, que permita estudiar, analizar y comprender los efectos de los eventos extremos en la calidad del agua.

4.4.6. Síntesis

Los análisis químicos de los ríos resultan en conductividades específicas bajas (por consiguiente, bajas concentraciones de sólidos suspendidos) y pH ubicados en el rango óptimo, de acuerdo con la NCh409 (INN, 2005) y NCh1333 (INN, 1987). No obstante, el boro, mercurio, aluminio, cobre y molibdeno son de preocupación debido a sus altas concentraciones, como también los nutrientes que indican/plantean cambios de estado oligotróficos a mesotróficos en los ríos.

En relación con los WQI –cuyos resultados plantean una calidad del agua *regular* en los ríos Negro, Rahue, Pilmaiquén y Bueno tanto para fines de potabilización y su posterior uso/consumo de agua potable como para actividades agrícolas– sus interpretaciones quedan condicionadas a la selección de parámetros químicos (Tablas 4.10 y 4.11). No fue factible incluir parámetros microbiológicos, de turbiedad y parámetros organolépticos físicos, debido a la falta de registro en las estaciones de calidad. Por otro lado, a causa de problemas en el límite de detección fueron desestimados elementos y metales (no-) esenciales (e.g., Ag, As, Cd, Pb, Zn). A partir de aquello, es necesario realizar un análisis crítico en los sistemas de muestreo y su posterior estudio en laboratorios.

Posteriormente, HachM, el modelo basado en la hidrología de una cuenca y en la química de sus ríos, interpreta y resuelve la calidad del agua mediante variables hidroclimáticas relacionadas a las condiciones de humedad normales y anómalas. Sin embargo, la escala temporal anual no permite establecer una concreta y fundada dependencia entre la disminución de la calidad del agua natural y la presencia de eventos extremos. Para estudiar dicha relación se plantea como mínimo requerimiento una escala temporal mensual de los parámetros químicos.

Finalmente, si las condiciones actuales de contaminación (fuentes naturales y antropogénicas) perduran en el tiempo, los índices de calidad tienen una disminución de dos puntos promedio (variación mínima de un punto y máxima de ocho puntos en las subcuencas), por lo cual se mantiene una clasificación *regular*. Por el contrario, si las fuentes de contaminación aumentan un 25 % en relación con la línea base 1990/2015, los resultados indican que la calidad del agua disminuye hasta 20 puntos en los ríos de la cuenca del río Bueno.

Capítulo 5

Conclusión

El estudio de los efectos e impactos del cambio climático en la cuenca del río Bueno, consideró la evaluación de la frecuencia, severidad y magnitud de eventos extremos –inundaciones y sequías– como también el desarrollo de un modelo hidro-estadístico aplicado al estudio de la calidad del agua.

5.1. Conclusiones generales

En términos generales los resultados evidencian amenazas actuales y futuras de inundaciones provenientes de precipitaciones extremas, por lo que al considerar la vulnerabilidad y exposición de las comunidades, existe un riesgo activo para quienes habitan la cuenca. En consecuencia, se sugieren evaluar medidas de **mitigación** y adaptación frente a este tipo de eventos.

Para los desbordes de ríos se propone la construcción de obras de defensa fluvial (e.g., enrocados, gaviones, espigones), capaces de resguardar la caja del río y con ello aminorar los daños en la infraestructura vial (carreteras y puentes) como también las consecuencias en los asentamientos humanos. En el caso de los efectos registrados directamente en los centros urbanos, tales como anegamiento de calles y casas, se sugiere la revisión (**o implementación**) de planes de manejo de aguas lluvias. Es sustancial –en particular aquellas comunidades que aún no cuentan con servicios de alcantarillado y descargan sus aguas grises y negras a ríos colindantes– la mejora (o construcción en el corto plazo) de redes de recolección, conducción y restitución de aguas lluvias.

Por otro lado, las sequías también suponen amenazas actuales y futuras en la cuenca, siendo los principales efectos adversos la falta del recurso para el consumo humano y las pérdidas agrícolas. Como principal medida de mitigación y adaptación se propone la transición hacia una *gestión integrada del recurso hídrico*, en otras palabras, el uso sostenible y administración eficaz y equitativa del agua, sin alterar ni afectar los sistemas vitales.

La gestión integrada propuesta considera el óptimo social (*es derecho de cada ser humano el acceso al agua potable*) e incorpora aquellos actores que utilizan el recurso para diversas actividades (óptimo económico). La asignación del recurso puede ser modelada mediante

reglas de operación aplicadas en infraestructura de almacenamiento, regulación y descarga (e.g., embalses), incluyendo objetivos sociales, económicos y ambientales. Además, con base en los lineamientos de la GIRH, es propuesta una gestión centralizada por cuenca y no por región, donde sean consideradas las características actuales que define cada cuenca (e.g., demografía, uso de suelo, demanda y oferta de agua, infraestructura hidráulica, entre otras) y sus posibles cambios por causas naturales o antropogénicas.

Con relación a la calidad del agua, los resultados históricos plantean una calidad *regular* para fines de potabilización y regadío en la cuenca del río Bueno. Sin embargo, la proyección futura revela disminuciones desde el 3 % hasta 33 % en la calidad media de la cuenca respecto al período histórico. El deterioro de la calidad del agua dependerá del aumento que presenten las fuentes de contaminación –principalmente antropogénicas, como centros acuícolas y descargas industriales y residuales– y la mala o ineficaz gestión del recurso. A causa de aquello se podrían presentar en la cuenca problemas como la falta del recurso para uso/consumo de agua potable, limitaciones para usos recreativos y (no-) consuntivos, pérdida de biodiversidad y ecosistemas acuáticos, entre otros. A modo de sugerencia y medida de mitigación, se incentiva la gestión integrada del recurso hídrico, donde sean incluidas políticas de protección al recurso atinentes a la cuenca en estudio (e.g., creación de normas secundarias para el Lago Ranco, Puyehue y Rupanco).

Cabe señalar que cada mejora y/o propuesta indicada debe ser implementada en conjunto a una actualización y correcta fiscalización en el plan regulador de las comunas involucradas. Por ejemplo, en atención a las inundaciones, deben ser creados y/o actualizados los mapas de áreas inundables, con objetivo de restringir emplazamientos de obras residenciales y/o infraestructura crítica (escuelas, centros de salud, cuarteles de bomberos, etc.) en dichas áreas.

Por último, cada mejora debe ser pensada y realizada de forma sostenible, en el marco de las posibles repercusiones del cambio climático.

5.2. Eventos extremos y calidad del agua

La presente investigación en su inicio plantea tres interrogantes las que son resueltas en el desarrollo de la misma. A continuación, se sintetizan las respuestas a cada una de ellas.

1. *¿Se proyectan cambios en la frecuencia y magnitud de eventos de precipitación extrema, asociados a inundaciones?*

Sí. Los resultados de los modelos climáticos globales plantean la radicalización de los eventos de precipitación extrema. Los días severamente (RR70), extremadamente (RR90) y excepcionalmente lluviosos (RR100) presentan aumentos superiores al 100 % en relación con la cantidad de días registrados con dichas condiciones durante el período histórico. En referencia a la magnitud de los eventos, la evaluación del SPI-1 reporta aumentos en las inundaciones leves y moderadas (5 % a 10 %), y disminuciones del 15 % en las magnitudes de las inundaciones extremas. Por el contrario, la evaluación del SPI-3 y SPI-6 indican bajas en los eventos de carácter leve, pero las inundaciones moderadas y extremas aumentan desde un 15 % a 42 %.

2. *¿Cuál es el registro de sequías meteorológicas, agrícolas e hidrológicas en la cuenca del río Bueno?, ¿se proyectan cambios en la severidad, duración y frecuencia de este tipo de evento extremo?*

La evaluación 1985/2015 de indicadores e índices hidroclimáticos permite registrar cinco eventos de sequías en la cuenca, algunas con déficit moderados de los recursos hídricos (e.g, 1988/1990), otras relacionadas a déficit extremos con graves consecuencias en la hidrología de la cuenca, por ende consecuencias sociales y económicas (e.g., 1998/1999, 2010/2014).

En relación con la segunda interrogante, la respuesta es afirmativa. Las sequías meteorológicas leves, severas y extremas aumentan entre un 10 % a 40 %, las sequías agrícolas leves y severas en un 15 % promedio, y las sequías hidrológicas leves y moderadas aumentan hasta 60 % en frecuencia.

Por último, el acuerdo de los modelos climáticos globales revela la probabilidad de cuatro sequías hidrológicas con duraciones máximas de cuatro años.

3. *¿La calidad del agua puede ser representada mediante variables hidroclimáticas aplicadas en el estudio de eventos extremos? De ser factible, ¿se perciben y/o existen cambios en la calidad del agua debido a la presencia de los eventos?*

Sí. La construcción de HachM expone la relación entre parámetros químicos y variables hidroclimáticas. Los resultados indican que el SPI y LWP son capaces de representar la química de una cuenca. No obstante, hay que tener en consideración que las variables no representan toda la química que ocurre dentro de la cuenca, sino que mantienen una alta correlación con diversos parámetros químicos, que a su vez se correlacionan con otros. De esta forma, se conjuga todo el sistema hidrológico y químico.

Con referencia a la segunda pregunta, la red de información de calidad de aguas disponible no permite concluir sobre la alteración de la calidad del agua frente a un suceso extremo, como lo son las inundaciones y sequías. Para evaluar la inferencia de los extremos sobre la calidad del agua, es requerido un análisis mensual de los parámetros químicos (sobre una base de registros diarios o por lo menos semanales o quincenales), con objetivo de incluir las condiciones normales y anómalas de humedad que alteran la calidad del agua de la cuenca.

Concluida la investigación y respondidas las preguntas que dieron origen a ella, surgen nuevas interrogantes. Por ejemplo, ¿cómo altera la expansión demográfica y territorial la frecuencia de inundaciones?; en lo que se refiere a las sequías, si las napas subterráneas pueden solventar caudales inmiscuidos por déficit hídricos, ¿qué factores alteran las recargas?, ¿los recursos son los suficientes para soportar largos períodos de sequía?; y finalmente, si la calidad del agua está condicionada por la hidrología de una cuenca, ¿qué factores naturales regulan la hidroquímica e hidrodinámica de la cuenca, para que la calidad del agua sea clasificada como *pobre* o *bueno*?, ¿cuál es la capacidad de regulación que tienen las cuencas para mantener

el equilibrio del sistema en presencia de fuentes de contaminación antropogénicas?, ¿qué tan progresiva es la contaminación de las aguas producto de actividades acuícolas, industriales, agrícolas y ganaderas?

5.3. Desafíos futuros

Los siguientes puntos son propuestos como desafíos futuros para la academia y consultoría.

- Evaluación de sequías en la zona sur, zona austral y patagonia de Chile. El presente estudio constató la presencia de sequías meteorológicas, agrícolas e hidrológicas en una de las cuencas ubicadas en el sur del país, pero es fundamental conocer la realidad de toda la macro-zona sur y austral, puesto que son estas las que almacenan los reservorios más grandes de agua dulce.
- Análisis crítico sobre el **monitoreo, frecuencia de muestreo y transparencia de información de parámetros químicos**, medidos por la Dirección General de Aguas y/o entes asociados, tales como, Servicio Agrícola y Ganadero y **empresas sanitarias** responsables. Para realizar un estudio detallado de la calidad del agua natural de las cuencas, es imprescindible reformar/mejorar/actualizar el programa de monitoreo, como también la información de mediciones de calidad de agua entregadas a los usuarios.
- Aplicación de HachM en distintos lugares del territorio nacional, para su validación absoluta como herramienta de evaluación de la calidad del agua para fines particulares.
- Aplicación de HachM mediante similitud hidrológica de cuencas. No todas las cuencas del país cuentan con registros de calidad de agua, sin embargo, el producto grillado CR2MET fue desarrollado para Chile continental, por lo cual se cuenta con series de precipitación media para todo el territorio. Luego, a partir de las series de precipitación se obtiene el SPI y LWP. En consecuencia, basta con calibrar el modelo en aquellas cuencas que presenten un registro completo y extenso de calidad de aguas y posteriormente, evaluar la similitud climática e hidrológica. A fin de robustecer el análisis, pueden ser incluidas características demográficas y de uso de suelo.
- Evaluación de HachM en ventanas temporales diarias y/o mensuales, por lo que surge nuevamente la importancia del segundo punto. La química de cuatro muestreos anuales no es representativa de todo lo que ocurre en 365 días.
- Actualización del DWQI referente al uso de parámetros químicos seleccionados. Parámetros microbiológicos, turbiedad y elementos de importancia para la salud como fluoruro, hierro y cianuro no fueron considerados en la creación del índice, debido a la inexistente información en las estaciones de calidad de aguas.

Siglas

BNA Banco Nacional de Aguas. 6, 7

CONAF Corporación Nacional Forestal. II, 8

CONAMA Comisión Nacional del Medio Ambiente. 60

CR(2) Centro de Ciencia del Clima y Resiliencia. 19

DGA Dirección General de Aguas. 6, 10, 19, 56, 60

DOH Dirección de Obras Hidráulicas. 11

ESSAL Empresa de Servicios Sanitarios de Los Lagos. 11, 12, 20, 58

GIRH Gestión Integrada de los Recursos Hídricos. 2, 3, 78

INN Instituto Nacional de Normalización. 57

IPCC Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático. 3, 21

MMA Ministerio del Medio Ambiente. 58

MOP Ministerio de Obras Públicas. 11

SERNAGEOMIN Servicio Nacional de Geología y Minería. 7, 13, 14

SiSS Superintendencia de Servicios Sanitarios. 12

WHO Organización Mundial de la Salud. 3

Glosario

Ag Plata. Es un metal noble de color gris claro y brillante, más duro que el oro, más maleable y dúctil después del oro y el mejor conductor de la electricidad y el calor. XXIII, XXIV, 57, 60, 64, 76

Al Aluminio. Metal no ferromagnético. Es el tercer elemento más común encontrado en la corteza terrestre. XXIII–XXV, XXIX, 12, 19, 56, 57, 59, 62–64, 66

APR Agua Potable Rural. El Programa de APR de la Dirección de Obras Hidráulicas, perteneciente al Ministerio de Obras Públicas, tiene por objetivo abastecer de agua potable a localidades rurales, contribuyendo al desarrollo económico y a la integración social del país. 11, 16

As Arsénico. Elemento distribuido en toda la corteza terrestre, principalmente en forma de sulfuro de arsénico o de arseniatos y arseniuros metálicos. Se considera como una sustancia peligrosa para la salud humana, por lo que presenta una prioridad alta en el análisis sistemático de fuentes de agua de consumo. XXIII, XXIV, 19, 57, 60, 61, 64, 76

Autoridad Competente aquella designada por las leyes y reglamentos vigentes para determinados efectos (INN, 1987). XXI

B Boro. Es un no metal sólido, frágil y, en su forma cristalina, casi tan duro como el diamante. Es requerido para el crecimiento de plantas, pero las concentraciones en exceso pueden ser tóxicas. XXIII–XXV, 19, 56, 57, 59

BFI Índice de Flujo Base. XIII, 25, 26, 46, 47, 51

bioamplificación o biomagnificación, es el aumento de la concentración de una sustancia, tal como un tóxico químico en los tejidos de los organismos, que pasa de un nivel trófico al siguiente debido a la acumulación de la sustancia precedente del alimento. Por ejemplo, los grandes peces depredadores, tienen más probabilidades de presentar niveles elevados de mercurio (Hg), por haber devorado a muchos peces pequeños que a su vez lo habrán ingerido al alimentarse de plancton (WHO, 2006). XXIV

C3.6 GCM: CSIRO-Mk3.6. 22, 23, 29, 31, 40, 42, 43, 50–52, 54

- C4** GCM: CCSM4. 22, 23, 29, 31, 40, 42, 43, 50–54, 74
- Ca** Calcio. Es un metal alcalino de color rojo brillante, blando y dúctil, se oxida con el aire y el agua. En la naturaleza no existe en estado puro, se encuentra en la calcita, mármol, piedra caliza, yeso, entre varios silicatos. En los seres vivos, está presente en los huesos, los dientes y fluidos corporales. XXIII, XXIV, 19
- Cd** Cadmio. Es un metal maleable, altamente tóxico, que se obtiene casi exclusivamente como subproducto en el refinado de los minerales de zinc. XXIII, XXIV, 19, 56, 57, 60, 64, 76
- CDF** Función de distribución acumulada. Es la función matemática de una variable X que describe la probabilidad de que una variable aleatoria Y tenga un valor menor o igual que X . X
- CE** Conductividad específica. Es una medida de la capacidad de una solución para conducir una corriente eléctrica. Está directamente vinculada a la cantidad de sólidos disueltos totales. XXIII–XXV, 56, 57, 63
- Cl⁻** Cloruro. Anión derivado del cloruro de hidrógeno (o ácido clorhídrico), en otras palabras, Cl^- es una sal de HCl . XXIII–XXV, 19, 57, 61, 62, 66
- CN⁻** Cianuro. Es un anión monovalente, formado por un átomo de carbono y un átomo de nitrógeno unidos a través de un enlace triple. La forma más usual es la sal de cianuro de hidrógeno (o ácido cianhídrico), una sustancia caracterizada por su alta toxicidad, que puede resultar letal para el ser humano. 60, 61, 64
- Cr** Cromo. Es un metal de color gris, muy duro, resistente e inoxidable. XXIII–XXV, XXIX, 12, 19, 57, 61, 62, 65, 66
- Cu** Cobre. Es un metal de color pardo rojizo, brillante, dúctil, muy maleable, resistente a la corrosión y buen conductor de la electricidad y el calor. XXIII–XXV, 12, 19, 57, 59, 61, 62, 66
- CVE** Curva de variación estacional. Se grafican determinadas probabilidades de excedencia de los caudales, siendo factible observar el régimen hidrológico, los valores mínimos y máximos, y la probabilidad en que ocurran dichos valores. 8
- DBO** Demanda Bioquímica de Oxígeno. Es una estimación de la cantidad de oxígeno que requiere una población microbiana heterogénea para oxidar la materia orgánica de una muestra de agua. 60
- DC** Subcuencas costeras-bajas (*Down catchment*). I, V, 6, 37, 45, 51, 54
- DC-1037** Subcuenca del río Bueno Bajo. IV, 7, 9, 20, 31, 36, 41, 46, 51
- DD** Días secos. IX, 23, 29, 30, 47, 50, 54, 65, 66
- DD10** Días ligeramente secos. IX, 23, 29, 45, 54

DDA Derecho de Aprovechamiento de Aguas. El derecho de aprovechamiento es un derecho real que recae sobre las aguas y consiste en el uso y goce de ellas, con los requisitos y en conformidad a las reglas que prescribe el Código de Aguas (Artículo N°6 - DFL 1122). 10

DDA-consuntivo Derecho de aprovechamiento consuntivo es aquel que faculta a su titular para consumir totalmente las aguas en cualquier actividad (Artículo N°13 - DFL 1122). 10

DDA-no consuntivo Derecho de aprovechamiento no consuntivo es aquel que permite emplear el agua sin consumirla y obliga a restituirla en la forma que lo determine el acto de adquisición o de constitución del derecho (Artículo N°14 - DFL 1122). 10

DQO Demanda Química de Oxígeno. Toda sustancia tanto orgánica como inorgánica susceptible de ser oxidada, mediante un oxidante fuerte. XXIII, XXIV, 19

DWQI Índice de Calidad de Agua Potable (*Drinking Water Quality Index*), métrica de evaluación de calidad de agua destinada al uso/consumo de agua potable. 56, 60–65, 68, 73–75

ENSO El Niño-Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés), es un patrón climático recurrente (dos a siete años), que involucra cambios en la temperatura de las aguas del Océano Pacífico tropical central y oriental. Cada fase del patrón desencadena alteraciones predecibles de temperatura, precipitación y vientos. Las fases cálidas y frías se denominan El Niño y La Niña, respectivamente. Disponible en climate.gov. 22

eutrófico Estado trófico del agua, el cuerpo de agua presenta una alta productividad debido a la presencia de nutrientes. XXVII

F⁻ Fluoruro. Es el primer elemento de la familia de los halógenos y el elemento químico más reactivo. 60, 61, 64

FDC Curva de duración de caudales (*Flow Duration Curve*), es una curva de frecuencia acumulada, indica el porcentaje de tiempo durante el caudal ha sido igualado o excedido en un período definido. X, 9, 31

Fe Hierro. Es un metal de color blanco plateado, dúctil, maleable, magnético y oxidable. Es ferromagnético a temperatura ambiente y presión atmosférica. XXIII–XXV, 12, 19, 56, 57, 61–63

GCM Modelo Climático Global. 21–23, 29, 31, 33, 42, 43, 52, 54, 72, 73, 75

GEI Gases de efecto invernadero, son los componentes gaseosos de la atmósfera, tanto naturales como antropogénicos, que absorben y emiten radiación en determinadas longitudes de onda del espectro de radiación infrarroja emitido por la superficie de la Tierra, la atmósfera y las nubes (Benavides, 2007). x, 21

- Hg** Mercurio. Es un metal noble, soluble únicamente en soluciones oxidantes. El metal y sus compuestos son tóxicos. XXIII–XXV, 19, 56, 57, 59, 61, 62, 65
- hidrograma** es una expresión gráfica del caudal en función del tiempo, i.e., $Q = f(t)$. El área bajo la curva del hidrograma representa el volumen de agua que ha pasado bajo un determinado punto de aforo. XIII
- IC** Subcuencas intermedias (*Intermediate catchment*). I, V, XIII, XXIII, 6, 9, 31, 37, 41, 45–47, 51, 54
- IC-1031** Subcuenca del río Bueno entre Lago Ranco y río Pilmaiquen. IV, V, XXIX, 7, 11, 19, 20, 31, 40, 42, 46, 57, 66, 71, 75
- IC-1033** Subcuenca del río Bueno entre río Pilmaiquen y río Rahue. IV, V, 7, 19, 20, 45, 71
- IC-1035** Subcuenca del río Negro. IV, V, 7, 11, 19, 20, 57, 58, 62, 66, 71
- IC-1036** Subcuenca del río Rahue Bajo. IV, V, XXIX, 7, 19, 20, 57, 58, 62, 66, 71, 75
- IC5** GCM: IPSL-CM5A-LR. 22, 23, 29, 31, 40, 42, 43, 50–54
- IWQI** Índice de Calidad de Agua Riego (*Irrigation Water Quality Index*), métrica de evaluación de calidad de agua destinada al uso agrícola. 56, 60, 62, 64, 65, 68, 70, 74, 75
- KDE** Estimación de densidad de kernel (KDE), es un método no paramétrico para estimar la función de densidad de probabilidad (FDP) de una variable aleatoria. 37
- KGE** Eficiencia de Kling-Gupta. 27, 28, 69, 70
- LD** Límite de detección. XXIII, 57
- LDP** Período seco más largo (*Longest dry period*). IX, 23, 45, 47, 50
- LWP** Período lluvioso más largo (*Longest wet period*). IX, 65, 66, 68, 69, 72, 79
- ME** GCM: MIROC-ESM. 22, 23, 29, 31, 40, 42, 43, 50–54
- mesotrófico** Estado trófico del agua, entre el estado oligotrófico y eutrófico. XXVII
- Mg** Manganeseo. Es un metal, no se encuentra en la naturaleza en estado libre, sino que forma parte de numerosos compuestos, en su mayoría óxidos y sales. XXIII, XXIV, 57
- Mn** Manganeseo. Es un metal de color blanco plateado, brillante, duro y quebradizo, resistente al fuego y muy oxidable. XXIII–XXV, 57, 61, 62
- Mo** Molibdeno. Es un metal de color blanco plateado, duro, maleable y con propiedades químicas similares al cromo. No se encuentra libre en la naturaleza y es un oligoelemento

importante del suelo, donde contribuye al crecimiento de las plantas. XXIII–XXV, XXIX, 57, 59, 62, 65, 66

