

Universidad de Valparaíso
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil



“Optimización de las Unidades de Respuesta Hidrológica
URHs utilizando el método PCA/HCPC aplicado en el
sector alto de las cuencas de Ligua-Petorca”

Por

Simón Pablo Caneo Brito

Trabajo de Título para optar al Grado de Licenciado en Ciencias de
la Ingeniería y Título de Ingeniero Civil

Profesor Guía: David Poblete López

Diciembre, 2021

Agradecimientos

Primero que todo, dar gracias a mi hermosa familia, a mi padre, Simón Caneo, a mi madre, Verónica Brito, a mis hermanas, Isabella, Josefa y Renata y a mis abuelos, Feliciano, Digna e Isabel. Y en especial a mi tía, Ernestina, quien de seguro estaría orgullosa de mí en este momento. Agradecer a mis amigos, Sebastián, Samuel, Osvaldo, Nicolás, Paula, Catalina, Lucas, y a todos los que me dieron su apoyo cuando los necesité, que de nombrarlos aquí no acabaría nunca.

En lo académico, agradecer a mi profesor guía David, quien ha confiado en mí a lo largo de todo este proceso, incentivándome a participar en instancias que han sido gratificantes en mi proceso como alumno y futuro profesional. Gracias, por responder siempre mis inquietudes, gracias por las recomendaciones, gracias por ser un buen profesor, colega y persona, gracias por ayudarme directa como indirectamente a convertirme en el profesional que estoy logrando ser, gracias, infinitas gracias.

También agradecer a todos los académicos de mi universidad, los cuales a lo largo de mi estadía en ella han aportado con su conocimiento y buena disposición. Agradecer a aquellos compañeros con los que nos apoyamos codo a codo para salir adelante, entre ellos Lucas, Joel, Felipe, Valentín, Enzo y muchos otros. Agradecer a Felipe y José, quienes siempre me apoyaron siempre cuando los necesité.

Por último, me gustaría plasmar unas palabras desde lo más profundo de mi corazón:

“¡Papá, mamá, lo logramos!

Le doy gracias a Dios por tener a padres como ustedes. Por los consejos que siempre me diste papá, por el aliento que siempre me brindaste mamá. Gracias por confiar incondicionalmente en mí, por jamás haber dudado siquiera un segundo de mis capacidades, aun cuando yo más lo hacía. Porque me enseñaron que el mayor impulso, lo genera el amor, el cual trae la felicidad, que conlleva a la plenitud y la tranquilidad, la cual permite realizar y sobrepasar cualquier contratiempo que se ponga por delante. Gracias por enseñarme a ser resiliente, y aprender que, aunque las posibilidades sean bajas, siempre existen, y siempre todo es posible. Este logro no es solo mío, también es de ustedes...”

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO I.....	13
1. Descripción del trabajo.....	13
1.1. Planteamiento del problema	13
1.2. Objetivos.....	15
1.2.1. Objetivo general	15
1.2.2. Objetivos específicos.....	15
1.3. Organización del documento	15
1.4. Alcances del trabajo.....	16
CAPÍTULO II.....	17
2. Revisión bibliográfica	17
2.2. Modelación hidrológica	17
2.3. Criterios de eficiencia para la modelación hidrológica.....	18
2.3.1. Eficiencia de Nash-Sutcliffe.....	19
2.3.2. Coeficiente de determinación (R^2).....	20
2.3.3. Criterio de Kling-Gupta (KGE).....	20
2.3.4. Sesgo estadístico (PBIAS)	20
2.4. Modelo WEAP	21
2.4.1. Generalidades.....	21
2.4.2. Métodos de simulación.....	22
2.4.3. Variables y Parámetros involucrados en el modelo WEAP	23
2.5. Unidades de Respuesta Hidrológica URHs	27
2.5.1. Factores necesarios para determinar unidades de respuesta hidrológica	28
2.6. Método PCA/HCPC	30
2.6.1. Análisis de las Componentes Principales (PCA).....	30
2.6.2. Sobre el Análisis de Clúster Jerárquicos	33
2.6.3. Método HCPC (Hierarchical Clustering on Principal Components).....	34
2.6.4. Método PCA/HCPC	35
2.7. Balance Hídrico Nacional (BHN).....	37
2.7.1. Fuentes de información del Balance Hídrico Nacional	37
2.7.2. Información disponible para la modelación	38
2.8. Relaciones geomorfológicas y de parámetros hidrológicos.....	39
2.9. Planes Estratégicos de Gestión Hídrica PEGH.....	44
2.10. Procesamiento de datos: R y QGIS	46
2.10.1. QGIS	46