N Nitrógeno. Es un elemento metaloide que se encuentra en la atmósfera en estado gaseoso y en múltiples compuestos orgánicos e inorgánicos. 13, 19

Na Sodio. Es un metal alcalino de color blanco plateado, blando, ligero y explosivo al contacto con el agua. XXIII, XXIV, 57

NDSI Índice de Nieve de Diferencia Normalizada. 8

NH₄⁺ Amonio o amoníaco en su forma no ionizada (NH₃). Procede de procesos metabólicos, agropecuarios e industriales, así como de la desinfección con cloramina. 60

NO₃⁻ Nitrógeno de Nitrato. Es un compuesto químico formado por nitrógeno y oxígeno, se puede encontrar en niveles bajos en los alimentos y agua de pozo. El nitrato es incoloro, inodoro e insípido. XXI, XXIII, XXIV, 57, 58, 61, 62, 64, 66

OD Oxígeno disuelto. Es la cantidad de oxígeno gaseoso disuelto en el agua. Es fundamental para la vida de los peces, plantas, algas, y otros organismo. XXIII–XXV, 19, 56, 57, 62

Ods Objetivos de Desarrollo Sostenible. 64

oligotrófico Estado trófico del agua, indica que un cuerpo de agua presenta baja productividad primaria, es decir, baja cantidad de nutrientes. El agua es transparente, y presenta buena oxigenación en el hipolimnion. XXI, XXVII, 12, 58

P Fósforo. Es un no metal sólido, amarillento, ceroso, de olor desagradable, muy combustible y venenoso. 12, 13, 19

Pb Plomo. Es un metal sólido de color gris azulado, blando, maleable, dúctil, de elevada densidad y mal conductor de la electricidad. XXIII, XXIV, 57, 60, 64, 76

PDSI Índice de Sequía Severo de Palmer. 25, 32, 40, 42–44, 47, 49, 53, 54

PHDI Índice de Sequía Hidrológica de Palmer. 25, 32, 40, 42–44, 47, 49, 54

PO₄³⁻ Fósforo de ortofosfato. Son compuestos indispensables en la formulación de los abonos minerales. Su ausencia limita el crecimiento de las plantas.. XXI, XXIII, XXIV, 57, 58, 61, 62, 64–66

Q5 Caudal asociado a la probabilidad de excedencia del 5% de la curva de duración de caudales medios. X, 23, 37, 38, 41, 42, 65, 66, 68

Q50 Caudal asociado a la probabilidad de excedencia del 50% de la curva de duración de caudales medios. X, 23, 37, 38, 45, 47, 50, 51, 54

- Q₉₅** Caudal asociado a la probabilidad de excedencia del 95 % de la curva de duración de caudales medios. X, 23, 45, 47, 50, 51, 54, 65
- Q_{max}** Caudal máximo anual. X, 23, 38
- Q_{mean}** Caudal medio anual. X, 23, 50
- Q_{min}** Caudal mínimo anual. X, 23, 50, 51, 54
- Q_{p10}** Percentil 10 de la serie de caudales medios anuales. X, 23, 50, 51, 54
- Q_{p90}** Percentil 90 de la serie de caudales medios anuales. X, XXIX, 23, 38, 41, 42, 65, 66, 68
- R²** Coeficiente de determinación. 27, 28, 69, 70
- RAI** Índice de Anomalía de Lluvia. XI, 25, 32, 40, 42–44, 47, 49, 54
- RCP** Trayectorias de Concentración Representativas. 17, 21, 22
- RILES** Residuos Industriales Líquidos. Son aguas de desecho provenientes de establecimientos industriales debido a sus actividades, procesos y/o servicios. Se caracterizan por su alta carga de contaminantes, tales como DBO, DQO, SS, aceites, grasas, hidrocarburos, metales, entre otros. Fuente: (*junio 2021, consulta Ecopreneur*). 12
- RMSE** Error de la raíz cuadrática media. 27, 69, 70
- RR10** Días lluviosos. IX, 23, 35, 40, 41, 65
- RR100** Días excepcionalmente lluviosos. IX, 36, 37, 41, 44, 65, 78
- RR25** Días lluviosos. IX, XXIX, 35, 40, 65, 66, 68
- RR50** Días fuertemente lluviosos. IX, 35, 36, 41, 65, 66
- RR70** Días severamente lluviosos. IX, 35–37, 41, 44, 78
- RR90** Días extremadamente lluviosos. IX, 36, 37, 41, 44, 65, 78
- SAM** El modo anular del sur (SAM, por sus siglas en inglés), también conocido como oscilación antártica (AAO), describe el movimiento norte-sur del cinturón de viento del oeste que rodea la Antártida, dominando las latitudes medias y altas del hemisferio sur. Disponible en Australian Government - Bureau of Meteorology. 22
- SDT** Sólidos disueltos totales. Es una medida de todas las sustancias inorgánicas y orgánicas contenidas en un líquido en forma molecular, ionizada o en forma de suspensión microgranular. XXIII–XXV, 57, 61, 62, 66
- Se** Selenio. Es un elemento semimetálico sólido de color gris brillante, de características parecidas a las del azufre. Es un oligoelemento esencial, por lo que el cuerpo humano

lo recibe desde los alimentos. XXIII, XXIV, 19, 57, 60, 64

SIG Sistemas de Información Geográfica. 11, 47

SO₄²⁻ Sulfato. Son sales o ésteres, formados por la combinación del ácido sulfúrico y una base. XXIII–XXV, XXIX, 19, 57, 61, 62, 65, 66

SPEI Índice de Precipitación-Evapotranspiración Estandarizado. 24, 25, 47, 50, 54

SPI Índice de Precipitación Estandarizado. XI, XXIX, 24, 25, 32, 33, 38, 39, 42, 44, 47–52, 54, 55, 66, 68, 69, 72, 76, 78, 79

SST Sólidos suspendidos totales. Es el material particulado que se mantiene en suspensión en las corrientes de agua superficial y/o residual. 60

T_a Temperatura del agua. XXIII, XXIV, 19, 56, 58, 61, 62, 64, 66

UC Subcuencas cordilleranas (*Upper catchment*). I, V, XIII, XXIII, 6, 7, 9, 31, 36, 37, 45–47, 51, 54

UC-1030 Subcuenca de los Afluentes Lago Ranco. IV, V, XXIX, 7, 19, 20, 36, 40–43, 45, 46, 58, 65

UC-1032 Subcuenca del río Pilmaiquen. IV, V, 7, 8, 11, 19, 20, 36, 40, 41, 46, 57, 58, 62, 71, 73

UC-1034 Subcuenca del río Rahue antes de junta con río Negro. IV, V, 8, 19, 20, 41, 42, 46, 62, 71, 73

WQI Índice de Calidad de Agua. 21, 26–28, 60, 65, 68, 71, 75, 76

Zn Zinc. Es un metal de color blanco azulado, brillo intenso, estructura laminosa, muy frágil y oxidable con la humedad. No existe libre en la naturaleza, sino que se encuentra como óxido de zinc. XXIII, XXIV, 19, 57, 60, 64, 76

Bibliografía

- Aguilar, E., Peterson, T. C., Obando, P. R., Frutos, R., Retana, J. A., Solera, M., Soley, J., García, I. G., Araujo, R. M., Santos, A. R., Valle, V. E., Brunet, M., Aguilar, L., Álvarez, L., Bautista, M., Castañón, C., Herrera, L., Ruano, E., Sinay, J. J., Sánchez, E., Oviedo, G. I., Obed, F., Salgado, J. E., Vázquez, J. L., Baca, M., Gutiérrez, M., Centella, C., Espinosa, J., Martínez, D., Olmedo, B., Espinoza, C. E., Núñez, R., Haylock, M., Benavides, H., y Mayorga, R. (2005). Changes in precipitation and temperature extremes in Central America and northern South America, 1961-2003. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 110(23):1–15.
- Alvarez-Garretón, C., Mendoza, P. A., Pablo Boisier, J., Addor, N., Galleguillos, M., Zambrano-Bigiarini, M., Lara, A., Puelma, C., Cortes, G., Garreaud, R., McPhee, J., y Ayala, A. (2018). The CAMELS-CL dataset: Catchment attributes and meteorology for large sample studies-Chile dataset. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(11):5817–5846.
- Ansari, A. A., Gill, S. S., Lanza, G. R., y Rast, W. (2011). Eutrophication: Causes, consequences and control. *Eutrophication: Causes, Consequences and Control*, pp. 1–394.
- Arrese Luco, J. A. (2008). Sequías en Chile. *16th Session of the Commission on Sustainable Development New York, 5-16 May 2008*, (May):5–16.
- ATSDR (2010). Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). Toxicological Profile for Boron. Atlanta, GA: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service.
- Bachmair, S., Tanguy, M., Hannaford, J., y Stahl, K. (2018). How well do meteorological indicators represent agricultural and forest drought across Europe? *Environmental Research Letters*, 13(3).
- Banda, T. D. y Kumarasamy, M. (2020). Optics Aggregation Techniques Applied in Water Quality Indices (WQIs). *Physics*, 2(1):1–9.
- Bedia-Jiménez (2019). Package ‘ClimInd’.
- Beguiría, S., Vicente-Serrano, S. M., Reig, F., y Latorre, B. (2014). Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: Parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring. *International Journal of Climatology*, 34(10):3001–3023.

- Benavides, H. O. (2007). Información técnica sobre Gases de Efecto Invernadero y el cambio climático. *Ideam*, pp. 1–102.
- Beven, K. J. (2000). Uniqueness of place and process representations in hydrological modeling. *Hydrology and earth system sciences*, 4(2):203–213.
- Bhatti, A. S., Wang, G., Ullah, W., Ullah, S., Hagan, D. F. T., Noon, I. K., Lou, D., y Ullah, I. (2020). Trend in extreme precipitation indices based on long term in situ precipitation records over Pakistan. *Water (Switzerland)*, 12(3):1–19.
- Bhunia, P., Das, P., y Maiti, R. (2020). Meteorological Drought Study Through SPI in Three Drought Prone Districts of West Bengal, India. *Earth Systems and Environment*, 4(1):43–55.
- Biswas, A. K. (2004). Integrated water resources management: A reassessment: A water forum contribution. *Water International*, 29(2):248–256.
- Bosch, D. D., Arnold, J. G., Allen, P. G., Lim, K. J., y Park, Y. S. (2017). Temporal variations in baseflow for the Little River experimental watershed in South Georgia, USA. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 10:110–121.
- Boyacioglu, H. (2007). Development of a water quality index based on a European classification scheme. *Water SA*, 33(1):101–106.
- Bozkurt, D., Rojas, M., Boisier, J. P., y Valdivieso, J. (2018). Projected hydroclimate changes. *Climatic Change*, 150(3-4):131–147.
- Burton-Johnson, A., Black, M., Peter, T. F., y Kaluza-Gilbert, J. (2016). An automated methodology for differentiating rock from snow, clouds and sea in Antarctica from Landsat 8 imagery: A new rock outcrop map and area estimation for the entire Antarctic continent. *Cryosphere*, 10(4):1665–1677.
- Castillo, M., Saavedra, J., y Brull, B. B. (2019). Severidad del fuego en los mega incendios forestales ocurridos en Chile, en 2017. acciones para mejorar el sistema de protección. *Territorium*, (26 (I)):5–18.
- CENSO (2017). Resultados Definitivos - CENSO 2017. Población total por sexo y área urbana-rural.
- Cherkauer, K. A., Bowling, L. C., y Lettenmaier, D. P. (2003). Variable infiltration capacity cold land process model updates. *Global and Planetary Change*, 38(1-2):151–159.
- Chou, S. C., Lyra, A., Mourão, C., Dereczynski, C., Pilotto, I., Gomes, J., Bustamante, J., Tavares, P., Silva, A., Rodrigues, D., Campos, D., Chagas, D., Sueiro, G., Siqueira, G., y Marengo, J. (2014). Assessment of Climate Change over South America under RCP 4.5 and 8.5 Downscaling Scenarios. *American Journal of Climate Change*, 03(05):512–527.
- CIREN (2012). Estudio Agrológico del Suelo de los Región de Los Lagos. CC BY 4.0 CIREN. *Infraestructura de Datos Geoespaciales. Disponible en*

<https://www.ide.cl/index.php/agricultura-y-ganaderia/item/1763-capas-de-informacion-geografica-asociadas-al-estudio-agrologico-de-suelos-region-de-los-lagos-x>.

- CIREN (2019). Estudio Agrológico del Suelo de los Región de Los Ríos. CC BY 4.0 CIREN. *Infraestructura de Datos Geoespaciales*. Disponible en <https://www.ide.cl/index.php/agricultura-y-ganaderia/item/1764-capas-de-informacion-geografica-asociadas-al-estudio-agrologico-de-suelos-region-de-los-rios-xiv>.
- CNE (2020). Información de centrales hidroeléctricas de IDE Energía. *Ministerio de Energía*.
- Collier, M. A., Jeffrey, S. J., Rotstayn, L. D., Wong, K. K., Dravitzki, S. M., Moeseneder, C., Hamalainen, C., Syktus, J. I., Suppiah, R., Antony, J., El Zein, A., y Atif, M. (2011). The CSIRO-Mk3.6.0 Atmosphere-Ocean GCM: Participation in CMIP5 and data publication. *MODSIM 2011 - 19th International Congress on Modelling and Simulation - Sustaining Our Future: Understanding and Living with Uncertainty*, (December):2691–2697.
- CONAF (2014). Plantaciones forestales efectuadas durante el año 2014. *Ministerio de Agricultura, Corporación Nacional Forestal*.
- CONAF (2016). Catastros de Uso de Suelo y Vegetación. *Corporación Nacional Forestal*.
- CONAMA (2003). Instructivo Presidencial para la Dictación de Normas Secundarias de Calidad Ambiental para Aguas Continentales Superficiales y Aguas Marinas. *Comisión Nacional del Medio Ambiente, Dirección Ejecutiva. Santiago. Chile*.
- Cooley, H., Gleick, P. H., Cooley, H., y Gleick, P. H. (2011). Climate-proofing transboundary water agreements Climate-proofing transboundary water agreements.
- Cude, C. G. (2001). Oregon Water Quality Index a tool for evaluating water quality management effectiness. 37(1):125–137.
- Dai, M., Huang, S., Huang, Q., Leng, G., Guo, Y., Wang, L., Fang, W., Li, P., y Zheng, X. (2020). Assessing agricultural drought risk and its dynamic evolution characteristics. *Agricultural Water Management*, 231(December 2019):106003.
- Danabasoglu, G., Bates, S. C., Briegleb, B. P., Jayne, S. R., Jochum, M., Large, W. G., Peacock, S., y Yeager, S. G. (2012). The CCSM4 ocean component. *Journal of Climate*, 25(5):1361–1389.
- Danandeh Mehr, A., Sorman, A. U., Kahya, E., y Hesami Afshar, M. (2020). Climate change impacts on meteorological drought using SPI and SPEI: case study of Ankara, Turkey. *Hydrological Sciences Journal*, 65(2):254–268.
- De Santis, A., Asner, G. P., Vaughan, P. J., y Knapp, D. E. (2010). Mapping burn severity and burning efficiency in California using simulation models and Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 114(7):1535–1545.
- DGA (2003). Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad: INFORME FINAL P-1940. *Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de*

- Aguas, División de Estudios y Planificación. Elaborado por: CADE-IDEPE, p. 362.*
- DGA (2004). Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad: cuenca del río Bueno. *Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación. Elaborado por: CADE-IDEPE, p. 147.*
- DGA (2011). Antecedentes para Evaluar el Impacto Económico y Social de una Norma Secundaria de Calidad de Aguas en el Lago Ranco, Cuenca del Río Bueno. *Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación. Elaborado por: Universidad Austral de Chile.*
- DGA (2016). Atlas del Agua. *Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, 1(1):1–24.*
- DGA (2017). Actualización del Balance Hídrico Nacional. *SIT N° 417, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile, Realizado por: Universidad de Chile & Pontificia Universidad Católica de Chile, p. 378.*
- DGA (2018). Aplicación de la metodología de actualización del balance hídrico nacional en las cuencas de las macrozonas norte y centro. *SIT N° 435. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación. Realizado por Fundación para la Transferencia Tecnológica y Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile.*
- DGA (2018). Guía para la presentación de solicitudes de derechos de aprovechamiento de aguas superficiales, 4–5. *Dirección General de Aguas.*
- DGA (2019). Aplicación de la metodología de actualización del balance hídrico nacional en la macrozona sur y parte norte de la macrozona austral. *SIT N° 441. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación. Elaborado por: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Santiago, Chile.*
- DGA (2020). Boletín 510: Información Pluviométrica, fluviométrica, estado de embalses y aguas subterráneas.
- DOH (2019). Agua Potable Rural. *Superintendencia de Servicios Sanitarios.*
- Du, J., Fang, J., Xu, W., y Shi, P. (2013). Analysis of dry/wet conditions using the standardized precipitation index and its potential usefulness for drought/flood monitoring in Hunan Province, China. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 27(2):377–387.*
- du Plessis, A. (2017). *Global Water Quality Challenges.*
- Dufresne, J. L., Foujols, M. A., Denvil, S., Caubel, A., Marti, O., Aumont, O., Balkanski, Y., Bekki, S., Bellenger, H., Benshila, R., Bony, S., Bopp, L., Braconnot, P., Brockmann, P., Cadule, P., Cheruy, F., Codron, F., Cozic, A., Cugnet, D., de Noblet, N., Duvel, J. P., Ethé, C., Fairhead, L., Fichet, T., Flavoni, S., Friedlingstein, P., Grandpeix, J. Y., Guez, L., Guilyardi, E., Hauglustaine, D., Hourdin, F., Idelkadi, A., Ghattas, J., Joussaume, S., Kageyama, M., Krinner, G., Labetoulle, S., Lahellec, A., Lefebvre, M. P., Lefevre, F.,

- Levy, C., Li, Z. X., Lloyd, J., Lott, F., Madec, G., Mancip, M., Marchand, M., Masson, S., Meurdesoif, Y., Mignot, J., Musat, I., Parouty, S., Polcher, J., Rio, C., Schulz, M., Swingedouw, D., Szopa, S., Talandier, C., Terray, P., Viovy, N., y Vuichard, N. (2013). *Climate change projections using the IPSL-CM5 Earth System Model: From CMIP3 to CMIP5*, volumen 40.
- Dunnette, D. A. (1979). A geographically variable water quality index used in Oregon. *Journal of the Water Pollution Control Federation*, 51(1):53–61.
- Endo, N., Matsumoto, J., y Lwin, T. (2009). Trends in precipitation extremes over Southeast Asia. *Scientific Online Letters on the Atmosphere*, 5(1):168–171.
- Eridanus (2018). Recopilación histórica y representación espacial de eventos asociados a problemas de exceso hídrico : inundaciones , aluviones y tsunamis. pp. 8–32.
- European Council (1991). Consolidated Text Produced by the CONSLEG System of the Office for Official Publications of the European Communities. Council Directive of 16 June 1975 Concerning the Quality Required of Surface Water Intended for the Abstraction of Drinking Water in the Member States (75/440/EEC). *Office for Official Publications of the European Communities. CONSLEG:1975L0440 31/12/1991*.
- Fetter, C. (2001). *Applied Hydrogeology*. Lynch, P. Ed. Prentice Hall Inc., Upper Saddle River, NJ, USA, 4th edición.
- Gao, H., Tang, Q., Shi, X., Zhu, C., Bohn, T., y Su, F. (2009). Water Budget Record from Variable Infiltration Capacity (VIC) Model Algorithm Theoretical Basis Document. *Report - Version 1.2, (Vic):pp. 57*.
- Geissen, V., Mol, H., Klumpp, E., Umlauf, G., Nadal, M., Van der Ploeg, M., Van de Zee, S. E., y Ritsema, C. J. (2015). Emerging pollutants in the environment: a challenge for water resource management. *International soil and water conservation research*, 3(1):57–65.
- Gibbs, W.J. (1975). Drought, its definition, delineation and effects. *In Drought: Lectures Presented at the 26th Session of the WMO. Report No. 5. WMO, Geneva*, pp. 3–30.
- Girão Braga, G., Becker, V., Neuciano Pinheiro de Oliveira, J., Rodrigues de Mendonça Junior, J., Felipe de Medeiros Bezerra, A., Macêdo Torres, L., Marília Freitas Galvão, Â., y Mattos, A. (2015). Influence of extended drought on water quality in tropical reservoirs in a semiarid region. *Acta Limnologica Brasiliensia*, 27(1):15–23.
- Gumus, V. y Algin, H. M. (2017). Meteorological and hydrological drought analysis of the SeyhanCeyhan River Basins, Turkey. *Meteorological Applications*, 24(1):62–73.
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., y Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1-2):80–91.
- Gustard, A., Bullock, A., y Dixon, J. M. (1992). Low flow estimation in the United Kingdom.

- Report - UK Institute of Hydrology, 108(108).
- Harkins, R. D. (1974). An objective water quality index. *Journal of the Water Pollution Control Federation*, 46(3).
- Horton, R. (1965). An Index Number System for Rating Water Quality. *Journal of Water Pollution Control Federation*, 37(3):300–306.
- House, M. A. (1989). A Water Quality Index for River Management. *Water and Environment Journal*, 3(4):336–344.
- Hrdinka, T., Novický, O., Hanslík, E., y Rieder, M. (2012). Possible impacts of floods and droughts on water quality. *Journal of Hydro-Environment Research*, 6(2):145–150.
- Hughes, D. y Hannart, P. (2003). A desktop model used to provide an initial estimate of the ecological instream flow requirements of rivers in south africa. *Journal of Hydrology*, 270:167–181.
- Hulley, G., Robert Freepartner, Malakar, N., y Sarkar, S. (2016). Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) MOD21 Land Surface Temperature and Emissivity Product (MOD21) Users' Guide - Collection 6. (December):1–26.
- ICGW (1980). Surface water and groundwater interaction. international commission on groundwater. in a contribution to the international hydrological programme. *The United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO): Paris, France*.
- INN (1987). Norma chilena (NCh) 1333. Requisitos de calidad de agua para diferentes usos. *Instituto nacional de normalización*, p. 15.
- INN (2005). Norma Chilena Oficial - Agua Potable - Parte 1: Requisitos y el documento Guidelines for drinking-water quality. *Instituto nacional de normalización*.
- IPCC (2013). *Preguntas frecuentes Cambio climático 2013 Bases físicas Resumen para responsables de políticas*.
- IPP (2002). Determinación de la capacidad de carga de las zonas estuarinas de los ríos valdivia y bueno, x región.
- Jarraud, M. y Steiner, A. (2012). *Summary for policymakers*, volumen 9781107025.
- Kachroud, M., Trolard, F., Kefi, M., Jebari, S., y Bourrié, G. (2019). Water quality indices: Challenges and application limits in the literature. *Water (Switzerland)*, 11(2):1–26.
- Kannel, P. R., Lee, S., Lee, Y. S., Kanel, S. R., y Khan, S. P. (2007). Application of water quality indices and dissolved oxygen as indicators for river water classification and urban impact assessment. *Environmental Monitoring and Assessment*, 132(1-3):93–110.
- Kelly, L., Kalin, R. M., Bertram, D., Kanjaye, M., Nkhata, M., y Sibande, H. (2019). Quantification of temporal variations in base flow index using sporadic river data: Application

- to the Bua catchment, Malawi. *Water (Switzerland)*, 11(5).
- Khan, A. A., Tobin, A., Paterson, R., Khan, H., y Warren, R. (2005). Application of ccme procedures for deriving site-specific water quality guidelines for the ccme water quality index. *Water Quality Research Journal*, 40(4):448–456.
- Kling, H., Fuchs, M., y Paulin, M. (2012). Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios. *Journal of Hydrology*, 424-425:264–277.
- Knoben, W. J., Freer, J. E., y Woods, R. A. (2019). Technical note: Inherent benchmark or not? Comparing Nash-Sutcliffe and Kling-Gupta efficiency scores. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(10):4323–4331.
- Krause, P., Boyle, D. P., y Bäse, F. (2005). Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences*, 5:89–97.
- Kulkarni, A. V., Singh, S. K., Mathur, P., y Mishra, V. D. (2006). Algorithm to monitor snow cover using AWiFS data of RESOURCESAT-1 for the Himalayan region. *International Journal of Remote Sensing*, 27(12):2449–2457.
- Li, X., Jiang, F., Li, L., y Wang, G. (2011). Spatial and temporal variability of precipitation concentration index, concentration degree and concentration period Xinjiang, China. *International Journal of Climatology*, 31(11):1679–1693.
- Liang, X., Lettenmaier, D., Wood, E., y Burges, S. (1994). A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. *Geophysical Research*, 99(D7):14415.
- Little, C., Lara, A., McPhee, J., y Urrutia, R. (2009). Revealing the impact of forest exotic plantations on water yield in large scale watersheds in South-Central Chile. *Journal of Hydrology*, 374(1-2):162–170.
- Lorenzo-Lacruz, J., Vicente-Serrano, S. M., López-Moreno, J. I., Beguería, S., García-Ruiz, J. M., y Cuadrat, J. M. (2010). The impact of droughts and water management on various hydrological systems in the headwaters of the Tagus River (central Spain). *Journal of Hydrology*, 386(1-4):13–26.
- Lumb, A., Sharma, T. C., Bibeault, J.-F., y Klawunn, P. (2011). A Comparative Study of USA and Canadian Water Quality Index Models. *Water Quality, Exposure and Health*, 3(3-4):203–216.
- McKee, T., Doesken, N., y Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: *Preprints, Eighth Conference on Applied Climatology, January 17 e 22, Anaheim, California*, pp. 179 – 184.
- Meza, L., Soza, S., y Corso, S. (2010). *Gestión del Riesgo de Sequía*.
- Ministerio de Justicia (2018). Decreto con fuerza de ley 1122. Fija texto del Código de Aguas. Fecha Publicación 29-OCT-1981. Última actualización 27-ENE-2018. *BCN Legislación*

- Chilena*, (1981):1–95.
- Mishra, A. K. y Singh, V. P. (2010). A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391(1-2):202–216.
- MMA (2017). Guía para la Elaboración de Normas Secundarias de Calidad Ambiental en Aguas Continentales y Marinas. *Ministerio del Medio Ambiente*.
- MOP (2018). Plan regional de infraestructura y gestión del recurso hídrico al 2018, región de los ríos. *Ministerio de Obras Públicas*.
- Mosley, L. M. (2015). Drought impacts on the water quality of freshwater systems; review and integration. *Earth-Science Reviews*, 140:203–214.
- Ngongondo, C. S. (2006). An analysis of long-term rainfall variability, trends and groundwater availability in the Mulunguzi river catchment area, Zomba mountain, Southern Malawi. *Quaternary International*, 148(1):45–50.
- Nijssen, B., Schnur, R., y Lettenmaier, D. P. (2001). Global retrospective estimation of soil moisture using the variable infiltration capacity land surface model, 1980-93. *Journal of Climate*, 14(8):1790–1808.
- Oporto, J. y Ecodesa (2013). Identificación de Elementos Claves para Apoyar el Desarrollo del Turismo Regional a través del Fomento de la Pesca Recreativa de la Región de Los Ríos.
- Oppliger, A., Höhl, J., y Fragkou, M. (2019). Escasez de agua: develando sus orígenes híbridos en la cuenca del Río Bueno, Chile. *Revista de geografía Norte Grande*, (73):9–27.
- Ortiz-Gómez, R., Cardona-Díaz, J. C., Ortiz-Robles, F. A., y Alvarado-Medellín, P. (2018). Characterization of droughts by comparing three multiscale indices in Zacatecas, Mexico. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 9(3):47–91.
- Palmer, W. C. (1965). *Meteorological drought*, volumen 30. US Department of Commerce, Weather Bureau.
- Pandey, G. y Madhuri, S. (2014). Heavy Metals Causing Toxicity in Fishes. *Journal of Physics: Conference Series*, 1294(6).
- Pesce, S. F. y Wunderlin, D. A. (2000). Use of water quality indices to verify the impact of Córdoba City (Argentina) on Suquia River. *Water Research*, 34(11):2915–2926.
- Potop, V., Možný, M., y Soukup, J. (2012). Drought evolution at various time scales in the lowland regions and their impact on vegetable crops in the Czech Republic. *Agricultural and Forest Meteorology*, 156:121–133.
- Proyecto FIPA 2016-19, P. (2017). Levantamiento de información de pisciculturas en Chile y su incorporación a la IDE de la División de Acuicultura. p. 109.

- Quiring, S. M. y Papakryiakou, T. N. (2003). An evaluation of agricultural drought indices for the Canadian prairies. *Agricultural and Forest Meteorology*, 118(1-2):49–62.
- Rahman, M. R. y Lateh, H. (2016). Meteorological drought in Bangladesh: assessing, analysing and hazard mapping using SPI, GIS and monthly rainfall data. *Environmental Earth Sciences*, 75(12).
- Rhee, J., Im, J., y Carbone, G. J. (2010). Remote Sensing of Environment Monitoring agricultural drought for arid and humid regions using multi-sensor remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, 114(12):2875–2887.
- Riggs, G. A., Hall, D. K., y Román, M. O. (2017). Overview of nasa’s modis and visible infrared imaging radiometer suite (viirs) snow-cover earth system data records. *Earth System Science Data*, 9(2):765–777.
- Russell-Smith, J. y Edwards, A. C. (2006). Seasonality and fire severity in savanna landscapes of monsoonal northern Australia. *International Journal of Wildland Fire*, 15(4):541–550.
- Saffran, K., Cash, K., y Hallard, K. (2001). CCME Water Quality Index 1.0 User’s Manual. *Canadian Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life*, pp. 1–5.
- Santos, L., Thirel, G., y Perrin, C. (2018). Technical note: Pitfalls in using log-transformed flows within the KGE criterion. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, pp. 1–14.
- Sarricolea, P. y Meseguer-Ruiz, O. (2015). Sequías en Chile central a partir de diferentes índices en el período 1981-2010. *Investigaciones Geográficas*, (50):19.
- Seiler, R. A., Hayes, M., y Bressan, L. (2002). Using the standardized precipitation index for flood risk monitoring. *International Journal of Climatology*, 22(11):1365–1376.
- SERNAGEOMIN (2003). Mapa Geológico de Chile: versión digital. Publicación Geológica Digital, No. 4 (CD-ROM, versión 1.0, 2003. *Servicio Nacional de Geología y Minería. Ministerio de Chile*.
- SERNAGEOMIN (2017). Principales desastres ocurridos desde 1980. *Servicio Nacional de Geología y Minería. Ministerio de Chile*, p. 45.
- Singh, S. K., Pahlow, M., Booker, D. J., Shankar, U., y Chamorro, A. (2019). Towards baseflow index characterisation at national scale in New Zealand. *Journal of Hydrology*, 568:646–657.
- Singh, V. (2015). Flow Duration Curve. *Introduction to Tsallis Entropy Theory in Water Engineering*, pp. 303–326.
- Sörensson, A. A., Menéndez, C. G., Ruscica, R., Alexander, P., Samuelsson, P., y Willén, U. (2010). Projected precipitation changes in South America: A dynamical downscaling within CLARIS. *Meteorologische Zeitschrift*, 19(4):347–355.

- Stephens, S. L., Burrows, N., Buyantuyev, A., Gray, R. W., Keane, R. E., Kubian, R., Liu, S., Seijo, F., Shu, L., Tolhurst, K. G., y Van Wagendonk, J. W. (2014). Temperate and boreal forest mega-fires: Characteristics and challenges. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 12(2):115–122.
- Swamee, P. K. y Tyagi, A. (2007). Improved Method for Aggregation of Water Quality Subindices. *Journal of Environmental Engineering*, 133(2):220–225.
- Tallaksen, L. y van Lanen, H., editores (2004). *Hydrological drought. Processes and estimation methods for streamflow and groundwater*. Número 48 en Developments in water science. Elsevier.
- Thiemig, V., Rojas, R., Zambrano-Bigiarini, M., y De Roo, A. (2013). Hydrological evaluation of satellite-based rainfall estimates over the Volta and Baro-Akobo Basin. *Journal of Hydrology*, 499:324–338.
- Tirivarombo, S., Osupile, D., y Eliasson, P. (2018). Drought monitoring and analysis: Standardised Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) and Standardised Precipitation Index (SPI). *Physics and Chemistry of the Earth*, 106:1–10.
- Tunc Dede, O., Telci, I. T., y Aral, M. M. (2013). The Use of Water Quality Index Models for the Evaluation of Surface Water Quality: A Case Study for Kirmir Basin, Ankara, Turkey. *Water Quality, Exposure and Health*, 5(1):41–56.
- Tyagi, S., Sharma, B., Singh, P., y Dobhal, R. (2020). Water Quality Assessment in Terms of Water Quality Index. *American Journal of Water Resources*, 1(3):34–38.
- UChile (2016). Estudio de cuencas 2: Análisis de las condicionantes para el desarrollo hidroeléctrico en las cuencas de los ríos Maule, Biobío, Toltén, Valdivia, Bueno, Puelo y Yelcho, desde el potencial de generación a las dinámicas socio-ambientales. p. 796.
- Urrutia-Jalabert, R., González, M. E., González-Reyes, Á., Lara, A., y Garreaud, R. (2018). Climate variability and forest fires in central and south-central Chile. *Ecosphere*, 9(4).
- USGS (2020). USGS EROS Archive - Digital Elevation - Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1 Arc-Second Global. United States Geological Survey. Retrieved from: Shuttle Radar Topography Mission 1 Arc-Second Global (Digital Object Identifier (DOI) number: /10.5066/F7PR7TFT).
- Valderrama, L., Contreras-Reyes, J. E., y Carrasco, R. (2018). Ecological impact of forest fires and subsequent restoration in Chile. *Resources*, 7(2):1–10.
- Valdes-Abellan, J., Pardo, M. A., y Tenza-Abril, A. J. (2017). Observed precipitation trend changes in the western Mediterranean region. *International Journal of Climatology*, 37:1285–1296.
- Van Der Schrier, G., Barichivich, J., Briffa, K. R., y Jones, P. D. (2013). A scPDSI-based global data set of dry and wet spells for 1901-2009. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 118(10):4025–4048.

- Van-rooy, M. (1965). A rainfall anomaly index (rai). *Independent of the Time and Space. Notos*, 14:43–48.
- van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G. C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J. F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S. J., y Rose, S. K. (2011). The representative concentration pathways: An overview. *Climatic Change*, 109(1):5–31.
- van Werkhoven, K., Wagener, T., Reed, P., y Tang, Y. (2009). Sensitivity-guided reduction of parametric dimensionality for multi-objective calibration of watershed models. *Advances in Water Resources*, 32(8):1154–1169.
- Vargas, X., Ricchetti, F., Jerez, C., y Mendoza, P. (2020). Informe Proyecto ARClím: Hidrología. *Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, coordinado por Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia y Centro de Cambio Global UC para el Ministerio del Medio Ambiente a través de La Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). Santiago.*
- Verdon, D. y Franks, S. W. (2007). Long-term drought risk assessment in the Lachlan River Valley – a paleoclimate perspective. *Australasian Journal of Water Resources*, 11(2):145–152.
- Vicente-Serrano, S. M. (2015). The Climate Data Guide: Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI). *National Center for Atmospheric Research Staff (Eds). Last modified 18 Jul 2015.*
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., y López-Moreno, J. I. (2010a). A multiscale drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 23(7):1696–1718.
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., y López-Moreno, J. I. (2011a). Comment on Characteristics and trends in various forms of the Palmer Drought Severity Index (PDSI) during 1900–2008 by Aiguo Dai. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 116(19).
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., López-Moreno, J. I., Angulo, M., y El Kenawy, A. (2010b). A new global 0.5° gridded dataset (1901–2006) of a multiscale drought index: Comparison with current drought index datasets based on the palmer drought severity index. *Journal of Hydrometeorology*, 11(4):1033–1043.
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., Lorenzo-Lacruz, J., Camarero, J. J., López-Moreno, J. I., Azorin-Molina, C., Revuelto, J., Morán-Tejeda, E., y Sanchez-Lorenzo, A. (2012). Performance of drought indices for ecological, agricultural, and hydrological applications. *Earth Interactions*, 16(10).
- Vicente-Serrano, S. M., López-Moreno, J. I., Gimeno, L., Nieto, R., Morán-Tejeda, E., Lorenzo-Lacruz, J., Beguería, S., y Azorin-Molina, C. (2011b). A multiscale global evaluation of the impact of ENSO on droughts. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 116(20):1–23.

- Vicuña, S., Gironás, J., Meza, F. J., Cruzat, M. L., Jelinek, M., Bustos, E., Poblete, D., y Bambach, N. (2013). Exploring possible connections between hydrological extreme events and climate change in central south Chile. *Hydrological Sciences Journal*, 58(8):1598–1619.
- Vincent, L. A. y Mekis, É. (2006). Changes in daily and extreme temperature and precipitation indices for Canada over the twentieth century. *Atmosphere - Ocean*, 44(2):177–193.
- Watanabe, S., Hajima, T., Sudo, K., Nagashima, T., Takemura, T., Okajima, H., Nozawa, T., Kawase, H., Abe, M., Yokohata, T., Ise, T., Sato, H., Kato, E., Takata, K., Emori, S., y Kawamiya, M. (2011). MIROC-ESM 2010: Model description and basic results of CMIP5-20c3m experiments. *Geoscientific Model Development*, 4(4):845–872.
- Wells, N., Goddard, S., y Hayes, M. J. (2004). A self-calibrating Palmer Drought Severity Index. *Journal of Climate*, 17(12):2335–2351.
- WHO (2005). Mercury in Drinking-water, Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality. *World Health Organization*, WHO/SDE/WS.
- WHO (2006). Exposure to Mercury: A major public health concern. *Preventing Disease Through Healthy Environments*, p. 4.
- WHO (2011). Guidelines for drinking-water quality. fourth edition. *WHO chronicle*, 38(4).
- WMO (1987). Standardized Precipitation Index User Guide. World Meteorological Organization. *Journal of Applied Bacteriology*, 63(3):197–200.
- Wolf, J. F. y Abatzoglou, J. (2011). The suitability of drought metrics historically and under climate change scenarios. *47th Annual Water Resources Conference, Albuquerque, NM*, pp. 7–10.
- Wolf, J. W., Abatzoglou, J., y Ryu, J. H. (2012). Evaluation of drought metrics in tracking streamflow in idaho geography and titled .evaluation of drought metrics in tracking streamflow in idaho,"has.
- World Wildlife Fund (2010). Caudal ecológico. *Caudal ecológico: Salud al ambiente, agua para la gente.*, pp. 1– 4.
- Wu, H., Svoboda, M. D., Hayes, M. J., Wilhite, D. A., y Wen, F. (2006). Appropriate application of the standardized precipitation index in arid locations and dry seasons. *International Journal of Climatology*, 27(1):65 – 79.
- Xiao, X., Moore, B., Qin, X., Shen, Z., y Boles, S. (2002). Large-scale observations of alpine snow and ice cover in Asia: Using multi-temporal VEGETATION sensor data. *International Journal of Remote Sensing*, 23(11):2213–2228.
- Yilmaz, K. K., Gupta, H. V., y Wagener, T. (2008). A process-based diagnostic approach to model evaluation: Application to the NWS distributed hydrologic model. *Water Resources Research*, 44(9):1–18.

- Yu, H., Zhang, Q., Xu, C. Y., Du, J., Sun, P., y Hu, P. (2019). Modified Palmer Drought Severity Index: Model improvement and application. *Environment International*, 130(January):104951.
- Yu, M., Li, Q., Hayes, M. J., Svoboda, M. D., y Heim, R. R. (2014). Are droughts becoming more frequent or severe in China based on the standardized precipitation evapotranspiration index: 1951-2010? *International Journal of Climatology*, 34(3):545–558.
- Yuan, W.-P. y Zhou, G.-S. (2004). Comparison between standardized precipitation index and z-index in china. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 28(4):523.
- Zelada, A. y Maquire, P. (2005). Capacidad de uso del suelo. *Asesoría Urbana*, p. 19.
- Zelada, S. (2017). Antecedentes y Marco conceptual para una gestión sostenible de la calidad del agua en la Cuenca del Río Bueno, X Región de Los Lagos. Chile. *Sustainability, Agri, Food and Environmental Research*, 5(3):27–40.
- Zelen, M. y Severo, N. (1965). Probability Functions. In: M. Abramowitz, & I. Stegun (eds.). New York, USA: Dover Publications. *Handbook of Mathematical Functions*, pp. 925–995.
- Zhong, R., Xiaohong, C., Wang, Z., Lai, C., Goddard, S., Wells, N., y Hayes, M. (2018). Calculation of the Conventional and Self-Calibrating Palmer Drought Severity Index. pp. 1–7.
- Zhong, Z., He, B. I., Guo, L., y Zhang, Y. (2019). Performance of various forms of the palmer drought severity index in China from 1961 to 2013. *Journal of Hydrometeorology*, 20(9):1867–1885.
- Zhu, Y., Wang, W., Singh, V. P., y Liu, Y. (2016). Combined use of meteorological drought indices at multi-time scales for improving hydrological drought detection. *Science of the Total Environment*, 571(1):1058–1068.

Apéndice A

Características de la cuenca

A.1. Propiedades y usos del suelo

La cuenca del río Bueno se compone por ocho subcuencas, tres de ellas son cuencas cordilleranas (UC), cuatro son cuencas intermedias (IC) y una desemboca en el mar (DC). Las cuencas UC y DC muestran un gran potencial erosivo, de acuerdo con la información proporcionada por la Figura A.1, mientras que las cuencas IC denotan una fase de madurez (estado de equilibrio).

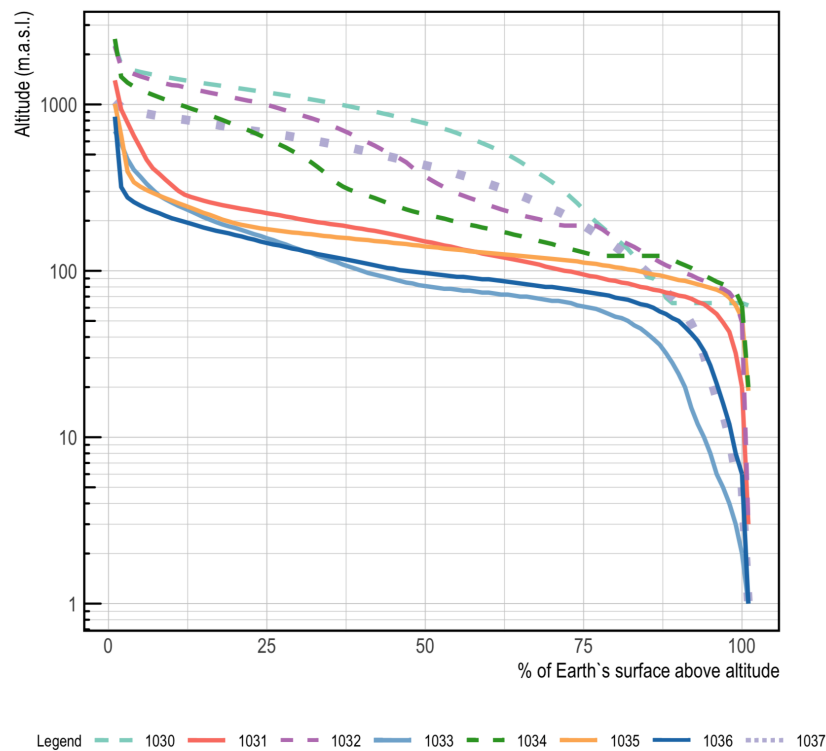


Figura A.1 Curva hipsométrica de la cuenca del río Bueno.

Luego, la Figura A.2 muestra el mapa de uso de suelo en la cuenca según la información del Catastro de Uso de Suelo y Vegetación (CONAF, 2016). Del mapa se obtiene que las praderas y bosques nativos o mixtos abarcan la mayor superficie de la cuenca –aproximadamente un 44 % y 37 %, respectivamente– seguidos de los cuerpos de agua, glaciares y humedales que comprenden el 11 % de la superficie.