2.10.2.	R y su interfaz RStudio.....	47
CAPÍTULO III		48
3.	Descripción de la metodología a utilizar	48
3.1.	Definición para la obtención de mapas ráster	48
3.1.1.	Parámetros Hidrológicos utilizados por el método.....	49
3.1.2.	Variables meteorológicas utilizadas por el método	50
3.2.	Definición de los criterios de delineamiento de URH	51
3.3.	Definición por PCA/HCPC.....	51
3.3.1.	Número óptimo de URH a utilizar	54
3.4.	Representación de las URH en el modelo WEAP	55
3.5.	Calibración y validación del modelo WEAP	57
3.5.1.	Ajustes en los parámetros de calibración del modelo.....	57
3.5.2.	Verificación mediante indicadores de eficiencia.....	58
3.5.3.	Estrategias de mejoramiento en las respuestas simuladas en caso de no ser representativas .	58
CAPÍTULO IV		59
4.	Recopilación de datos.....	59
4.1.	Caracterización de la zona de estudio (antecedentes generales).....	59
4.1.1.	Ubicación	59
4.1.1.	Características morfológicas	60
4.1.2.	Características climáticas	62
4.1.3.	Características del uso de suelo.....	63
4.2.	Procesamiento de la información disponible	65
4.2.1.	Información meteorológica	65
CAPÍTULO V		69
5.	Resultados del modelo.....	69
5.1.	Construcción del modelo	70
5.1.1.	Creación de mapas ráster.....	70
5.1.2.	Composición de las URH sobre las cuencas	79
5.1.3.	Construcción del modelo hidrológico	84
5.1.4.	Descripción de los elementos dentro del modelo hidrológico.....	87
5.1.5.	Configuración del modelo hidrológico WEAP	88
5.2.	Análisis mediante indicadores de eficiencia y tiempos de simulación	93
CAPÍTULO VI.....		95
6.	Análisis de resultados	95
6.1.	Calibración y validación del modelo	96
6.1.1.	Estrategia de mejoramiento en la respuesta hidrológica simulada	96

6.1.2. Análisis de sensibilidad en los parámetros hidrológicos del balde superior del método humedad del suelo	98
6.1.3. Respuesta hidrológica mejorada.....	101
6.2. Comportamiento en las URH.....	104
6.2.1. Características y diferencias entre las distintas URH.....	104
6.3. Eficiencia y tiempos de respuesta en la simulación.....	106
CAPÍTULO VII.....	110
7. Conclusiones	110
7.1. Comentarios finales	111
7.2. Recomendaciones	113
Referencias	114
Linkografía.....	116