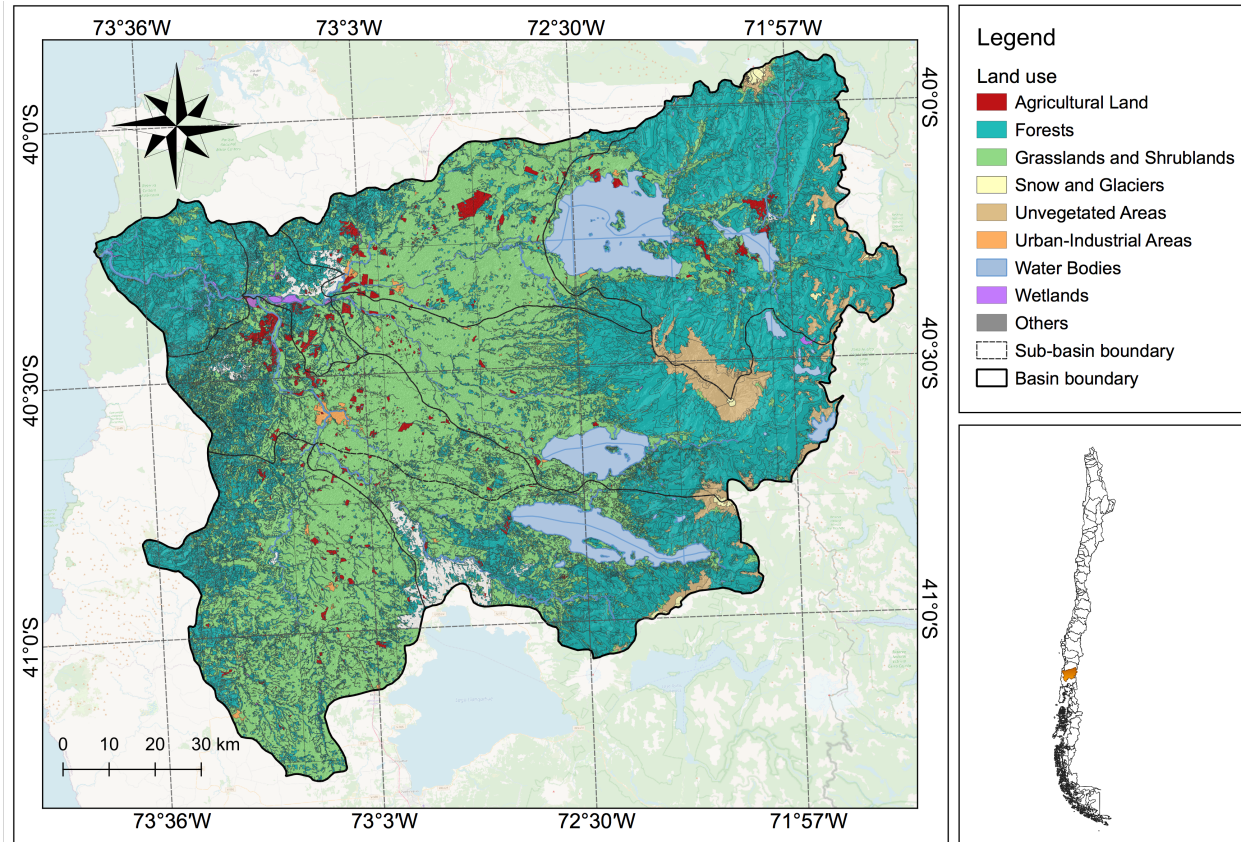


Figura A.2 Clasificación del uso de suelo en la cuenca del río Bueno. La leyenda, desde arriba hacia abajo, muestra los terrenos agrícolas, bosques, praderas y matorrales, nieves y glaciares, áreas sin vegetación, áreas urbanas-industriales, cuerpos de aguas, humedales y otros.

Para conocer/estimar cuáles son los aportes nivales que recibe la cuenca se calcula el Índice de Nieve de Diferencia Normalizada (NDSI). Para determinar el NDSI (Ec. A.1), se utiliza el satélite Landsat 8 OLI con resolución de 30 m (*sitio web*). Específicamente, se utilizan las bandas 3 y 6, la primera equivalente a las longitudes de onda espectrales de 0,53 a 0,59 μm y, la segunda responde a las longitudes de onda de 1,57 a 1,65 μm (Burton-Johnson *et al.*, 2016).

$$NDSI = \frac{Green - SWIR}{Green + SWIR} \quad (A.1)$$

donde, Green es el verde visible y representa la banda 3 y, SWIR es el infrarrojo de onda corta denotado por la banda 6.

El NDSI varía según la región estudiada. No obstante, la literatura recomienda que un píxel con $\text{NDSI} \leq 0,0$ es una superficie terrestre sin nieve (Riggs *et al.*, 2017) y, $\text{NDSI} \geq 0,40$ es el umbral mínimo para detectar la presencia de nieve (Kulkarni *et al.*, 2006; Xiao *et al.*, 2002).

Desde la plataforma *EarthExplorer*, son descargadas las imágenes satelitales para la cuenca del río Bueno. Debido a la interferencia de nubes quedan descartadas las imágenes satelitales previas al año 2015, quedando disponible el período 2018 a 2020. Se seleccionan seis imágenes tales que permitan evaluar el inicio, almacenamiento y derretimiento del manto nival. La Figura A.1 presenta el comportamiento del NDSI desde junio/2018 a septiembre/2020.

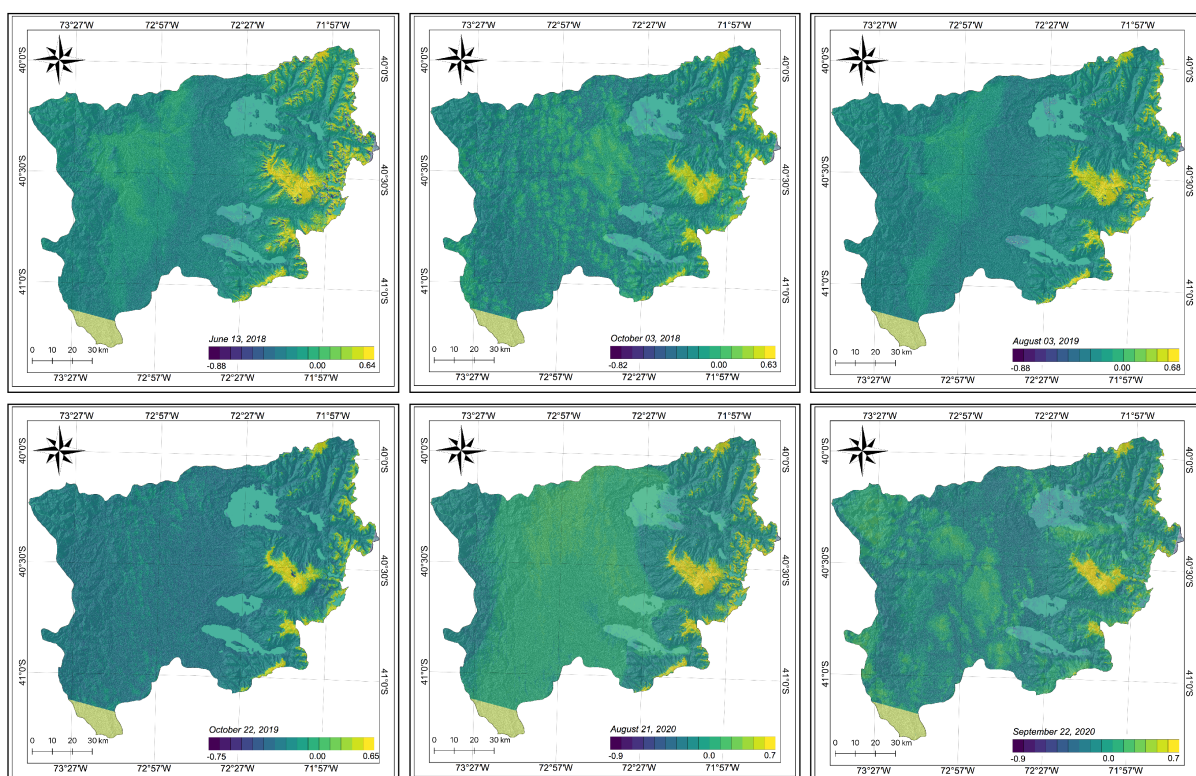


Figura A.3 Índice de Nieve de Diferencia Normalizada en la cuenca del río Bueno. Desde izquierda a derecha, primera fila: junio/2018, octubre/2018, y agosto/2019. Segunda fila: octubre/2019, agosto/2020, y septiembre/2020.

A.2. Red hidrométrica y producto grillado CR2MET

A continuación, se presentan las estaciones meteorológicas, fluviométricas y de calidad del agua de la cuenca del río Bueno. Posteriormente, a modo ejemplo y verificación, se muestra la distribución espacial de precipitaciones y temperaturas medias anuales obtenidas del producto grillado CR2MET v2.0 para un año hidrológico.

A.2.1. Meteorología

La cuenca del río Bueno cuenta con 20 estaciones meteorológicas operativas, sin embargo, la estadística promedio no supera los 10 años de registro. En consecuencia, seis estaciones quedan disponibles para realizar un estudio de las precipitaciones, donde solo tres presentan una estadística de 30 años. En términos de distribución espacial, dos estaciones se ubican en la subcuenca UC-1030 y las cuatro restantes en las subcuencas UC-1032, UC-1034, IC-1035 e IC-1036. La Tabla A.1 muestra las estaciones meteorológicas y los respectivos valores medios anuales registrados para el período 1985/2015.

Tabla A.1 Precipitación media anual del período histórico 1985/2015.

Estación	Latitud (°)	Longitud (°)	PMA* (mm)	Subcuenca
Lago Maihue**	-40.22	-72.15	2.700	UC-1030
Lago Ranco**	-40.32	-72.47	1.914	UC-1030
Futacuhuin***	-40.72	-72.44	1.624	UC-1032
Rupanco***	-40.77	-72.68	1.619	UC-1034
Fresia***	-41.15	-73.41	1.553	IC-1035
Adolfo Matthei**	-40.59	-73.11	1.271	IC-1036

*PMA: precipitación media anual

**Período 1985/2015

***Período 1993/2015

A.2.2. Fluviometría

De las 19 estaciones fluviométricas operativas, solamente 9 presentan una estadística superior a 20 años y cinco cumplen con el requerimiento de 30 años (1985/2015). En consideración a las estaciones con una estadística mayor a 20 años, se analiza su distribución espacial. Las subcuencas UC-1030, UC-1034, IC-1035 e IC-1036 cuentan con dos estaciones dentro de su superficie, mientras que la subcuenca UC-1032 presenta un punto de medición, siendo en el río Pilmaiquén en San Pablo. En consecuencia, las subcuencas IC-1031, IC-1033 y DC-1037 no presentan registros de caudales, o al menos no los suficientes para evaluar estadísticos descriptivos. La Tabla A.2 muestra las estaciones fluviométricas y los respectivos valores medios anuales registrados para el período 1985/2015.

Tabla A.2 Caudal medio anual del período histórico 1985/2015.

Estación	Latitud (°)	Longitud (°)	CMA* (m ³ /s)	Subcuenca
Río Calcurrupe En Desembocadura	-40.25	-72.27	176,9	UC-1030
Río Pilmaiquen En San Pablo	-40.38	-73.00	172,1	UC-1032
Río Rahue En Desague Lago Rupanco	-40.79	-72.69	104,4	UC-1034
Río Negro En Chahuilco	-40.71	-73.23	60,9	IC-1035
Río Rahue En Forrahue	-40.52	-73.28	243,1	IC-1036

*CMA: caudal medio anual

A.2.3. Calidad de aguas

La cuenca del río Bueno dispone de 16 estaciones de calidad (Tabla A.3), que miden y registran parámetros fundamentales de la calidad del agua. De las estaciones disponibles se seleccionan las estaciones **G3**, **G4**, **G6**, **G8**, **G11**, **G12** y **G16** para el análisis de la calidad de los ríos Bueno, Pilmaiquén, Rahue y Negro.

Tabla A.3 Red de estaciones de calidad del agua y pozos en la cuenca del río Bueno. La tabla presenta las estaciones bajo la gobernanza de la Dirección General de Aguas.

G_i	Nombre estación	Latitud ($^{\circ}$)	Longitud ($^{\circ}$)	Subcuenca	Registro
1	Río Calcurrupe En Desembocadura	-40.23	-72.26	UC-1030	1987 - 2020
2	Río Nilahue En Mayay	-40.29	-72.17	UC-1030	1987 - 2020
3	Río Bueno En Puerto Lapi (Ca)	-40.25	-72.64	IC-1031	1987 - 2020
4	Pozo Fundo Las Vertientes En Río Bueno	-40.32	-72.98	IC-1031	1997 - 2020
5	Río Llollehue Ante Río Bueno	-40.27	-73.08	IC-1031	2000 - 2020
6	Río Pilmaiquén En San Pablo	-40.38	-72.99	UC-1032	1997 - 2020
7	Río Gol-Gol Bajo Salto El Indio	-40.66	-72.18	UC-1032	1990 - 2019
8	Río Bueno En Trumao	-40.34	-73.19	IC-1033	1987 - 2020
9	Río Rahue En Desague Lago Rupanco	-40.78	-72.69	UC-1034	1987 - 2019
10	Río Coihueco Antes Junta Pichicope	-40.94	-72.68	UC-1034	2000 - 2019
11	Río Rahue En Longitudinal (Ca)	-40.65	-73.15	UC-1034	2000 - 2019
12	Río Negro En Chahuilco	-40.72	-73.22	IC-1035	1987 - 2019
13	Pozo Lechera Fresia (Leche Sur)	-41.15	-73.42	IC-1035	1997 - 2019
14	Pozo Población Kolbe En Osorno	-40.56	-73.12	IC-1036	1997 - 2015
15	Río Damas En Tacamo	-40.63	-73.04	IC-1036	1990 - 2019
16	Río Rahue En Forrahue	-40.53	-73.27	IC-1036	1987 - 2019

A.2.4. Producto grillado CR2MET v2.0

La precipitación media anual de las subcuencas cordilleranas (UC) oscila entre 2.400 a 3.000 mm, las subcuencas intermedias (IC) entre 1.400 a 2.100 mm y la subcuenca costera-baja (DC) bordea los 2.300 mm. Dichos valores en relación con lo expuesto en la Tabla A.1 indicarían sobreestimaciones del producto grillado CR2MET v2.0; sin embargo, de la misma tabla es posible apreciar la influencia del gradiente orográfico en la cuenca, donde las estaciones Lago Maihue y Lago Ranco (ambas ubicadas en la UC-1030) presentan una diferencia de ≈ 800 mm.

Lo anterior indica que el punto de medición es fundamental para el cálculo de las precipitaciones medias anuales y ratifica el uso del producto grillado CR2MET v2.0, puesto que éste considera toda la extensión de cada subcuenca y no un área específica de medición, como es el caso de las estaciones meteorológicas.

Como ejemplo de la distribución del producto grillado CR2MET v2.0 en la cuenca del río Bueno, se presenta el año hidrológico 2000 en la Figura A.4.

Gridded product CR2MET v2.0

Period 2000/2001

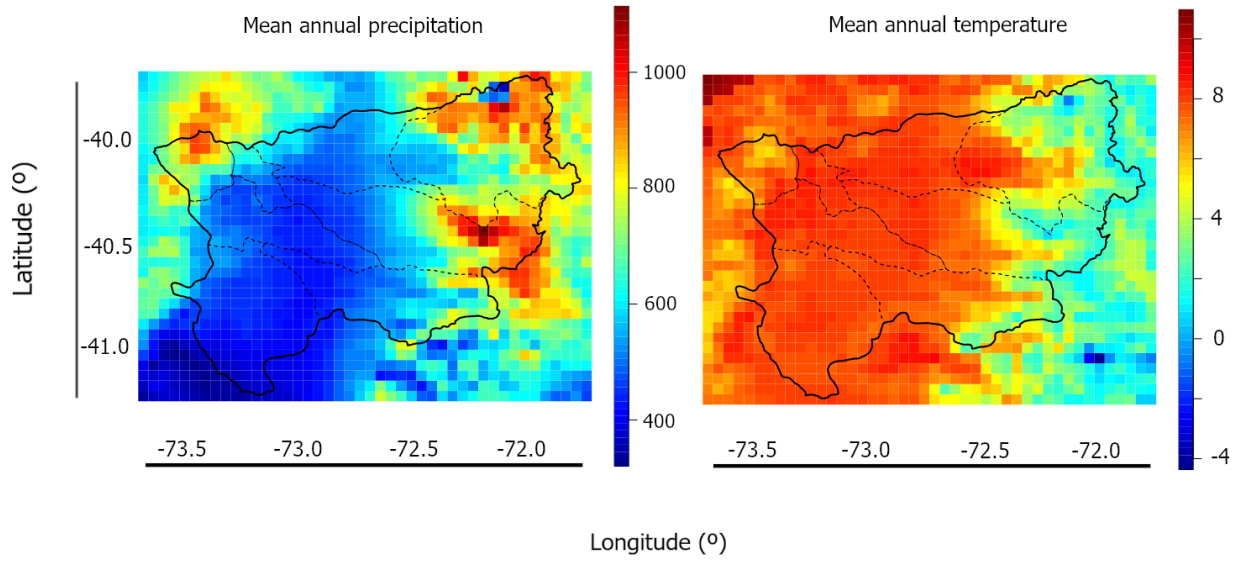


Figura A.4 Distribución del producto grillado CR2MET v2.0 en la cuenca del río Bueno. La línea continua representa el límite de la cuenca, y las líneas punteadas los lindes entre las subcuencas del río Bueno.

Apéndice B

Modelo *Variable Infiltration Capacity* (VIC)

El modelo *Variable Infiltration Capacity* (VIC), se basa en una grilla compuesta de múltiples celdas que permiten representar la variabilidad que presentan forzantes meteorológicas (e.g., precipitación, humedad relativa, velocidad del viento, radiación de onda larga y corta).

VIC utiliza una función de transferencia lineal, caracterizada por su función de respuesta al impulso interno para calcular el enrutamiento dentro de la celda. Luego, suponiendo que toda la escorrentía sale de una celda en una sola dirección de flujo, se utiliza un enrutamiento de canal basado en la ecuación Saint-Venant para simular la descarga en la salida de la cuenca.

La ejecución de VIC requiere de diversos archivos de entrada, pueden ser construidos usando lenguajes de programación y análisis en Sistemas de Información Geográfica. A continuación, son mencionados de forma general los conjuntos de datos requeridos para la modelación.

1. Global Parameter File (archivo de memoria base): define las ubicaciones de otros archivos de entrada/ salida y establece las condiciones generales que gobiernan la modelación (e.g., fecha de inicio/término, paso de tiempo, número de simulaciones, modos de operación).
2. Meteorological Forcing Files (forzantes meteorológicas): se requiere la temperatura media del aire, precipitación total, presión atmosférica y de vapor, radiación de onda larga y corta, velocidad del viento.
3. Soil Parameter File (parámetros del suelo): define el número de identificación de cada celda, su respectiva información geográfica (lat/lon), condiciones de la humedad, textura del suelo, entre otras características.
4. Vegetation Library File (archivo de cobertura vegetal): descripción de los tipos de cubierta vegetal-terrestre disponibles.
5. Vegetation Parameter File (archivo de parámetros vegetacionales): tipos de cubierta terrestre, áreas fraccionarias, profundidades de enraizamiento e Índice de área foliar (LAI) de los diversos bloques de cubierta terrestre dentro de cada celda de la cuadrícula.

La Figura B.1 muestra el esquema teórico del modelo, indicándose los flujos de entrada y salida que ocurren en cada celda de la grilla.

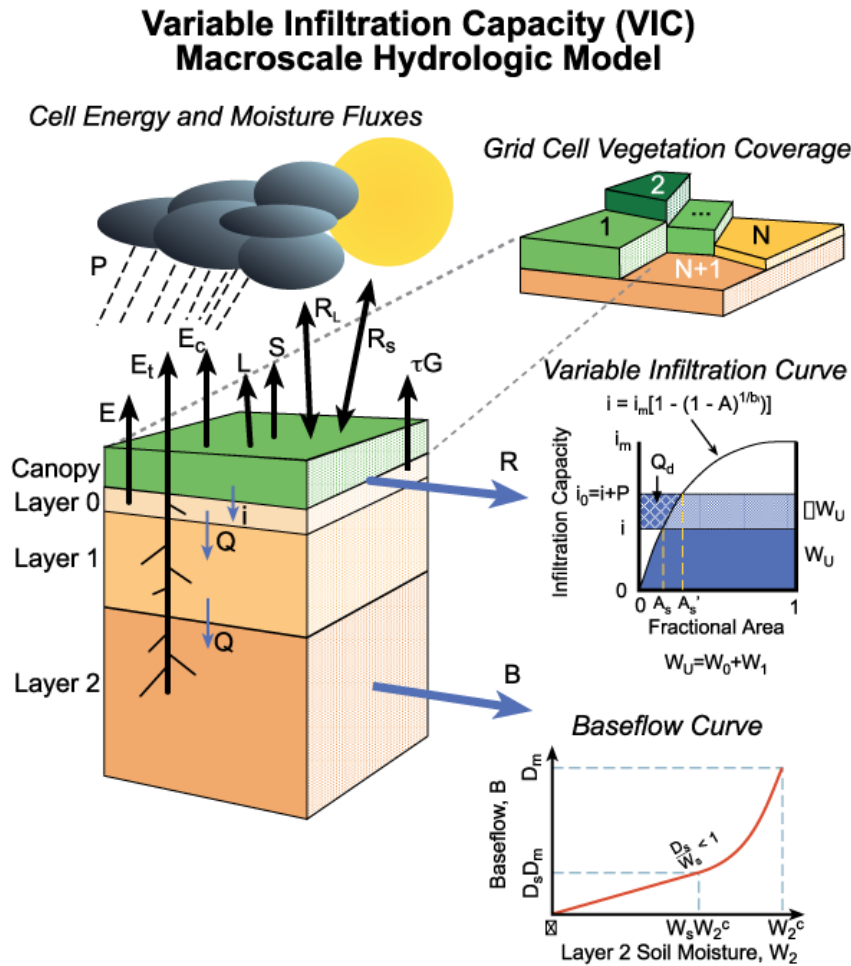


Figura B.1 Esquema del modelo *Variable Infiltration Capacity*, con representación en mosaico de la cobertura vegetal y tres capas de humedad del suelo. Fuente: Gao *et al.* (2009)

Nijssen *et al.* (2001); Cherkauer *et al.* (2003) y Gao *et al.* (2009) realizan una completa descripción del modelo.

Apéndice C

Indicadores e índices hidroclimáticos

C.1. Indicadores

De acuerdo con la información proporcionada en el Capítulo 3, sección 3.2.3, los indicadores hidroclimáticos se definen en función de variables hidroclimáticas, tales como precipitación, temperatura y caudal. Los utilizados en el presente estudio se exponen en las Tablas C.1 y C.2.

Tabla C.1 Indicadores meteorológicos basados en precipitación. Los indicadores RR'X han sido adaptados y/o modificados de Aguilar *et al.* (2005) y Bhatti *et al.* (2020).

Id	Unidad	Nombre	Definición
RR'X	día	Días lluviosos (RR10), muy lluviosos (RR25), fuertemente (RR50), severamente (RR70), extremadamente (RR90) y excepcionalmente (RR100) días lluviosos.	Número de días en el año con precipitaciones entre 10 a 25 mm, 25 a 50 mm, 50 a 70 mm, 70 a 90 mm, 90 a 100 mm y sobre los 100 mm.
LWP, LDP	día	Días lluviosos (secos) consecutivos	Duración máxima de los días consecutivos con precipitación mayor (menor) a 1 mm.
DD10	día	Días ligeramente secos	Número de días en el año con precipitaciones entre 1 a 10 mm.
DD	día	Días secos	Número de días en el año con precipitaciones menores a 1 mm.

Tabla C.2 Indicadores hidrológicos basados en caudal.

Id	Unidad	Nombre	Definición
$Q_{\text{mean}},$ $Q_{\text{min}},$ Q_{max}, Q_{p10} y Q_{p90}	m^3/s	Caudal medio, mínimo y máximo anual y del percentil 10 y 90	Caudales medios y extremos anuales, y caudal del décimo y nonagésimo percentil de la serie de caudales medios diarios.
$Q5, Q50$ y $Q95$	m^3/s	5, 50 y 95 percentil de la Curva de Duración de Caudales	Caudal correspondiente a la zona alta (Q5), media (Q50) y baja (Q95) de la curva de duración de caudales (FDC).
$f_{Q_i}^{Q5}$ y $f_{Q_i}^{Q95}$	-	Factor de cambio respecto a Q5 y Q95	Partición de los indicadores $Q_{\text{mean}}, Q_{\text{min}}, Q_{\text{max}}, Q_{p10}, Q_{p90}, Q5, Q50,$ y $Q95$ por la mediana de Q5 y Q95.

C.2. Índices

Para la evaluación de eventos extremos –adicional a los indicadores– se evalúan índices hidrometeorológicos, entre ellos, el Índice de Precipitación Estandarizado, el Índice de Sequía Severo de Palmer, y el Índice de Flujo Base. A continuación, se detallan las características de cada índice.

C.2.1. Índice de Precipitación Estandarizado

Para determinar el índice, la precipitación observada se ajusta a una función distribución de acumulada (CDF), generalmente Gamma o Pearson III. Luego, utilizando la aproximación de Zelen y Severo (1965), la CDF se transforma en una variable normal estándar Z , de media cero y varianza uno (Ec. C.1).

$$\text{SPI} = \begin{cases} - \left(t - \frac{c_0 + c_1 \cdot t + c_2 \cdot t^2}{1 + d_1 \cdot t + d_2 \cdot t^2 + d_3 \cdot t^3} \right) & \text{si } 0,0 \leq H(x) < 0,5 \\ + \left(t - \frac{c_0 + c_1 \cdot t + c_2 \cdot t^2}{1 + d_1 \cdot t + d_2 \cdot t^2 + d_3 \cdot t^3} \right) & \text{si } 0,5 \leq H(x) < 1,0 \end{cases} \quad (\text{C.1})$$

$$t = \begin{cases} \sqrt{\ln \left(\frac{1}{H(x)} \right)} & \text{si } 0,0 \leq H(x) < 0,5 \\ \sqrt{\ln \left(\frac{1}{(1-H(x))^2} \right)} & \text{si } 0,5 \leq H(x) < 1,0 \end{cases} \quad (\text{C.2})$$

$$H(x) = q + (1 - q) \cdot G(x) \quad (\text{C.3})$$

donde c_i y d_i son coeficientes, t es variable, $H(x)$ es una función de probabilidad acumulada, q la probabilidad de tener valores de precipitación iguales a cero y, $G(x)$ es la probabilidad acumulada de la función Gamma incompleta. Para una completa descripción revisar Ortiz-Gómez *et al.* (2018).

El cálculo del SPI solo requiere la precipitación mensual, por lo que no existen problemas de calibración de parámetros (Du *et al.*, 2013). Por estas razones, el SPI es adecuado y recomendado en cuencas que no están controladas o donde los datos hidrológicos son escasos (Yuan y Zhou, 2004), permitiendo revelar las condiciones de humedad. Diversos estudios alrededor del mundo, avalan la capacidad que tiene el índice para determinar las condiciones relativas de humedad, entre los que se encuentran países como Argentina (Seiler *et al.*, 2002), Canadá (Quiring y Papakryiakou, 2003), Estados Unidos (Wu *et al.*, 2006) e Italia (Tirivarombo *et al.*, 2018).

La clasificación del índice de acuerdo con McKee *et al.* (1993) y WMO (1987), se presenta en la Tabla C.3.

Tabla C.3 Clasificación del Índice Estandarizado de Precipitación (SPI). Adaptada de McKee *et al.* (1993); WMO (1987).

Categoría	Valor SPI	Grado de severidad
Extremadamente húmedo	$2,00 \leq SPI$	4
Severamente húmedo	1,50 a 1,99	3
Moderadamente húmedo	1,00 a 1,49	2
Ligeramente húmedo	0,00 a 0,99	1
Ligeramente seco	0,00 a $-0,99$	1
Moderadamente seco	$-1,00$ a $-1,49$	2
Severamente seco	$-1,50$ a $-1,99$	3
Extremadamente seco	$-2,00 \geq SPI$	4

Rahman y Lateh (2016); Bhunia *et al.* (2020) y Danandeh Mehr *et al.* (2020) utilizan el SPI en la evaluación de sequías meteorológicas. Bachmair *et al.* (2018), y Dai *et al.* (2020) lo usan para la cuantificación de sequías agrícolas, y Zhu *et al.* (2016); Gumus y Algin (2017) lo emplean para el estudio de sequías hidrológicas.

C.2.2. Índice de Anomalía de Lluvia

El cálculo del RAI, incorpora un procedimiento de clasificación para asignar magnitudes a las anomalías de precipitación positivas y negativas (Ec. C.4).

$$RAI = 3 \cdot \frac{P - \bar{P}}{\bar{E} - \bar{P}} \quad (C.4)$$

donde P precipitación mensual/anual actual (observada), es decir, del mes/año en que se generará el índice (mm), \bar{P} es la precipitación mensual/anual media, y \bar{E} es la media de las diez mayores/menores precipitaciones mensuales/anuales de la serie.

La clasificación del índice se presenta en la Tabla C.4.

Tabla C.4 Clasificación del Índice de Anomalía de Lluvia (RAI). Adaptada de Van-rooy (1965).

Categoría	Valor RAI
Extremadamente húmedo	$4,0 \leq RAI$
Muy húmedo	2,0 a 4,0
Húmedo	0,0 a 2,0
Seco	0,0 a $-2,0$
Muy seco	$-2,0$ a $-4,0$
Extremadamente seco	$RAI \geq -4,00$

C.2.3. Índice de Sequía Severo de Palmer

El PDSI es un índice de base semi-física, donde se realiza un balance hídrico de cubo de dos capas, calculado a partir de dos entradas principales: precipitación y evapotranspiración potencial, ambas variables en escala mensual. Aunque depende de otras variables internas (e.g., capacidad de agua disponible), que fueron derivadas y calculadas de forma empírica utilizando los registros meteorológicos de Kansas y Iowa en el centro de los Estados Unidos con un clima semi-árido. Por tal motivo, Wells *et al.* (2004) proponen un índice autocalibrado: scPDSI (*self-calibration of PDSI*), donde los constantes empíricas se ajustan de forma automática mediante cálculos dinámicos. Estudios como Van Der Schrier *et al.* (2013); Yu *et al.* (2019); Zhong *et al.* (2019) han constatado un mejor desempeño del scPDSI sobre PDSI, entregando condiciones del clima más certeras sobre las diversas regiones del mundo. En esta investigación se utiliza el scPDSI, desde ahora en adelante PDSI, más detalles se encuentran en Wells *et al.* (2004); Zhong *et al.* (2018).

La clasificación del índice se presenta en la Tabla C.5.

Tabla C.5 Clasificación del Índice de Sequía (Hidrológica) Severo de Palmer (PDSI/PHDI). Adaptada de Wells *et al.* (2004).

Categoría	PDSI/PHDI
Extremadamente húmedo	$4,00 \leq$
Severamente húmedo	3,00 a 3,99
Moderadamente húmedo	2,00 a 2,99
Levemente húmedo	1,00 a 1,99
Ligeramente húmedo	0,50 a 0,99
Normal	$-0,49$ a $0,49$
Sequía incipiente	$-0,50$ a $-0,99$
Sequía ligera	$-1,00$ a $-1,99$
Sequía moderada	$-2,00$ a $-2,99$
Sequía severa	$-3,00$ a $-3,99$
Sequía extrema	$-4,00 \geq$

C.2.4. Índice de Flujo Base

El Índice de Flujo Base (BFI) fue desarrollado para estudiar la correlación entre la geología de una cuenca y su capacidad de almacenar y liberar agua. Kelly *et al.* (2019) define el BFI como una proporción numérica entre el flujo bajo medio del hidrograma (volumen del flujo de base) y el flujo total del río (volumen total del flujo) tal como se presenta en la ecuación C.5.

$$\text{BFI} = \frac{\text{Volumen del flujo base}}{\text{Volumen total del flujo}} \quad (\text{C.5})$$

Variado es el uso del BFI, Tallaksen y van Lanen (2004) lo utilizan como descriptor de la cuenca en los estudios de bajo caudal (i.e., sequías hidrológicas), Ngongondo (2006) evalúa la disponibilidad de agua subterránea en temas hidrogeológicos y, Hughes y Hannart (2003) lo emplean como parámetro de ingeniería para establecer los requisitos del caudal ecológico⁸ de un río.

C.3. Resultados

Como complemento a la información entregada en el Capítulo 4, se presentan detalles particulares de los resultados de las variables hidroclimáticas.

C.3.1. Período histórico 1985/2015

En la sección 4.3.1 se indica que la cuenca del río Bueno posee variabilidad en los caudales debido a la geografía de la subcuencas. En términos generales, los caudales más altos y condiciones de mayor humedad responden a las cuencas cordilleranas (UC), mientras que los caudales más bajos y condiciones de aridez se presentan en las cuencas intermedias (IC), las cuales, además, se destacan por la cantidad de días secos. La Tabla C.6 resume los valores medios de los indicadores Q_i en unidades m^3/s .

Posteriormente, la Tabla C.7 muestra la frecuencia de la región inferior del SPI. En otras palabras, la tabla contiene la cantidad de meses clasificados con condiciones de aridez leves, moderadas, severas y extremas durante el período histórico.

C.3.2. Cambio 2030/2060

Las Tablas C.8 y C.9 proporcionan información acerca de los cambios proyectados en los eventos de precipitaciones extremas asociadas a inundaciones. La Tabla C.8 muestra la disminución que presentan los días clasificados como húmedos (RR10) hasta excepcionalmente húmedos (RR100) en la cuenca del río Bueno, según las proyecciones climáticas. Luego, la Tabla C.9 expone el total de inundaciones leves, moderadas y extremas proyectadas de acuerdo con los modelos climáticos globales.

⁸Instrumento de gestión que establece la calidad, cantidad y régimen del flujo de agua requerido para mantener los componentes, funciones, procesos y la resiliencia de los ecosistemas acuáticos que proporcionan bienes y servicios a la sociedad (World Wildlife Fund, 2010).

Tabla C.6 Estadísticos de indicadores Q_i . Cada indicador se encuentra en unidades de m^3/s .

Estadístico / BNA	UC-1030	IC-1031	UC-1032	IC-1033	UC-1034	IC-1035	IC-1036	DC-1037
Q_{mean}	257,8	56,8	201,6	12,3	130,4	89,6	44,4	45,2
Q_{median}	235,6	45,5	181,2	7,6	110,7	64,7	28,9	27,1
Q_{max}	637,8	163,1	630,5	86,5	580,1	452,2	248,2	345,9
Q_{min}	66,0	15,6	47,8	1,5	22,6	16,1	7,0	2,5
Q_{p10}	93,7	19,9	69,7	2,3	41	23,5	10,1	5,8
Q_{p90}	458,5	112,8	359,1	28,5	237,2	189,2	100,1	108,7
$Q5 (\mu)$	526,6	128,4	424,6	39,7	306,7	249,5	133,6	151,3
$Q5 (Me)$	536,5	132,9	421,1	39,1	320,7	241,6	134,1	153
$Q50 (\mu)$	235,6	45,5	181,2	7,6	110,7	64,7	28,9	27,1
$Q50 (Me)$	232	45,3	181,2	7,7	111,4	65,7	29,4	27,4
$Q95 (\mu)$	78,6	17,7	59,2	1,9	31,5	20,1	8,7	4,1
$Q95 (Me)$	76,0	17,4	58,2	1,8	29,4	20,9	8,6	3,8

Tabla C.7 Frecuencia de la región inferior Índice de Precipitación Estandarizado durante el período 1985/2015. Se presenta la frecuencia absoluta n_i (número total de meses con $SPI < 0$) y la frecuencia relativa del índice f_i (cociente entre n_i y el tamaño de la muestra).

Índice	Condición / BNA	1030	1031	1032	1033	1034	1035	1036	1037
SPI-01	Leve	124; 1/3	114; 1/3	117; 1/3	115; 1/3	116; 1/3	114; 1/3	115; 1/3	112; 1/3
	Moderada	33; 1/11	39; 1/9	37; 1/9	40; 1/9	38; 1/9	45; 1/8	43; 1/8	43; 1/8
	Severa	12; 1/30	16; 2/45	14; 3/77	17; 1/21	14; 3/77	8; 1/45	13; 3/83	11; 3/98
	Extrema	9; 1/40	6; 1/60	7; 1/51	3; 1/120	6; 1/60	8; 1/45	6; 1/60	6; 1/60
SPI-03	Leve	107; 2/7	108; 2/7	103; 2/7	110; 1/3	95; 1/4	117; 1/3	110; 1/3	111; 1/3
	Moderada	33; 1/11	34; 5/53	34; 5/53	39; 9/83	36; 1/10	41; 9/79	38; 2/19	45; 1/8
	Severa	17; 1/21	21; 1/17	19; 1/19	13; 3/83	20; 1/18	12; 1/30	14; 3/77	15; 1/24
	Extrema	11; 3/98	5; 1/72	10; 1/36	6; 1/60	9; 1/40	7; 1/51	7; 1/51	4; 1/90
SPI-06	Leve	112; 1/3	109; 1/3	108; 2/7	113; 1/3	99; 2/7	113; 1/3	113; 1/3	118; 1/3
	Moderada	25; 5/72	27; 3/40	31; 5/58	32; 4/45	30; 1/12	32; 4/45	27; 3/40	32; 4/45
	Severa	12; 1/30	14; 3/77	11; 3/98	19; 1/19	12; 1/30	18; 1/20	21; 1/17	16; 2/45
	Extrema	16; 2/45	14; 3/77	15; 1/24	7; 1/51	15; 1/24	8; 1/45	8; 1/45	7; 1/51
SPI-12	Leve	102; 2/7	103; 2/7	103; 2/7	95; 1/4	104; 2/7	92; 1/4	95; 1/4	107; 2/7
	Moderada	23; 3/47	16; 2/45	18; 1/20	21; 1/17	14; 3/77	26; 7/97	16; 2/45	24; 1/15
	Severa	12; 1/30	20; 1/18	17; 1/21	22; 3/49	21; 1/17	17; 1/21	20; 1/18	19; 1/19
	Extrema	17; 1/21	16; 2/45	16; 2/45	16; 2/45	15; 1/24	18; 1/20	18; 1/20	13; 3/83

Tabla C.8 Variación fraccional del número total de días clasificado con precipitación superior a 10 mm entre 2030/2060 y 1985/2015.

Modelo/BNA	UC-1030	IC-1031	UC-1032	IC-1033	UC-1034	IC-1035	IC-1036	DC-1037
C4	-0,27	-0,21	-0,26	-0,21	-0,26	-0,13	-0,20	-0,25
C3.6	-0,28	-0,23	-0,28	-0,23	-0,26	-0,18	-0,21	-0,26
IC5	-0,32	-0,27	-0,32	-0,26	-0,29	-0,22	-0,25	-0,31
ME	-0,28	-0,22	-0,26	-0,22	-0,24	-0,13	-0,20	-0,27

Tabla C.9 Inundaciones proyectadas según los GCM: C4, C3.6, IC5 y ME mediante el uso del Índice de Precipitación Estandarizado. Los resultados presentados son el total de eventos promedio en la cuenca del río Bueno, es decir, $N_{eventos}^{condicion} = \frac{1}{8} \sum \#(HR_1 < SPI < HR_2)$ donde HR_1 y HR_2 son límites de humedad señalados en cada condición leve, moderada o extrema. Una inundación excepcionalmente extrema no se proyecta en la cuenca y, por ende, no es visualizada en la tabla.

Id	Índice/Condición	Leve [1,0 – 1,5)	Moderada [1,5 – 2,0)	Extrema [2,0 – 4,0)
C4	SPI-1	32 ± 3	17 ± 2	8 ± 1
	SPI-3	30 ± 2	17 ± 2	8 ± 1
	SPI-6	30 ± 3	19 ± 2	6 ± 1
C3.6	SPI-1	33 ± 6	17 ± 3	6 ± 1
	SPI-3	38 ± 2	17 ± 1	6 ± 1
	SPI-6	32 ± 3	17 ± 1	4 ± 1
IC5	SPI-1	30 ± 1	15 ± 3	7 ± 1
	SPI-3	31 ± 4	15 ± 2	8 ± 1
	SPI-6	28 ± 2	9 ± 1	12 ± 2
ME	SPI-1	37 ± 2	19 ± 2	6 ± 1
	SPI-3	36 ± 3	17 ± 2	5 ± 1
	SPI-6	36 ± 4	14 ± 1	5 ± 1

Posteriormente, las Tablas C.10 a C.13 muestran la frecuencia absoluta y relativa de las condiciones áridas según el SPI durante 2030/2060. Mientras que las Tablas C.14, C.15, y C.16 muestran los factores de cambio de las probabilidades de excedencia del 10%, 50% y 90% de las curvas de duración de los índices PDSI, PHDI y RAI, respectivamente.

Tabla C.10 Frecuencia del Índice de Precipitación Estandarizado durante el período 2030/2060 según el modelo CCSM4. Se presenta la frecuencia absoluta n_i (número total de meses con $SPI < 0$) y la frecuencia relativa del índice f_i (cociente entre n_i y el tamaño de la muestra).

Índice	Condición/BNA	UC-1030	IC-1031	UC-1032	IC-1033	UC-1034	IC-1035	IC-1036	DC-1037
SPI-01	Leve	137 ; 3/8	135 ; 3/8	127 ; 1/3	130 ; 1/3	128 ; 1/3	130 ; 1/3	127 ; 1/3	132 ; 3/8
	Moderada	27 ; 3/40	26 ; 7/97	31 ; 5/58	35 ; 7/72	36 ; 1/10	23 ; 3/47	31 ; 5/58	24 ; 1/15
	Severa	13 ; 3/83	13 ; 3/83	13 ; 3/83	15 ; 1/24	13 ; 3/83	15 ; 1/24	19 ; 1/19	17 ; 1/21
	Extrema	5 ; 1/72	7 ; 1/51	9 ; 1/40	4 ; 1/90	7 ; 1/51	10 ; 1/36	6 ; 1/60	8 ; 1/45
SPI-03	Leve	123 ; 1/3	129 ; 1/3	117 ; 1/3	121 ; 1/3	130 ; 1/3	123 ; 1/3	115 ; 1/3	124 ; 1/3
	Moderada	35 ; 7/72	32 ; 4/45	30 ; 1/12	31 ; 5/58	30 ; 1/12	29 ; 5/62	39 ; 9/83	31 ; 5/58
	Severa	19 ; 1/19	19 ; 1/19	17 ; 1/21	15 ; 1/24	19 ; 1/19	21 ; 1/17	15 ; 1/24	19 ; 1/19
	Extrema	2 ; 1/180	6 ; 1/60	7 ; 1/51	7 ; 1/51	5 ; 1/72	7 ; 1/51	7 ; 1/51	6 ; 1/60
SPI-06	Leve	128 ; 1/3	135 ; 3/8	128 ; 1/3	134 ; 3/8	120 ; 1/3	119 ; 1/3	135 ; 3/8	137 ; 3/8
	Moderada	35 ; 7/72	28 ; 7/90	31 ; 5/58	26 ; 7/97	36 ; 1/10	25 ; 5/72	26 ; 7/97	24 ; 1/15
	Severa	17 ; 1/21	16 ; 2/45	14 ; 3/77	19 ; 1/19	11 ; 3/98	19 ; 1/19	16 ; 2/45	20 ; 1/18
	Extrema	2 ; 1/180	4 ; 1/90	5 ; 1/72	6 ; 1/60	9 ; 1/40	7 ; 1/51	7 ; 1/51	4 ; 1/90
SPI-12	Leve	114 ; 1/3	119 ; 1/3	118 ; 1/3	133 ; 3/8	104 ; 2/7	108 ; 2/7	135 ; 3/8	121 ; 1/3
	Moderada	31 ; 5/58	35 ; 7/72	28 ; 7/90	34 ; 5/53	30 ; 1/12	24 ; 1/15	34 ; 5/53	18 ; 1/20
	Severa	15 ; 1/24	16 ; 2/45	20 ; 1/18	10 ; 1/36	15 ; 1/24	16 ; 2/45	7 ; 1/51	20 ; 1/18
	Extrema	9 ; 1/40	4 ; 1/90	7 ; 1/51	5 ; 1/72	14 ; 3/77	14 ; 3/77	9 ; 1/40	11 ; 3/98

Tabla C.11 Frecuencia del Índice de Precipitación Estandarizado durante el período 2030/2060 según el modelo CSIRO-Mk3.6.

Índice	Condición/BNA	UC-1030	IC-1031	UC-1032	IC-1033	UC-1034	IC-1035	IC-1036	DC-1037
SPI-01	Leve	128 ; 1/3	123 ; 1/3	127 ; 1/3	116 ; 1/3	127 ; 1/3	123 ; 1/3	126 ; 1/3	121 ; 1/3
	Moderada	29 ; 5/62	34 ; 5/53	30 ; 1/12	33 ; 1/11	28 ; 7/90	31 ; 5/58	31 ; 5/58	29 ; 5/62
	Severa	13 ; 3/83	9 ; 1/40	13 ; 3/83	15 ; 1/24	11 ; 3/98	13 ; 3/83	17 ; 1/21	16 ; 2/45
	Extrema	9 ; 1/40	13 ; 3/83	10 ; 1/36	11 ; 11/360	13 ; 3/83	7 ; 1/51	9 ; 1/40	8 ; 1/45
SPI-03	Leve	128 ; 1/3	115 ; 1/3	126 ; 1/3	130 ; 1/3	115 ; 1/3	143 ; 2/5	126 ; 1/3	120 ; 1/3
	Moderada	29 ; 5/62	28 ; 7/90	29 ; 5/62	30 ; 1/12	31 ; 5/58	27 ; 3/40	30 ; 1/12	32 ; 4/45
	Severa	15 ; 1/24	28 ; 7/90	24 ; 1/15	16 ; 2/45	19 ; 1/19	17 ; 1/21	17 ; 1/21	21 ; 1/17
	Extrema	6 ; 1/60	2 ; 1/180	3 ; 1/120	6 ; 1/60	7 ; 1/51	5 ; 1/72	8 ; 1/45	5 ; 1/72
SPI-06	Leve	101 ; 2/7	100 ; 2/7	103 ; 2/7	122 ; 1/3	96 ; 1/4	107 ; 2/7	110 ; 1/3	106 ; 2/7
	Moderada	48 ; 2/15	42 ; 7/60	38 ; 2/19	33 ; 1/11	41 ; 9/79	34 ; 5/53	34 ; 5/53	39 ; 9/83
	Severa	16 ; 2/45	22 ; 3/49	22 ; 3/49	22 ; 3/49	21 ; 1/17	19 ; 1/19	22 ; 3/49	19 ; 1/19
	Extrema	4 ; 1/90	1 ; 1/360	5 ; 1/72	3 ; 1/120	5 ; 1/72	7 ; 1/51	3 ; 1/120	4 ; 1/90
SPI-12	Leve	94 ; 1/4	86 ; 1/4	87 ; 1/4	118 ; 1/3	70 ; 1/5	73 ; 1/5	96 ; 1/4	93 ; 1/4
	Moderada	46 ; 6/47	52 ; 13/90	41 ; 9/79	32 ; 4/45	40 ; 1/9	30 ; 1/12	39 ; 9/83	38 ; 2/19
	Severa	19 ; 1/19	19 ; 1/19	21 ; 1/17	25 ; 5/72	30 ; 1/12	26 ; 7/97	22 ; 3/49	24 ; 1/15
	Extrema	5 ; 1/72	3 ; 1/120	7 ; 1/51	1 ; 1/360	3 ; 1/120	13 ; 3/83	3 ; 1/120	4 ; 1/90

Tabla C.12 Frecuencia del Índice de Precipitación Estandarizado durante el período 2030/2060 según el modelo IPSL-CM5A-LR.