Índice de Figuras

Figura 2.1 - Clasificación de modelos hidrológicos de acuerdo con la forma, la aleatoriedad y la variabilidad espacial y temporal.	18
Figura 2.2 - Interfaz del software de modelación WEAP.	21
Figura 2.3 - Elementos hidrológicos considerados por el modelo de Humedad de Suelo en WEAP.	22
Figura 2.4 - Variables y capas ráster consideradas en la generación de las URH.	27
Figura 2.5 - Representación gráfica de las variables meteorológicas en el espacio, las flechas roja y azul corresponden ser los vectores propios.	31
Figura 2.6 - Componente principal en la dirección del vector propio de mayor magnitud.	31
Figura 2.7 - Componente principal en la dirección del vector propio de menor magnitud.	32
Figura 2.8 - Dendrograma asociado a un método aglomerativo.	33
Figura 2.9 - Mapa geológico acotado al sector de las cuencas de Ligua-Petorca.	41
Figura 2.10 - Carta Geológica Quillota-Portillo.	41
Figura 2.11 - Mapa de la cobertura vegetal de la cuenca Ligua-Petorca. A la derecha se visualiza la paleta de colores correspondiente al tipo de cobertura vegetal definida en la Tabla 2.8.	43
Figura 2.12 - Modelo de elevación digital (DEM) y mapa de pendientes en formato ráster del área de estudio.	43
Figura 2.13 - Hoja de trabajo del PEGH.	44
Figura 2.14 - Ubicación geográfica de los Planes Estratégicos de Gestión Hídrica.	45
Figura 2.15 - Interfaz principal del Software QGIS en su versión 3.10.	46
Figura 2.16 - Interfaz principal del software RStudio.	47
Figura 3.1 - Diagrama de flujo en el cual se detalla de manera generalizada los pasos para la obtención de los principales mapas en formato ráster que será utilizados en el método PCA/HCPC.	48
Figura 3.2 - Mapas de parámetros hidrológicos que cubren la cuenca del estero Alicahue para: (arriba a la izquierda) Factor de resistencia a la escorrentía (RRF), (arriba a la derecha) Dirección preferencial del flujo (f), (abajo a la izquierda) Capacidad de almacenamiento de agua en el suelo (Sw) y (abajo a la derecha) Conductividad hidráulica en la zona de raíces (Ks). Sw y K se representan en una escala logarítmica.	49
Figura 3.3 - Mapas ráster de la cuenca del río Alicahue, (izquierda) precipitación media anual, (derecha) temperatura media anual.	50
Figura 3.4 - Descripción y uso de la función PCA dentro de la interfaz RStudio.	51
Figura 3.5 - Representación gráfica en dos dimensiones del PCA aplicado al set de datos considerados en el modelamiento realizado en la cuenca del río Alicahue.	52
Figura 3.6 - Descripción y uso de la función HCPC dentro de la interfaz RStudio.	53
Figura 3.7 - Dendrograma que representa la agrupación jerárquica realizada a un grupo de individuos; la función HCPC señala automáticamente mediante una línea negra continua que la división óptima debe ser de tres grupos.	53
Figura 3.8 - Grupos generados de manera automática por la función HCPC.	54
Figura 3.9 - Estaciones fluviométricas (rombos verdes) correspondiente a la parte alta de las cuencas de Ligua-Petorca.	56
Figura 3.10 - Esquematación de las URH (en verde) y los principales afluentes de la parte alta de las cuencas de Ligua-Petorca en el software WEAP.	56

Figura 3.11 - Proceso iterativo para la obtención de una respuesta hidrológica representativa bajo la metodología de generación de mapas ráster y su posterior PCA/HPCP.	58
Figura 4.1 - En salmón el contorno correspondiente a las cuencas de La Ligua y Petorca. En rojo las tres subcuencas de la parte alta correspondientes a la zona de estudio. Los rombos verdes representan las estaciones fluviométricas.	59
Figura 4.2 - Curvas hipsométricas correspondientes a las tres subcuencas de estudio. En cada gráfica se puede visualizar el área acumulada respecto a las elevaciones y su frecuencia (en porcentaje). De las tres curvas se desprende que el grueso de las superficies está comprendido entre los 2000 [msnm] y 2600 [msnm]. Las tres subcuencas se caracterizan por ser de gran altitud y pendientes pronunciadas.	61
Figura 4.3 - Morfometría presente en las tres subcuencas de estudio.	62
Figura 4.4 - Climogramas representativos de las tres subcuencas de estudio. Con base en datos extraídos desde el simulador climático (Cr) ² [50].	63
Figura 4.5 - Uso de suelo presente en las subcuencas de los ríos Pedernal, Sobrante y Estero Alicahue.	64
Figura 4.6 - Gráfica de proporciones por uso de suelo de las tres zonas de estudio.	64
Figura 4.7 - Distribución de la precipitación media anual por medio de IDW para las tres subcuencas altas de Ligua-Petorca.	66
Figura 4.8 - Distribución de la temperatura media anual por medio de IDW para las tres subcuencas altas de Ligua-Petorca.	66
Figura 4.9 - Distribución espacial de las forzantes climáticas correspondientes a la evaporación media diaria [mm], velocidad del viento [m/s], albedo [-] y humedad relativa [%] para las tres subcuencas altas de Ligua-Petorca.	67
Figura 4.10 - Ubicación estaciones fluviométricas (rombos verdes) y su área de contribución correspondiente.	68
Figura 5.1 - Diagrama de flujo con los principales pasos del capítulo para la generación y verificación del modelo.	69
Figura 5.2 - Litología del sector alto de las cuencas de Ligua-Petorca.	70
Figura 5.3 - Escala de permeabilidad local (K).	70
Figura 5.4 - Mapa en formato ráster con cada clase de permeabilidad presentes en la parte alta de las cuencas de Ligua-Petorca.	71
Figura 5.5 - Mapa en formato ráster con cada clase de cobertura vegetal correspondiente a la parte alta de las cuencas de Ligua-Petorca.	73
Figura 5.6 - Representación gráfica de la relación lineal entre la pendiente y la clase de drenaje.	73
Figura 5.7 - Mapa en formato ráster correspondiente a las clases de drenaje presentes en la parte alta de las cuencas de Ligua-Petorca.	74
Figura 5.8 - (a) Capas de información fisiográfica para clases de: permeabilidad (iP), densidad de vegetación (iV) y capacidad de drenaje (iS); (b) combinación lineal de capas; (c) Mapa de parámetros CN.	74
Figura 5.9 - Interfaz principal de la herramienta calculadora ráster en QGIS.	76
Figura 5.10 - Mapa en formato ráster correspondiente a la Dirección preferencial del flujo (f) para el sector alto de las cuencas de Ligua-Petorca.	77
Figura 5.11 - Mapa en formato ráster correspondiente a la Capacidad de almacenamiento de agua en la zona de raíces (Sw) para el sector alto de las cuencas de Ligua-Petorca.	77
Figura 5.12 - Mapa en formato ráster correspondiente a la Conductividad hidráulica en la zona de raíces (Ks) para el sector alto de las cuencas de Ligua-Petorca.	78