Índice	Condición/BNA	UC-1030	IC-1031	UC-1032	IC-1033	UC-1034	IC-1035	IC-1036	DC-1037
SPI-01	Leve	121 ; 1/3	128 ; 1/3	123 ; 1/3	117 ; 1/3	121 ; 1/3	119 ; 1/3	122 ; 1/3	120 ; 1/3
	Moderada	32 ; 4/45	27 ; 3/40	28 ; 7/90	26 ; 7/97	36 ; 1/10	37 ; 4/39	27 ; 3/40	38 ; 2/19
	Severa	13 ; 3/83	11 ; 3/98	15 ; 1/24	15 ; 1/24	12 ; 1/30	9 ; 1/40	15 ; 1/24	10 ; 1/36
	Extrema	12 ; 1/30	12 ; 1/30	11 ; 3/98	8 ; 1/45	7 ; 1/51	8 ; 1/45	8 ; 1/45	8 ; 1/45
SPI-03	Leve	130 ; 1/3	130 ; 1/3	132 ; 3/8	135 ; 3/8	124 ; 1/3	134 ; 3/8	134 ; 3/8	126 ; 1/3
	Moderada	28 ; 7/90	22 ; 3/49	24 ; 1/15	29 ; 5/62	32 ; 4/45	31 ; 5/58	28 ; 7/90	33 ; 1/11
	Severa	15 ; 1/24	18 ; 1/20	19 ; 1/19	12 ; 1/30	19 ; 1/19	15 ; 1/24	14 ; 3/77	19 ; 1/19
	Extrema	9 ; 1/40	9 ; 1/40	9 ; 1/40	7 ; 1/51	7 ; 1/51	5 ; 1/72	5 ; 1/72	3 ; 1/120
SPI-06	Leve	130 ; 1/3	139 ; 2/5	139 ; 2/5	139 ; 2/5	122 ; 1/3	118 ; 1/3	141 ; 2/5	124 ; 1/3
	Moderada	27 ; 3/40	23 ; 3/47	29 ; 5/62	24 ; 1/15	28 ; 7/90	36 ; 1/10	29 ; 5/62	29 ; 5/62
	Severa	16 ; 2/45	12 ; 1/30	11 ; 3/98	15 ; 1/24	15 ; 1/24	13 ; 3/83	14 ; 3/77	17 ; 1/21
	Extrema	8 ; 1/45	9 ; 1/40	8 ; 1/45	4 ; 1/90	9 ; 1/40	8 ; 1/45	2 ; 1/180	7 ; 1/51
SPI-12	Leve	140 ; 2/5	121 ; 1/3	137 ; 3/8	127 ; 1/3	105 ; 2/7	102 ; 2/7	109 ; 1/3	111 ; 1/3
	Moderada	18 ; 1/20	25 ; 5/72	20 ; 1/18	25 ; 5/72	25 ; 5/72	29 ; 5/62	34 ; 5/53	28 ; 7/90
	Severa	7 ; 1/51	13 ; 3/83	10 ; 1/36	21 ; 1/17	10 ; 1/36	16 ; 2/45	18 ; 1/20	13 ; 3/83
	Extrema	17 ; 1/21	10 ; 1/36	12 ; 1/30	3 ; 1/120	17 ; 1/21	11 ; 3/98	3 ; 1/120	11 ; 3/98

Tabla C.13 Frecuencia del Índice de Precipitación Estandarizado durante el período 2030/2060 según el modelo MIROC-ESM.

Índice	Condición/BNA	UC-1030	IC-1031	UC-1032	IC-1033	UC-1034	IC-1035	IC-1036	DC-1037
SPI-01	Leve	120 ; 1/3	130 ; 1/3	122 ; 1/3	128 ; 1/3	125 ; 1/3	119 ; 1/3	121 ; 1/3	117 ; 1/3
	Moderada	25 ; 5/72	29 ; 5/62	27 ; 3/40	31 ; 5/58	28 ; 7/90	37 ; 4/39	34 ; 5/53	36 ; 1/10
	Severa	21 ; 1/17	14 ; 3/77	18 ; 1/20	17 ; 1/21	17 ; 1/21	14 ; 3/77	16 ; 2/45	14 ; 3/77
	Extrema	8 ; 1/45	8 ; 1/45	9 ; 1/40	6 ; 1/60	8 ; 1/45	7 ; 1/51	5 ; 1/72	10 ; 1/36
SPI-03	Leve	118 ; 1/3	109 ; 1/3	112 ; 1/3	110 ; 1/3	110 ; 1/3	120 ; 1/3	102 ; 2/7	119 ; 1/3
	Moderada	32 ; 4/45	43 ; 8/67	37 ; 4/39	40 ; 1/9	32 ; 4/45	34 ; 5/53	45 ; 1/8	27 ; 3/40
	Severa	21 ; 1/17	18 ; 1/20	14 ; 3/77	13 ; 3/83	20 ; 1/18	18 ; 1/20	12 ; 1/30	18 ; 1/20
	Extrema	6 ; 1/60	3 ; 0/1	8 ; 1/45	7 ; 1/51	7 ; 1/51	7 ; 1/51	8 ; 1/45	10 ; 1/36
SPI-06	Leve	103 ; 2/7	113 ; 1/3	124 ; 1/3	104 ; 2/7	118 ; 1/3	98 ; 1/4	101 ; 2/7	106 ; 2/7
	Moderada	39 ; 9/83	32 ; 4/45	28 ; 7/90	35 ; 7/72	28 ; 7/90	33 ; 1/11	28 ; 7/90	37 ; 4/39
	Severa	8 ; 1/45	18 ; 1/20	12 ; 1/30	21 ; 1/17	12 ; 1/30	16 ; 2/45	22 ; 3/49	12 ; 1/30
	Extrema	13 ; 3/83	9 ; 1/40	13 ; 3/83	5 ; 1/72	12 ; 1/30	12 ; 1/30	9 ; 1/40	12 ; 1/30
SPI-12	Leve	76 ; 1/5	95 ; 1/4	94 ; 1/4	99 ; 2/7	110 ; 1/3	82 ; 2/9	92 ; 1/4	91 ; 1/4
	Moderada	37 ; 4/39	35 ; 7/72	33 ; 1/11	27 ; 3/40	25 ; 5/72	19 ; 1/19	29 ; 5/62	31 ; 5/58
	Severa	14 ; 3/77	15 ; 1/24	8 ; 1/45	29 ; 5/62	10 ; 1/36	22 ; 3/49	16 ; 2/45	11 ; 3/98
	Extrema	12 ; 1/30	12 ; 1/30	16 ; 2/45	6 ; 1/60	16 ; 2/45	18 ; 1/20	18 ; 1/20	17 ; 1/21

Tabla C.14 Factores de cambio del índice PDSI evaluado en la probabilidad de excedencia del 10 %, 50 % y 90 %. El factor de cambio es determinado como la razón de $X_{Exc Prob}^{GCM}/X_{Exc Prob}^{Hist}$, donde X representa al índice evaluado (PDSI, PHDI o RAI), $Exc Prob$ es la probabilidad de excedencia del 10, 50 y 90 % y GCM es cada modelo climático global. Los valores marcados en azul representan un incremento positivo respecto al período histórico 1985/2015, mientras que los valores en rojo denotan una disminución del índice.

Modelo	Prob. Exc.	UC-1030	IC-1031	UC-1032	IC-1033	UC-1034	IC-1035	IC-1036	DC-1037
C4	10 %	0,13	0,36	0,19	0,25	0,34	0,00	0,25	-
	50 %	6,73	1,10	0,86	0,04	0,43	1,90	0,72	-
	90 %	0,07	0,09	0,25	0,18	0,05	0,02	0,09	-
C3.6	10 %	0,02	-	0,07	0,39	0,33	-	0,24	0,55
	50 %	28,34	-	1,87	0,82	1,46	-	0,83	2,03
	90 %	0,20	-	0,36	0,11	0,04	-	0,16	0,08
IC5	10 %	0,29	-	0,42	0,14	-	0,49	0,56	0,07
	50 %	49,28	-	0,23	0,40	-	6,50	6,17	0,35
	90 %	0,31	-	0,02	0,26	-	0,01	0,45	0,21
ME	10 %	-	0,31	0,23	0,10	0,06	0,44	0,39	0,14
	50 %	-	2,18	0,52	0,74	0,24	6,55	1,78	0,12
	90 %	-	0,61	0,26	0,16	0,02	0,03	0,07	0,17

Tabla C.15 Factores de cambio del índice PHDI evaluado en la probabilidad de excedencia del 10 %, 50 % y 90 %. Los valores marcados en azul representan un incremento positivo respecto al período histórico 1985/2015 y los valores en rojo denotan una disminución del índice, para ver detalle del factor de cambio revisar Tabla C.14

Modelo	Prob. Exc.	UC-1030	IC-1031	UC-1032	IC-1033	UC-1034	IC-1035	IC-1036	DC-1037
C4	10 %	0,12	0,08	0,20	0,57	0,58	0,06	0,48	-
	50 %	0,02	1,74	2,58	1,53	1,62	0,49	2,99	-
	90 %	0,07	0,14	0,38	0,36	0,21	0,19	0,59	-
C3.6	10 %	0,18	-	0,12	1,03	1,20	-	0,09	0,29
	50 %	2,60	-	2,25	0,33	2,55	-	1,59	0,76
	90 %	0,33	-	0,16	0,06	0,17	-	0,55	0,21
IC5	10 %	0,13	-	0,08	0,56	-	1,31	0,23	0,32
	50 %	0,85	-	0,41	0,58	-	3,30	1,62	0,90
	90 %	0,06	-	1,03	0,33	-	1,19	0,23	0,10
ME	10 %	-	0,05	0,48	0,58	0,38	0,38	0,29	0,26
	50 %	-	1,21	1,86	1,22	0,46	2,58	1,97	0,18
	90 %	-	0,41	0,45	0,19	0,19	0,42	0,17	0,22

Tabla C.16 Factores de cambio del índice RAI evaluado en la probabilidad de excedencia del 10 %, 50 % y 90 %. Los valores marcados en azul representan un incremento positivo respecto al período histórico 1985/2015 y valores en rojo denotan una disminución del índice, para ver detalle del factor de cambio revisar Tabla C.14

Modelo	Prob. Exc.	UC-1030	IC-1031	UC-1032	IC-1033	UC-1034	IC-1035	IC-1036	DC-1037
C4	10 %	0,24	0,09	0,21	0,12	0,15	0,23	0,27	0,19
	50 %	0,36	0,62	0,68	0,67	0,61	0,37	0,44	0,75
	90 %	0,11	0,09	0,12	0,09	0,10	0,09	0,14	0,09
C3.6	10 %	0,32	0,23	0,19	0,13	0,16	0,24	0,24	0,16
	50 %	0,80	0,78	0,34	0,87	0,76	0,67	0,42	0,88
	90 %	0,17	0,12	0,12	0,11	0,12	0,14	0,16	0,12
IC5	10 %	0,28	0,19	0,33	0,29	0,24	0,33	0,20	0,32
	50 %	0,50	0,51	0,73	0,75	0,72	0,53	0,55	0,73
	90 %	0,14	0,12	0,12	0,09	0,12	0,13	0,18	0,11
ME	10 %	0,20	0,10	0,27	0,19	0,12	0,28	0,27	0,22
	50 %	0,87	0,60	0,79	1,00	0,67	0,62	0,38	0,93
	90 %	0,15	0,13	0,10	0,10	0,11	0,14	0,12	0,10

Apéndice D

Caracterización química

La presente sección, muestra el análisis químico de los ríos en la cuenca del río Bueno. Inicialmente, se calcula la media, mediana, desviación estándar y números de muestreos, de cada parámetro, los resultados se presentan en las Tablas D.2 y D.3.

Posteriormente, se estudian los valores de cada muestreo, aquellos parámetros cuyo valor se repite permanentemente como resultado del análisis de laboratorio, quedan descartados de posteriores análisis de calidad de agua. Para ello, se consideran las clases de calidad de la Tabla D.1.

D.1. Criterios nacionales para el establecimientos de las normas secundarias de calidad ambiental

A continuación, se reproduce parcialmente el Título III, incisos 1, 2, 3, y 4, del *Instructivo Presidencial* para la Dictación de Normas Secundarias de Calidad Ambiental para Aguas Continentales Superficiales (CONAMA, 2003).

1. El presente Instructivo no será aplicable a las aguas minerales.
2. Los valores a considerar para la elaboración de las normas secundarias tendrán por objetivo general proteger, mantener y recuperar la calidad de las aguas continentales superficiales de manera de salvaguardar el aprovechamiento del recurso, la protección y conservación de las comunidades acuáticas y de los ecosistemas lacustres, maximizando los beneficios sociales, económicos y medio ambientales.

Asimismo, los valores a considerar para la elaboración de las normas secundarias tendrán por objetivo específico:

- **Mantener o recuperar la calidad de las aguas destinadas a la producción de agua potable.**
- Mantener o recuperar la calidad de las aguas para proteger y conservar las comunidades acuáticas.
- Mantener o recuperar la calidad de las aguas para la conservación de especies hidrobiológicas de importancia para la pesca deportiva y recreativa y para la

acuicultura.

- Proteger la calidad de las aguas para la bebida de animales sea que vivan en estado silvestre o bajo el cuidado y dependencia del hombre.
 - Proteger la calidad de las aguas para riego de manera de conservar los suelos y la flora silvestre o cultivada.
 - Mantener o recuperar el estado trófico de los cuerpos lacustres.
 - Proteger cuerpos o cursos de agua de extraordinaria calidad como componentes únicos del patrimonio ambiental
3. Para efectos de la dictación de las normas secundarias de calidad ambiental para las aguas aptas para la protección y conservación de las comunidades acuáticas y los usos prioritarios, sin perjuicio de lo establecido en el punto III, numeral 4, los valores máximos y mínimos a considerar serán los mostrados en la Tabla D.1.
4. Las normas de calidad secundarias asociadas a la protección de las aguas continentales superficiales para la protección y conservación de las comunidades acuáticas y para los usos prioritarios, deberán considerar las clases de calidad que a continuación se indican:
- **Excepcional:** Indica un agua de mejor calidad que la clase 1, que por su extraordinaria pureza y escasez, forma parte única del patrimonio ambiental de la República. Esta calidad es adecuada también para la conservación de las comunidades acuáticas y demás usos definidos cuyos requerimientos de calidad sean inferiores a esta clase.
 - **Clase 1:** Muy buena calidad. Indica un agua apta para la protección y conservación de las comunidades acuáticas, para el riego irrestricto y para los usos comprendidos en las clases 2 y 3.
 - **Clase 2:** Buena calidad. Indica un agua apta para el desarrollo de la acuicultura, de la pesca deportiva y recreativa, y para los usos comprendidos en la clase 3.
 - **Clase 3:** Regular calidad. Indica un agua adecuada para bebida de animales y para riego restringido.

Las clases de calidad comprendidas entre la Clase excepcional y la Clase 3, son aptas para la captación de agua para potabilizarla, según el tratamiento que se utilice.

Las aguas que excedan los límites establecidos para la clase 3, indicarán un agua de mala calidad (clase 4), no adecuada para la conservación de las comunidades acuáticas ni para los usos prioritarios a los que se hizo referencia, **sin perjuicio de su utilización en potabilización con tratamiento apropiado** o para aprovechamiento industrial.

Los nutrientes no se encuentran normados en el *Instructivo Presidencial* y, la NCh 1.333 indica que la Autoridad Competente debe pronunciarse en cada caso específico (INN, 1987). Luego, en consideración al límite limnológico de conservación para el estado oligotrófico de un río, la *Guía para la Elaboración de Normas Secundarias de Calidad Ambiental en Aguas Continentales y Marinas* (MMA, 2017), indica que el **límite** para dicha condición es de **0,025 mg/L y 0,7 mg/L para el PO_4^{3-} y NO_3^-** , respectivamente.

Tabla D.1 Clases de calidad, de acuerdo con la Dictación de Normas Secundarias de Calidad Ambiental para Aguas Continentales Superficiales. Adaptado de (CONAMA, 2003).

Grupo compuestos o elementos	Unidad	Clase de excepción	Clase 1	Clase 2	Clase 3
Indicadores físicos y químicos					
Conductividad eléctrica	$\mu\text{hos/cm}$	< 600	750 ^{***}	1.500	2.250
DBO5	mg/L	< 2	5	10	20
Color aparente	Pt/Co	< 16	20 ^{***}	100	>100
Oxígeno disuelto*	mg/L	> 7,5	7,5	5,5	5
pH*	unidad	6,5-8,5	6,5-8,5	6,5-8,5	6,5-8,5
SD	mg/L	< 400	500	1.000	1.500 ^{***}
SS	mg/L	< 24	30	50	80
Temperatura*	$\Delta^\circ\text{C}$	< 0,5	1,5	1,5	3
Inorgánicos					
Amonio	mg/L	< 0,5	1	1,5 ^{***}	2,5
Cianuro	$\mu\text{g/L}$	< 4	5	10	50
Cloruro	mg/L	< 80	100 ^{***}	150	200 ^{***}
Fluoruro	mg/L	< 0,8	1	1,5 ^{***}	2
Nitrito	mg/L	< 0,05	0,06	> 0,06	> 0,06 ^{***}
Sulfato	mg/L	< 120	150	500 ^{***}	1.000
Sulfuro	mg/L	< 0,04	0,05	0,05	0,05
Metales esenciales					
Boro	mg/L	< 0,4	0,5	0,75	0,75
Cobre**	$\mu\text{g/L}$	< 0,75	9,4 ^{***}	200	1.000
Cromo	$\mu\text{g/L}$	< 32	40	100 ^{***}	100
Hierro	mg/L	< 0,8 ^{***}	1	5	5
Manganeso	mg/L	< 0,04	0,05 ^{***}	0,2	0,2
Molibdeno	mg/L	< 0,008	0,01	0,15	0,5
Níquel**	$\mu\text{g/L}$	< 42	52	200	200
Selenio	$\mu\text{g/L}$	< 4	5	20 ^{***}	50
Zinc**	mg/L	< 0,097	0,12	1	5 ^{***}
Metales no esenciales					
Aluminio	mg/L	< 0,07	0,09	0,1	5
Arsénico	mg/L	< 0,04 ^{***}	0,05	0,1	0,1
Cadmio**	$\mu\text{g/L}$	< 2 ^{***}	2,2	10	10
Estaño	$\mu\text{g/L}$	< 4 ^{***}	5	25	50
Mercurio	$\mu\text{g/L}$	< 0,08 ^{***}	0,1	0,1	1
Plomo**	mg/L	< 0,0025	0,0032	0,2	5

* La determinación de estos compuestos o elementos deberá estar bajo el límite de detección del instrumental analítico más sensible.

** Basados en expresiones químicas.

*** Clase exigida por la NCh409/01 (INN, 2005).

D.2. Análisis estadístico y límites de detección

Las Tablas D.2 y D.3, muestran la media, mediana, desviación estándar, y número de muestreos de cada parámetro químico, analizado por subcuencas cordilleranas UC-(1030, 1032, y 1034), e intermedias IC-(1031, 1033, 1035, 1036).

Tabla D.2 Estadísticos de parámetros químicos utilizados en el análisis de la calidad del agua en la cuenca del río Bueno. En el siguiente orden se presenta, la media, mediana, desviación estándar, y número de muestreos. Los valores marcados en rojo son aquellos que igualan o superan el límite máximo permisible (LMP) dictaminado por la NCh409/1.Of2005 (INN, 2005) o exceden el valor sugerido en las Guías de calidad del agua potable (WHO, 2011).

Elem.	Un.	LMP	UC-1030	IC-1031	UC-1032	IC-1033
Al	mg/L	0,1*	0,265; 0,280; 0,309; 55	0,218; 0,200; 0,153; 52	0,358; 0,300; 0,287; 48	0,302; 0,300; 0,229; 52
As	mg/L	0,01	0,001; 0,001; 0,000; 50	0,001; 0,001; 0,000; 60	0,001; 0,001; 0,000; 55	0,014; 0,001; 0,114; 80
B	mg/L	0,05*	0,780; 1,000; 0,392; 60	0,978; 1,000; 0,147; 46	0,978; 1,000; 0,149; 45	0,765; 1,000; 0,399; 61
Cl	mg/L	400***††	2,811; 2,50; 1,245; 44	5,621; 5,069; 4,240; 34	3,594; 3,477; 1,752; 33	3,394; 3,275; 1,121; 43
Cd	mg/l	0,01	0,008; 0,010; 0,004; 64	0,010; 0,010; 0,001; 57	0,241; 0,010; 0,957; 53	0,008; 0,010; 0,004; 61
Ca	mg/L	***	5,332; 5,397; 2,175; 45	9,890; 10,21; 3,294; 35	4,028; 4,319; 1,288; 34	4,879; 5,200; 1,232; 44
Cu	mg/L	2***††	0,012; 0,010; 0,010; 81	0,016; 0,010; 0,016; 60	0,014; 0,010; 0,010; 56	0,012; 0,010; 0,008; 80
CE	μhos/cm	750†	71,56; 62,00; 58,72; 79	119,3; 117,3; 46,09; 61	79,59; 61,85; 87,48; 56	74,28; 63,00; 74,89; 79
SDT	mg/l	1500	47,95; 41,54; 39,35; 79	79,91; 78,59; 30,88; 61	53,33; 41,44; 58,61; 56	49,77; 42,21; 50,16; 79
Cr	mg/L	0,05	0,013; 0,010; 0,008; 48	0,010; 0,010; 0,001; 44	0,011; 0,010; 0,003; 41	0,014; 0,010; 0,009; 46
DQO	mg/L	***	12,62; 10,59; 11,30; 58	12,81; 6,141; 15,36; 57	14,62; 13,37; 13,62; 52	13,78; 10,67; 15,61; 47
Fe	mg/L	0,3	0,052; 0,030; 0,059; 80	0,129; 0,020; 0,694; 60	0,311; 0,130; 0,815; 56	0,326; 0,140; 0,878; 79
PO ₄ ³⁻	mg/L	***	0,068; 0,010; 0,290; 62	0,137; 0,085; 0,187; 47	0,044; 0,014; 0,152; 43	0,042; 0,014; 0,131; 61
Mg	mg/L	125	1,781; 1,800; 0,327; 45	3,547; 3,795; 0,872; 35	2,110; 2,153; 0,455; 34	1,928; 1,971; 0,274; 44
Mn	mg/L	0,1	0,013; 0,010; 0,005; 65	0,013; 0,010; 0,005; 60	0,015; 0,010; 0,008; 56	0,018; 0,010; 0,020; 63
Hg	mg/L	0,001	0,001; 0,001; 0,002; 63	0,001; 0,001; 0,001; 58	0,001; 0,001; 0,002; 54	0,001; 0,001; 0,001; 59
Mo	mg/L	0,07*	0,025; 0,010; 0,019; 57	0,028; 0,010; 0,023; 53	0,029; 0,020; 0,022; 49	0,028; 0,010; 0,026; 54
NO ₃ ⁻	mg/L	50	0,204; 0,020; 1,189; 64	0,617; 0,610; 0,286; 43	0,227; 0,091; 0,609; 40	0,178; 0,074; 0,543; 63
OD	mg/L	†††	9,736; 9,770; 1,086; 73	7,848; 7,940; 1,691; 56	11,54; 10,01; 11,48; 54	9,459; 9,520; 1,472; 71
pH	-	6,5 - 8,5	7,487; 7,460; 0,391; 80	7,451; 7,440; 0,585; 61	7,460; 7,510; 0,463; 55	7,188; 7,230; 0,418; 79
Ag	mg/L	0,1*	0,009; 0,010; 0,003; 64	0,010; 0,010; 0,001; 59	0,010; 0,010; 0,001; 56	0,009; 0,010; 0,003; 63
Pb	mg/L	0,05**	0,027; 0,010; 0,023; 62	0,028; 0,010; 0,022; 54	0,029; 0,010; 0,023; 51	0,028; 0,010; 0,022; 58
Se	mg/L	0,01	0,002; 0,001; 0,003; 45	0,001; 0,001; 0,003; 48	0,001; 0,001; 0,003; 48	0,001; 0,001; 0,003; 48
Na	mg/L	***	4,528; 4,370; 1,204; 45	7,040; 6,500; 1,743; 22	5,542; 5,119; 2,110; 34	5,001; 4,674; 1,078; 44
SO ₄ ²⁻	mg/L	500††	2,263; 2,000; 1,414; 39	2,461; 2,000; 1,758; 28	2,540; 2,400; 1,632; 28	1,869; 1,000; 1,689; 37
T _a	°C	25†	13,49; 13,03; 2,864; 79	13,75; 13,89; 1,888; 61	12,39; 12,53; 2,908; 55	13,01; 13,05; 2,919; 78
ΔT _a	°C	3†	2,981; 2,480; 1,770; 79	2,721; 1,200; 1,632; 61	3,328; 3,130; 2,504; 55	2,102; 2,460; 1,189; 78
Zn	mg/L	3	0,011; 0,010; 0,008; 63	0,050; 0,040; 0,101; 57	0,015; 0,010; 0,016; 52	0,012; 0,010; 0,012; 59

*Valor de referencia *Guías para calidad de agua potable, OMS, 4^{ta} edición (WHO, 2011).*

**Excede el valor de referencia de la OMS.

***No se propone ningún valor de referencia. La Autoridad Competente se debe pronunciar en cada caso específico

†Valor de referencia de la NCh1333 - Requisitos de calidad de agua para diferentes usos (INN, 1987).