Figura 5.13 - Mapa en formato ráster correspondiente al Factor de resistencia a la escorrentía (RRF) para el sector alto de las cuencas de Ligua-Petorca.	78
Figura 5.14 - Conjunto de variables en formato ráster utilizadas para el PCA.....	79
Figura 5.15 - Gráfico de variables por dimensión para el análisis de las componentes principales. Se muestra las dos primeras dimensiones que cargan con el mayor aporte a la varianza total.	80
Figura 5.16 - Gráfico de correlación de las variables. Los círculos más grandes indican una correlación más alta, positiva si este es azul y negativa si está en color rojo.	81
Figura 5.17 - Varianza relativa interna para cada número de clúster o URH.	82
Figura 5.18 - Representación de las URH de la parte alta de las cuencas de Ligua-Petorca. Delimitación por 3 clúster.	82
Figura 5.19 - Representación de las URH de la parte alta de las cuencas de Ligua-Petorca. Delimitación por 5 clúster.	83
Figura 5.20 - Representación de las URH de la parte alta de las cuencas de Ligua-Petorca. Delimitación por 6 clúster.	83
Figura 5.21 - Conceptualización de las tres subcuencas altas de Ligua-Petorca en WEAP. Para una delimitación con 3 URH.....	84
Figura 5.22 - Conceptualización de las tres subcuencas altas de Ligua-Petorca en WEAP. Para una delimitación con 5 URH.....	85
Figura 5.23 - Conceptualización de las tres subcuencas altas de Ligua-Petorca en WEAP. Para una delimitación con 6 URH.....	85
Figura 5.24 - Diagramas de caja por variable una delimitación con 5 clúster.	88
Figura 5.25 - Coeficiente de cultivo mensual utilizado en la modelación.....	89
Figura 5.26 - Comparativa entre caudales para la estación fluviométrica en Alicahue, para 3 URH.....	90
Figura 5.27 - Comparativa entre caudales para la estación fluviométrica en Sobrante, para 3 URH.	90
Figura 5.28 - Comparativa entre caudales para la estación fluviométrica en Pedernal, para 3 URH.	91
Figura 5.29 - Comparativa entre caudales para la estación fluviométrica en Alicahue, para 5 URH.....	91
Figura 5.30 - Comparativa entre caudales para la estación fluviométrica en Sobrante, para 5 URH.	91
Figura 5.31 - Comparativa entre caudales para la estación fluviométrica en Pedernal, para 5 URH.	92
Figura 5.32 - Comparativa entre caudales para la estación fluviométrica en Alicahue, para 6 URH.....	92
Figura 5.33 - Comparativa entre caudales para la estación fluviométrica en Sobrante, para 6 URH.....	92
Figura 5.34 - Comparativa entre caudales para la estación fluviométrica en Pedernal, para 6 URH.	93
Figura 6.1 - Diagrama de flujo con los principales puntos de análisis del presente capítulo.	95
Figura 6.2 - Comparativa entre caudales para la estación fluviométrica del estero Alicahue entre enero de 1997 y diciembre del 2003, para una delimitación en base a 5 URH.....	96
Figura 6.3 - Comparativa entre caudales para la estación fluviométrica del estero Alicahue entre enero de 2010 y diciembre del 2016, para una delimitación en base a 5 URH.....	97
Figura 6.4 - Humedad del suelo del balde 1 en porcentaje para las distintas URH.....	98
Figura 6.5 - Interfaz de datos del software de modelación WEAP. El recuadro de color rojo detalla la modificación efectuada para condicionar el parámetro asociado al factor de resistencia a la escorrentía RRF mediante una sentencia IF.	99