††Elementos que exceden la NCh1333

†††El mínimo OD requerido para aguas destinadas a vida acuática es de 5 mg/L; NCh 1333 (INN, 1987).

Las Figuras D.1 a D.4, muestran los estadísticos de los parámetros, siendo analizados los límites de detección (LD) de los parámetros físicos y químicos, parámetros inorgánicos, y elementos (no-) esenciales, en la cuenca del río Bueno. Por otro lado, la Figura D.5 muestra la relación de los nutrientes con la temperatura del agua.

En la cuenca del río Bueno dos parámetros se clasifican en clase 4 (boro y mercurio), de acuerdo con el *Instructivo Presidencial* (ver sección D.1). El boro es un metaloide, y se encuentra de forma natural en aguas subterráneas, pero su presencia en aguas superficiales se debe principalmente al vertimiento de aguas residuales tratadas (WHO, 2011). En la cuenca del río Bueno, la presencia de boro es atinente a factores naturales (lixiviación subterránea de formaciones geológicas) y antropogénicos (contaminación difusa por aguas servidas) (DGA, 2004). La exposición a cantidades altas de boro puede afectar el estómago, los intestinos, el

Tabla D.3 (continuación) Estadísticos de parámetros químicos utilizados en el análisis de la calidad del agua en la cuenca del río Bueno.

Elem.	Un.	LMP	UC-1034	IC-1035	IC-1036
Al	mg/L	0,1*	0,989; 0,300; 2,441; 43	0,452; 0,300; 0,538; 56	0,647; 0,300; 1,507; 54
As	mg/L	0,01	0,001; 0,001; 0,000; 50	0,002; 0,001; 0,003; 82	0,002; 0,001; 0,002; 79
B	mg/L	0,05*	0,978; 1,000; 0,149; 45	0,763; 1,000; 0,403; 60	0,770; 1,000; 0,402; 59
Cl ⁻	mg/L	400***††	3,402; 2,847; 1,901; 34	5,514; 5,300; 1,432; 44	3,606; 3,500; 1,029; 43
Cd	mg/L	0,01	0,010; 0,010; 0,001; 47	0,008; 0,010; 0,004; 64	0,008; 0,010; 0,004; 62
Ca	mg/L	***	4,890; 4,571; 2,751; 35	4,426; 4,300; 1,963; 45	4,336; 4,500; 1,343; 43
Cu	mg/L	2**††	0,014; 0,010; 0,006; 50	0,013; 0,010; 0,013; 82	0,013; 0,010; 0,010; 79
CE	μhos/cm	750†	67,39; 51,50; 78,00; 50	66,65; 65,30; 25,82; 79	64,44; 57,00; 46,77; 79
SDT	mg/L	1500	45,15; 34,51; 52,26; 50	43,56; 42,88; 18,45; 81	43,17 38,19; 31,33; 79
Cr	mg/L	0,05	0,011; 0,010; 0,006; 34	0,013; 0,010; 0,014; 48	0,013; 0,010; 0,010; 48
DQO	mg/L	***	14,20; 11,98; 15,96; 47	29,18; 19,00; 30,69; 60	27,45; 17,57; 33,47; 60
Fe	mg/L	0,3	0,504; 0,130; 1,192; 50	0,723; 0,680; 0,485; 80	0,474; 0,320; 0,617; 79
PO ₄ ³⁻	mg/L	***	0,078; 0,010; 0,290; 38	0,131; 0,028; 0,500; 62	0,201; 0,023; 1,108; 61
Mg	mg/L	125	1,755; 1,768; 0,368; 35	2,259; 2,492; 1,027; 45	1,809; 1,963; 0,423; 43
Mn	mg/L	0,1	0,022; 0,020; 0,026; 50	0,073; 0,040; 0,287; 66	0,027; 0,020; 0,027; 65
Hg	mg/L	0,001	0,002; 0,001; 0,002; 46	0,001; 0,001; 0,002; 60	0,001; 0,001; 0,001; 60
Mo	mg/L	0,07*	0,029; 0,030; 0,020; 43	0,026; 0,010; 0,019; 57	0,025; 0,010; 0,019; 56
NO ₃ ⁻	mg/L	50	0,363; 0,053; 1,260; 34	0,230; 0,202; 0,162; 62	0,218; 0,200; 0,146; 61
OD	mg/L	†††	10,41; 10,37; 0,726; 49	9,614; 9,785; 1,257; 76	9,893; 9,920; 1,159; 75
pH	-	6,5 - 8,5	7,175; 7,270; 0,486; 49	7,002; 7,050; 0,488; 81	7,125; 7,125; 0,603; 80
Ag	mg/L	0,1*	0,010; 0,010; 0,001; 50	0,009; 0,010; 0,003; 66	0,008; 0,010; 0,003; 64
Pb	mg/L	0,05**	0,033; 0,035; 0,024; 46	0,028; 0,010; 0,023; 62	0,027; 0,010; 0,023; 59
Se	mg/L	0,01	0,001; 0,001; 0,001; 47	0,001; 0,001; 0,001; 48	0,001; 0,001; 0,001; 47
Na	mg/L	***	4,121; 3,585; 1,900; 35	5,949; 5,900; 2,069; 45	4,562; 4,360; 1,421; 43
SO ₄ ²⁻	mg/L	500††	2,287; 2,100; 1,621; 27	1,964; 1,000; 2,179; 37	2,002; 1,100; 1,595; 36
T _a	°C	25†	12,05; 12,41; 2,421; 49	11,42; 11,00; 3,462; 79	12,46; 12,04; 3,188; 78
ΔT _a	°C	3†	2,515; 1,920; 1,426; 49	2,526; 2,700; 1,434; 79	1,586; 2,600; 1,258; 78
Zn	mg/L	3	0,013; 0,010; 0,007; 47	0,012; 0,010; 0,014; 62	0,011; 0,010; 0,009; 59

*Valor de referencia *Guías para calidad de agua potable, OMS, 4^{ta} edición (WHO, 2011).*

**Excede el valor de referencia de la OMS.

***No se propone ningún valor de referencia. La Autoridad Competente se debe pronunciar en cada caso específico

†Valor de referencia de la NCh1333 - Requisitos de calidad de agua para diferentes usos (INN, 1987).

††Elementos que exceden la NCh1333

†††El mínimo OD requerido para aguas destinadas a vida acuática es de 5 mg/L; NCh 1333 (INN, 1987).

hígado, los riñones y el cerebro (ATSDR, 2010).

Por otro lado, el mercurio es el cuarto metal más tóxico (Pandey y Madhuri, 2014). Es un elemento que se encuentra de forma natural en el aire, agua y suelo, y se presenta en su forma elemental (o metálico), o como compuestos orgánicos e inorgánicos (WHO, 2005). La contaminación del Hg a nivel acuático, se debe a la interacción de bacterias con el elemento, formando el metilmercurio (compuesto orgánico); éste se bioacumula en peces y mariscos y, pasa por un proceso de bioamplificación⁹. El metilmercurio es tóxico para el sistema nervioso central y periférico, puede afectar los riñones y pulmones, causar daño en los tejidos mucosos del cuerpo, lesiones en la piel, órganos digestivos y renales (WHO, 2006).

⁹Revisar Glosario para definiciones de bioacumulación y bioamplificación.

Tabla D.4 Clases de calidad de parámetros químicos en la cuenca del río Bueno. Las clases de calidad se indican de acuerdo con las normas secundarias de calidad, siendo Clase E: excepcional; Clase 1: muy buena calidad; Clase 2: buena calidad; Clase 3: regular calidad; y Clase 4: mala calidad.

Elemento	UC-1030	IC-1031	UC-1030	IC-1033	UC-1034	IC-1035	IC-1036	Promedio cuenca
Al	Clase 3	Clase 3	Clase 3	Clase 3	Clase 3	Clase 3	Clase 3	Clase 3
B	Clase 4	Clase 4	Clase 4	Clase 4	Clase 4	Clase 4	Clase 4	Clase 4
Cl	Clase E	Clase E	Clase E	Clase E	Clase E	Clase E	Clase E	Clase E
Cu	Clase 2	Clase 2	Clase 2	Clase 2	Clase 2	Clase 2	Clase 2	Clase 2
CE	Clase E	Clase E	Clase E	Clase E	Clase E	Clase E	Clase E	Clase E
Cr	Clase E	Clase E	Clase E	Clase E	Clase E	Clase E	Clase E	Clase E
Fe	Clase E	Clase E	Clase E	Clase E	Clase E	Clase E	Clase E	Clase E
Mn	Clase E	Clase E	Clase E	Clase E	Clase E	Clase 2	Clase 1	Clase E
Hg	Clase 4	Clase 4	Clase 4	Clase 4	Clase 4	Clase 4	Clase 4	Clase 4
Mo	Clase 2	Clase 2	Clase 2	Clase 2	Clase 2	Clase 2	Clase 2	Clase 2
OD	Clase E	Clase E	Clase E	Clase E	Clase E	Clase E	Clase E	Clase E
SDT	Clase E	Clase E	Clase E	Clase E	Clase E	Clase E	Clase E	Clase E
SO ₄ ²⁻	Clase E	Clase E	Clase E	Clase E	Clase E	Clase E	Clase E	Clase E
ΔT _a	Clase 3	Clase 3	Clase 3	Clase 3	Clase 3	Clase 3	Clase 3	Clase 3

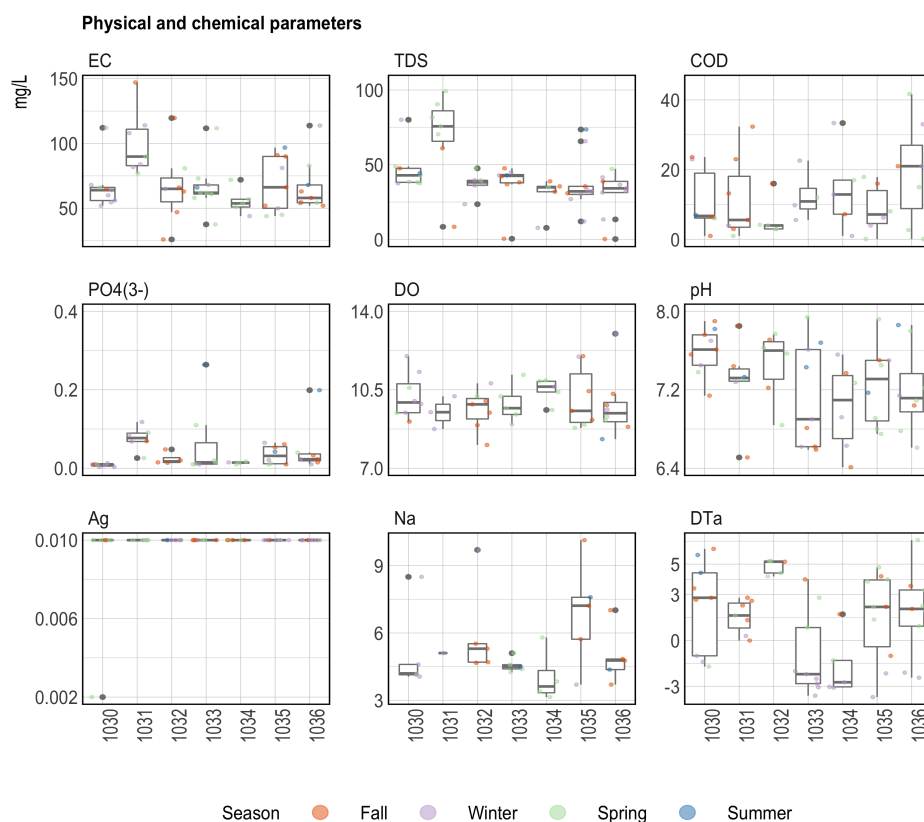


Figura D.1 Análisis estadístico y límites de detección de parámetros físicos y químicos.

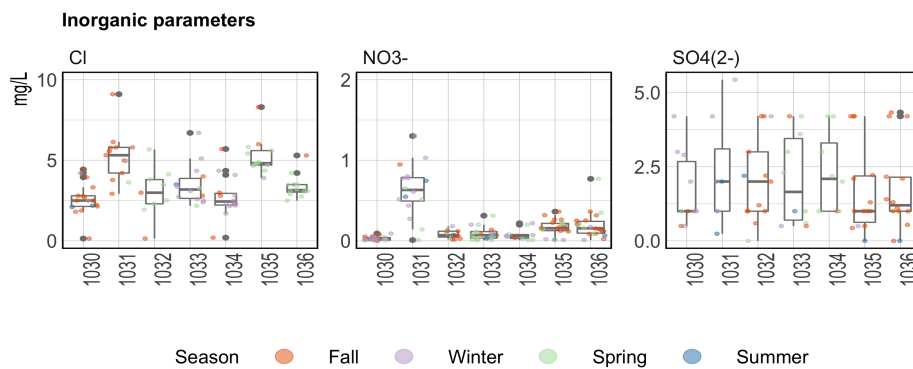


Figura D.2 Análisis estadístico y límites de detección de parámetros inorgánicos.

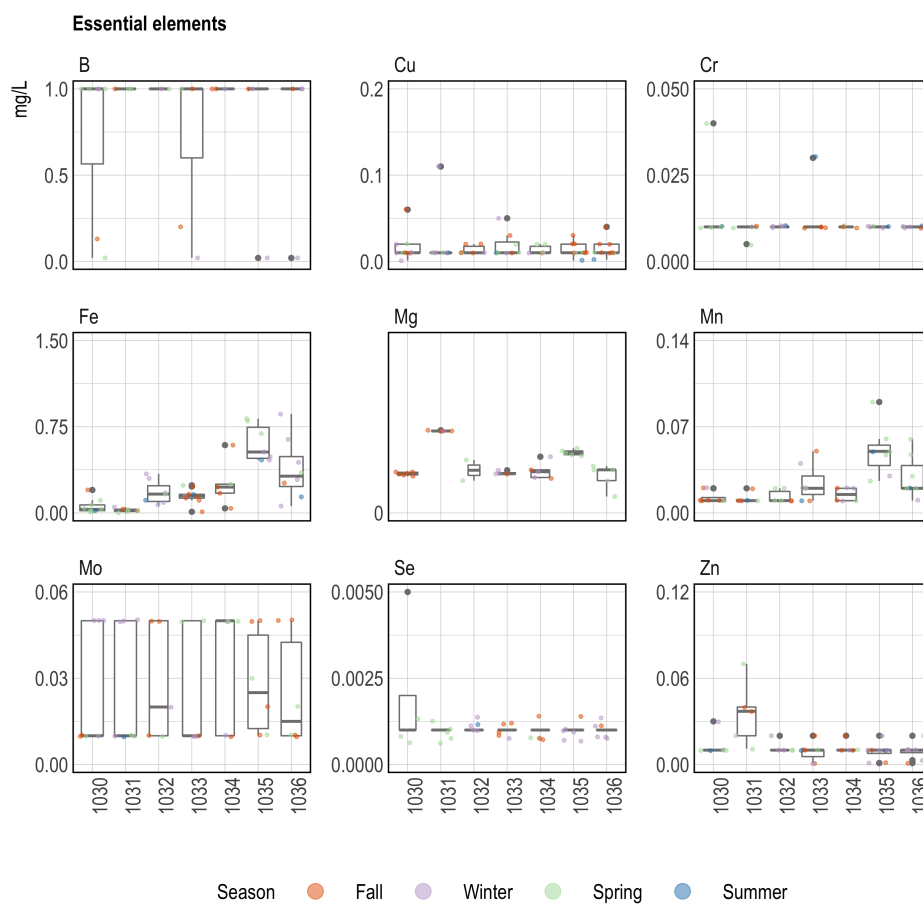


Figura D.3 Análisis estadístico y límites de detección de elementos/sustancias esenciales.

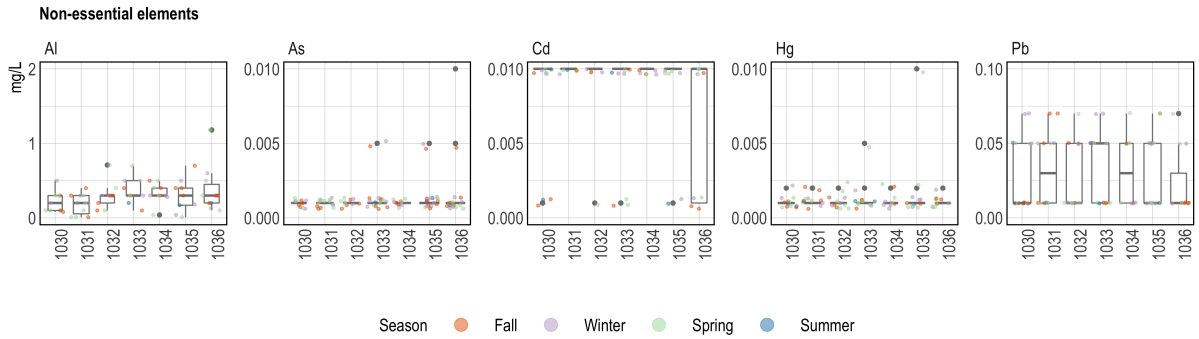


Figura D.4 Análisis estadístico y límites de detección de elementos/sustancias no esenciales.

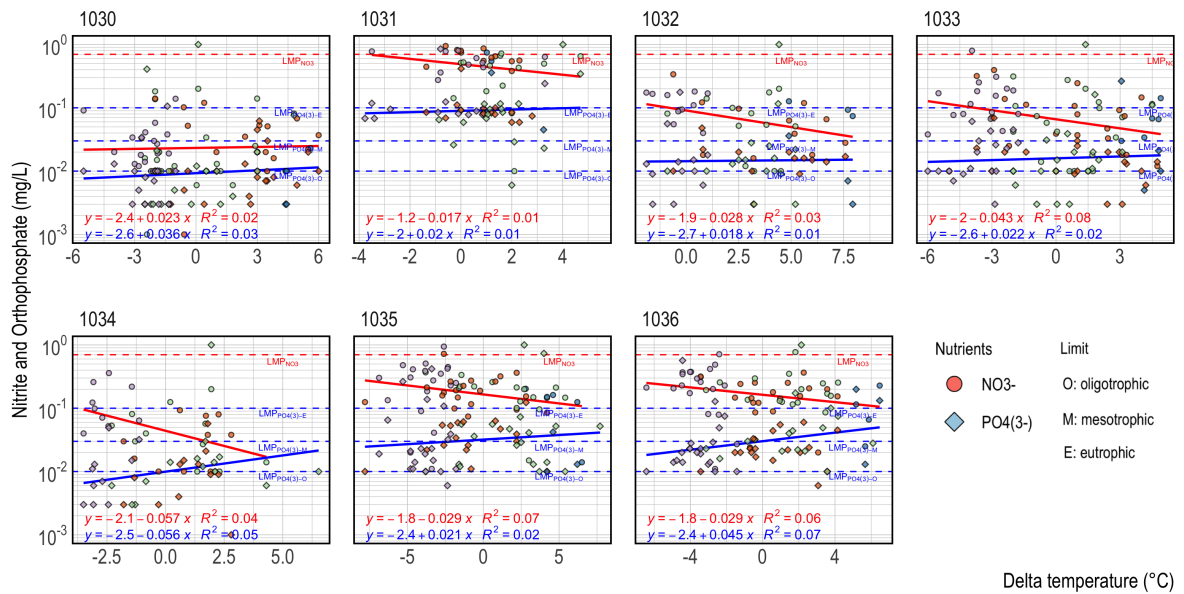


Figura D.5 Correlación de nutrientes (PO_4^{3-} y NO_3^-) y temperatura del agua. Las líneas punteadas representan los límites de estados tróficos de un río (MMA, 2017), siendo O: oligotrófico M: mesotrófico, y E: eutrófico.

Apéndice E

Índices de Calidad de Agua y HachM

E.1. Parametrización y cálculo de subíndices

La Figura E.1 muestra las curvas de transformación de los parámetros físicos, químicos, inorgánicos y metales (no-) esenciales, utilizados en la construcción del *Drinking Water Quality Index*. No se presenta la curva del pH ni temperatura del agua, sin embargo, las ecuaciones que definen a los subíndices pueden ser consultadas en las rutinas creadas en RMarkdown, disponibles en el siguiente [link](#). En la misma rutina se presentan las ecuaciones de los parámetros de la Figura E.1.

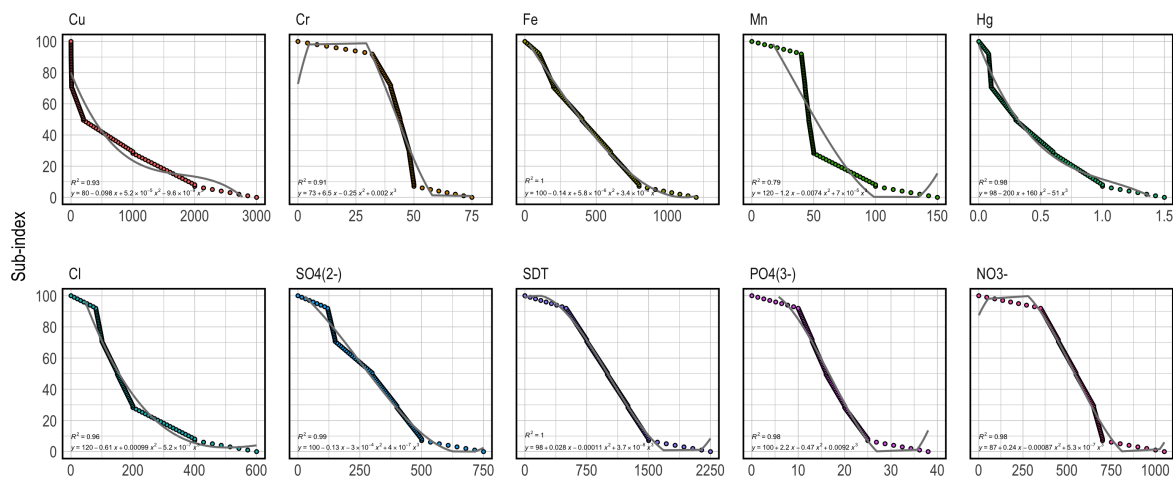


Figura E.1 Curvas de transformación para construcción del DWQI.

Posteriormente, la Figura E.2 muestra la parametrización de los subíndices empleados en el Índice de Calidad de Agua de Riego. Al igual que el caso anterior, las ecuaciones se encuentran disponibles en la rutina creada en RMarkdown ([link](#)).

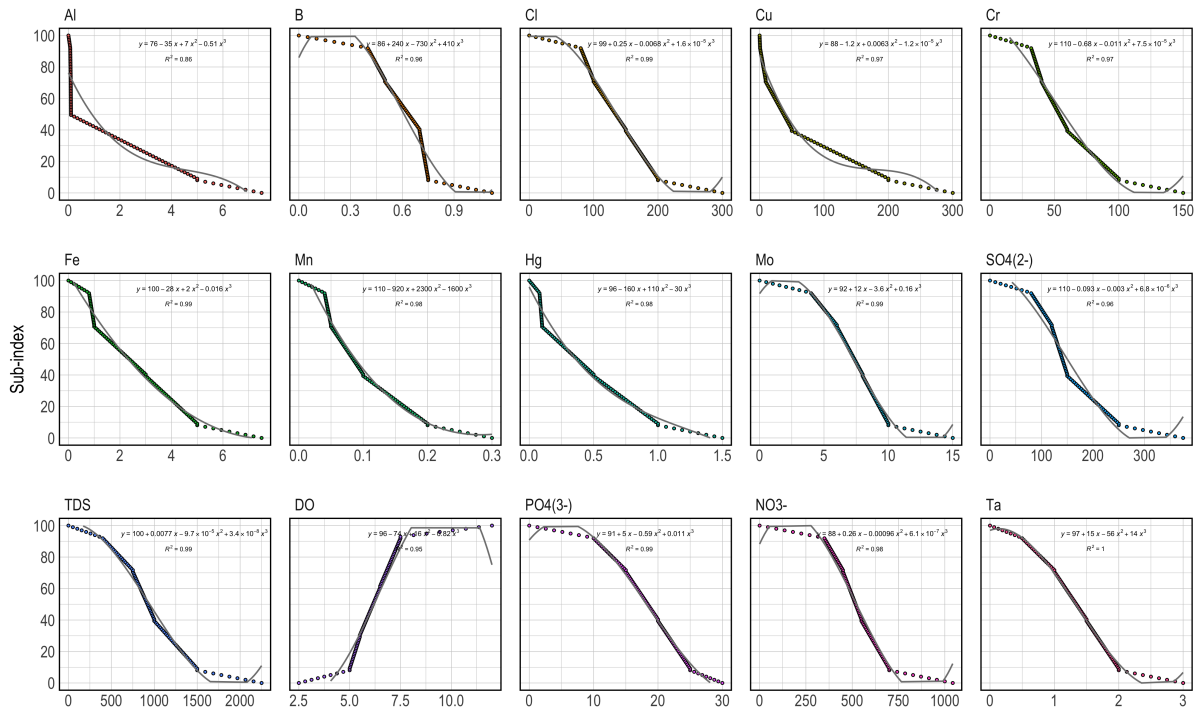


Figura E.2 Curvas de transformación para construcción del IWQI.

E.2. Correlación de la química e hidrología

Como caso de estudio, la Figura E.3 muestra el correlograma de Pearson y de Spearman de la subcuenca UC-1030. El detalle de las subcuencas IC-1031 a IC-1036 se encuentra disponible en el siguiente [link](#).

Los resultados indican que los parámetros químicos, tales como Cr, Mo, Al, y SO_4^{2-} presentan una alta correlación con el SPI-12, Q_{p90} y RR25. Sin embargo, los resultados también plantean la dependencia no significativa entre la química e hidrología. Del total de variables analizadas, el 80 % presenta valores $\hat{r}, \rho \leq |0,5|$.

E.3. Construcción y calibración automática del modelo HACH

E.3.1. Supuestos básicos de regresión

En el Capítulo 4, sección 4.4.3.4 se presentó la gráfica de los test de hipótesis básicas en HachM para el caso de entrenamiento **T2**. Los resultados de **T1** y **T3** se encuentran en el siguiente [link](#).

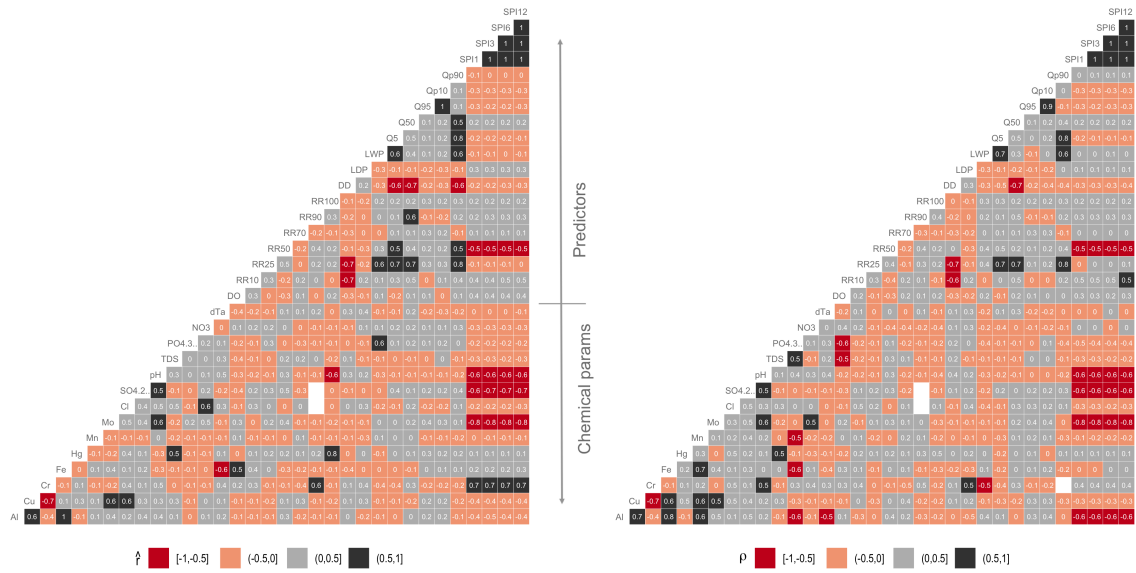


Figura E.3 Correlograma de Pearson y Spearman en la subcuenca UC-1030.

E.3.2. Resultados de las métricas de evaluación

Las Tablas E.1 a E.3 presentan los resultados del RMSE, R^2 , KGE, AIC, y BIC de los períodos de entrenamiento aplicados en HachM. Además, se muestran los resultados de las tres primeras métricas en los períodos de testeo.

Tabla E.1 Resultados de métricas de evaluación en período de entrenamiento y testeo T1.

Índice	BNA	Calibración					Validación		
		RMSE	R2	KGE	AIC	BIC	RMSE	R2	KGE
DWQI	UC-1030	0,21	1,00	0,99	142,01	145,57	22,36	0,38	0,50
	IC-1031	0,46	1,00	0,98	123,36	126,92	13,73	0,68	0,76
	UC-1032	0,28	1,00	0,99	114,84	118,41	18,23	0,34	0,48
	IC-1033	0,67	1,00	1,00	140,44	144,00	17,52	0,67	0,70
	UC-1034	0,85	0,99	0,99	147,49	151,05	23,25	0,54	0,59
	IC-1035	0,48	1,00	0,99	133,19	136,75	12,56	0,81	0,74
	IC-1036	0,38	1,00	0,98	136,66	140,22	21,56	0,69	0,58
IWQI	UC-1030	0,14	1,00	1,00	138,62	142,18	21,24	0,40	0,52
	IC-1031	0,29	1,00	0,99	115,47	119,02	14,68	0,68	0,72
	UC-1032	0,46	1,00	0,99	142,59	146,15	22,68	0,40	0,51
	IC-1033	0,41	1,00	0,99	109,32	112,88	16,24	0,67	0,69
	UC-1034	0,17	1,00	1,00	126,83	130,39	13,04	0,73	0,74
	IC-1035	0,24	1,00	1,00	136,79	140,35	15,54	0,65	0,70
	IC-1036	0,45	1,00	0,99	135,58	139,14	19,84	0,73	0,61

Tabla E.2 Resultados de métricas de evaluación en período de entrenamiento y testeo T2.

Índice	BNA	Calibración					Validación		
		RMSE	R2	KGE	AIC	BIC	RMSE	R2	KGE
DWQI	UC-1030	0,22	1,00	0,99	128,87	131,96	17,55	0,56	0,70
	IC-1031	0,12	1,00	1,00	111,83	114,92	9,03	0,82	0,85
	UC-1032	0,14	1,00	0,99	103,67	106,76	14,19	0,69	0,77
	IC-1033	0,32	1,00	0,99	126,50	129,59	12,96	0,81	0,80
	UC-1034	0,56	1,00	0,98	133,66	136,75	21,60	0,57	0,65
	IC-1035	0,08	1,00	1,00	120,33	123,42	10,99	0,83	0,80
	IC-1036	0,23	1,00	0,99	124,01	127,10	16,98	0,68	0,68
IWQI	UC-1030	0,57	1,00	0,99	125,87	128,96	16,93	0,58	0,69
	IC-1031	0,28	1,00	0,98	105,39	108,48	12,75	0,66	0,76
	UC-1032	0,18	1,00	1,00	129,23	132,32	20,33	0,53	0,64
	IC-1033	0,35	1,00	0,99	98,44	101,53	14,53	0,70	0,74
	UC-1034	0,12	1,00	1,00	115,18	118,27	9,92	0,83	0,82
	IC-1035	0,22	1,00	0,99	123,48	126,57	10,70	0,81	0,80
	IC-1036	0,34	1,00	1,00	123,23	126,32	16,38	0,64	0,68

Tabla E.3 Resultados de métricas de evaluación en período de entrenamiento y testeo T3.

Índice	BNA	Calibración					Validación		
		RMSE	R2	KGE	AIC	BIC	RMSE	R2	KGE
DWQI	UC-1030	0,25	1,00	0,99	108,64	110,90	15,53	0,51	0,68
	IC-1031	0,08	1,00	1,00	94,75	97,01	6,51	0,83	0,90
	UC-1032	0,18	1,00	0,99	86,40	88,66	14,55	0,63	0,77
	IC-1033	0,63	0,99	0,98	106,09	108,35	13,97	0,76	0,79
	UC-1034	0,27	1,00	1,00	112,47	114,73	18,64	0,37	0,62
	IC-1035	0,51	1,00	0,98	100,03	102,29	15,52	0,65	0,71
	IC-1036	0,48	1,00	0,99	104,40	106,66	19,65	0,47	0,60
IWQI	UC-1030	0,20	1,00	0,99	106,35	108,61	15,10	0,45	0,67
	IC-1031	0,17	1,00	0,99	89,74	92,00	10,66	0,65	0,77
	UC-1032	0,41	0,99	0,99	108,95	11,21	17,97	0,38	0,59
	IC-1033	0,18	1,00	0,99	81,98	84,24	14,64	0,73	0,78
	UC-1034	0,43	1,00	0,99	97,44	99,70	9,71	0,71	0,79
	IC-1035	0,18	1,00	1,00	104,29	106,55	10,57	0,84	0,83
	IC-1036	0,25	1,00	0,99	104,05	106,31	16,73	0,45	0,60

Posteriormente, la Figura E.4 muestra el contraste temporal de las observaciones y simulaciones de HachM en los tres períodos de calibración, y los resultados de las validaciones. El modelo hasta el año 2010 mantiene un buen acuerdo con las observaciones, luego, los años 2011 y 2012 fallan en la simulación.

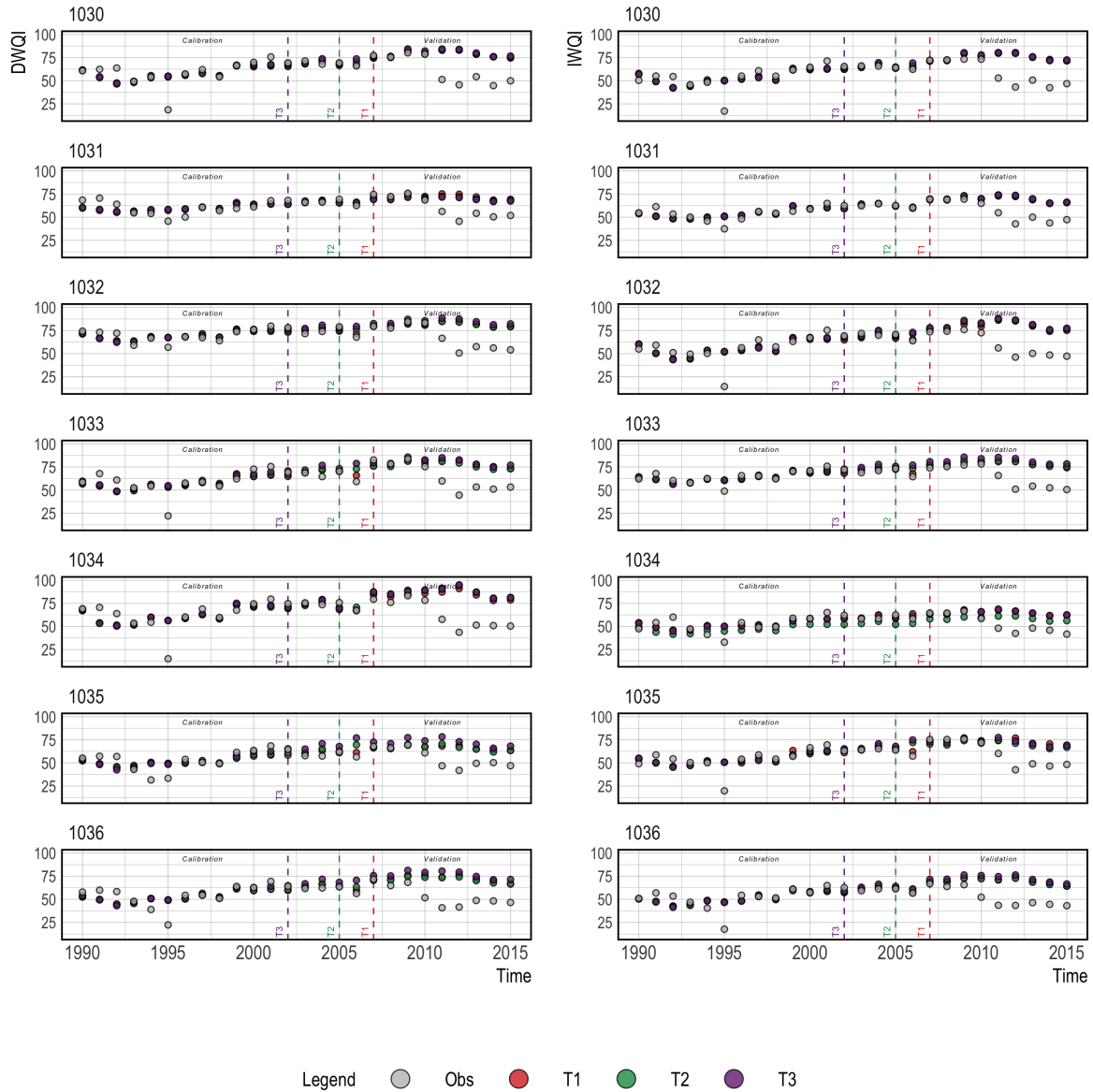


Figura E.4 Observaciones del DWQI e IWQI y simulaciones de HachM. Período 1990/2015.

E.4. Proyecciones del WQI al 2030-2060

De acuerdo con los resultados de los GCM, la calidad del agua disminuye en 3,3% si las fuentes de contaminación actuales se mantienen en el tiempo. Sin embargo, si las fuentes de contaminación aumentan (escenarios D, E, y F) la calidad del agua puede disminuir hasta un 33% o más. Los resultados de cambio del caso base y los escenarios B a F se presentan en las figuras E.5 y E.6 para el Índice de Calidad de Agua Potable y de Riego.

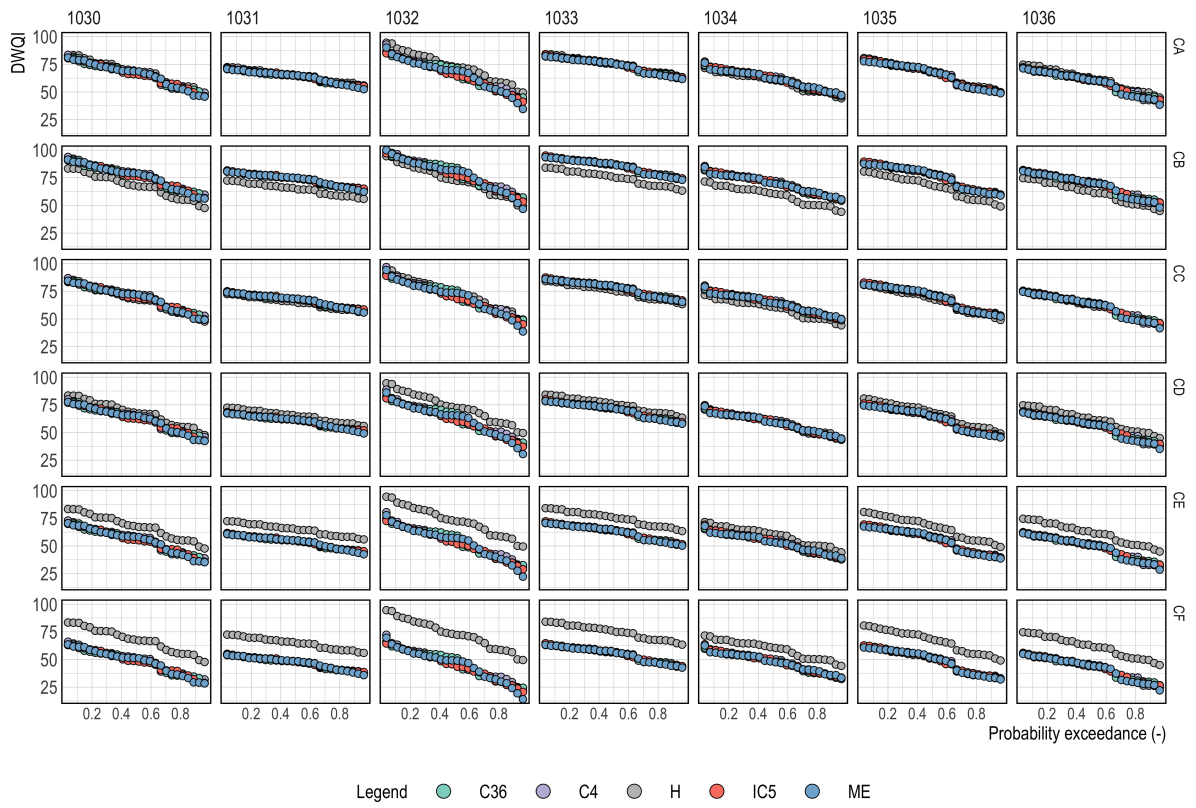


Figura E.5 Curva de duración de las observaciones y simulaciones del DWQI.

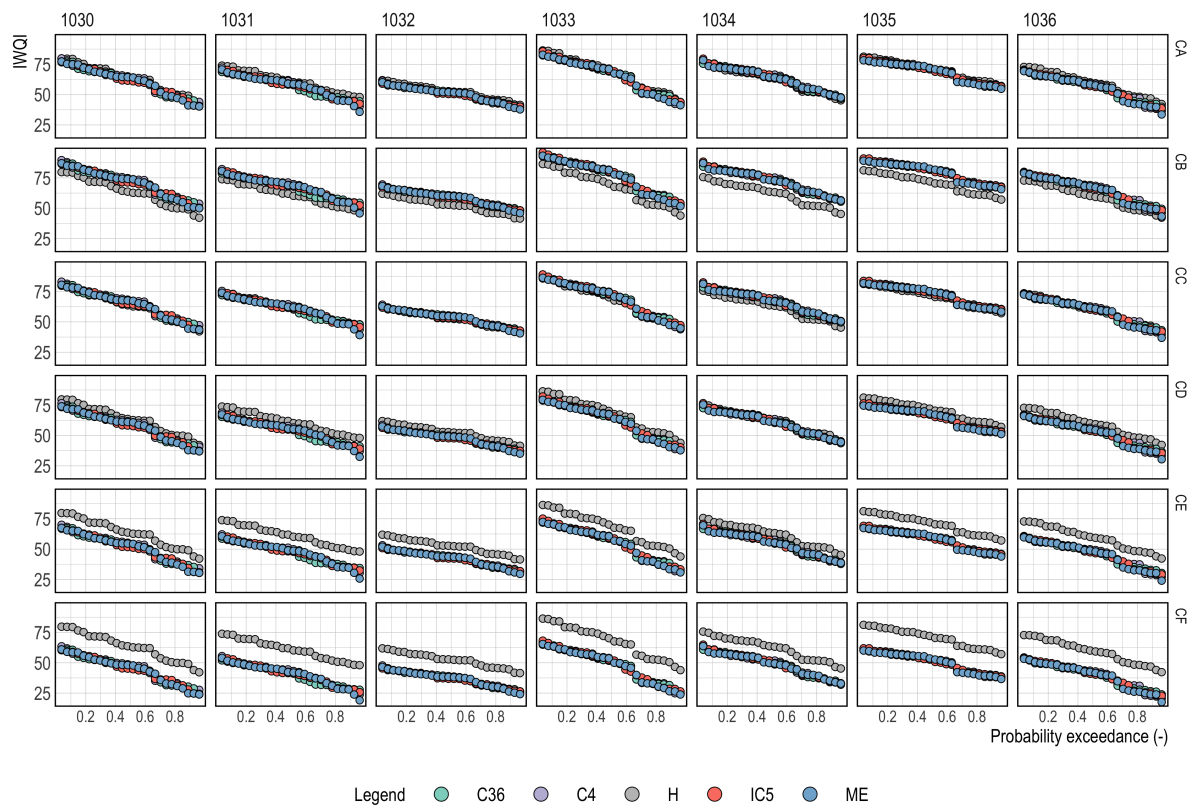


Figura E.6 Curva de duración de las observaciones y simulaciones del IWQI.