Figura 6.6 - Interfaz de datos del software de modelación WEAP. El recuadro de color rojo detalla la modificación efectuada para condicionar el parámetro asociado a la conductividad hidráulica en la zona de raíces Ks mediante una sentencia IF.....	99
Figura 6.7 - Comparativa entre caudales para la estación fluviométrica del estero Alicahue entre enero de 1997 y diciembre del 2003, para una delimitación en base a 5 URH. En rojo la tendencia original de la respuesta hidrológica simulada, en verde la tendencia de la respuesta hidrológica mejorada (IF) y en azul la respuesta observada.....	100
Figura 6.8 - Comparativa entre caudales para la estación fluviométrica del estero Alicahue entre enero de 2010 y diciembre del 2016, para una delimitación en base a 5 URH. En rojo la tendencia original de la respuesta hidrológica simulada, en verde la tendencia de la respuesta hidrológica mejorada (IF) y en azul la respuesta observada.....	100
Figura 6.9 - Hidrograma del caudal observado y modelado en la estación fluviométrica “río Alicahue en Colliguay” para una simulación con 5 URH.	102
Figura 6.10 - Hidrograma del caudal observado y modelado para la estación fluviométrica “río Sobrante en Piñadero” para una simulación con 5 URH.	103
Figura 6.11 - Hidrograma del caudal observado y modelado para la estación fluviométrica “río Pedernal en Tejada” para una simulación con 5 URH.	103
Figura 6.12 - Descarga media mensual por URH, para una delimitación con base en 5 URH.....	105
Figura 6.13 - Disminución de la nieve (derretimiento) por URH.....	106
Figura 6.14 - Esquemmatización del modelo WEAP considerando bandas de elevación.	107
Figura 6.15 - Esquemmatización del modelo WEAP con base en la metodología PCA/HCPD.....	107
Figura 6.16 - Esquemmatización del modelo WEAP para las cuencas de La Ligua y Petorca.	109
Figura 7.1 - Conceptualización gráfica del comportamiento en el desempeño de la respuesta simulada bajo distintos sets de datos de entrada al modelo.	112

Índice de Tablas

Tabla 2.1 Rangos de eficiencia del criterio de Nash-Sutcliffe.....	19
Tabla 2.2 Variables y parámetros utilizados por el modelo WEAP.	23
Tabla 2.3 Principales parámetros de calibración del modelo WEAP, asociados al análisis superficial.	26
Tabla 2.4 Clasificación jerárquica para generalizar los factores dominantes en el ciclo del agua y los índices para una definición efectiva de las URHs.....	28
Tabla 2.5 Tabla para ejemplificación del método en 2 dimensiones	30
Tabla 2.6 Parámetros de calibración para del modelo WEAP utilizados por diversos autores y estudios.....	36
Tabla 2.7 Codificación de las características fisiográficas para la estimación de CN para condiciones de referencia (humedad del suelo Tipo II y radio de extracción inicial 20%).	40
Tabla 2.8 Tipos de cobertura vegetal según [14].	42
Tabla 3.1 Variables meteorológicas consideradas para la generación de mapas ráster.	50
Tabla 3.2 Variables meteorológicas y parámetros hidrológicos en los que será aplicado un PCA.	52
Tabla 4.1 Descripción geográfica y estado actual de las estaciones de monitoreo en los puntos de salida de cada subcuenca.	60
Tabla 4.2 Características morfológicas por subcuenca.....	60
Tabla 4.3 Detalle del área por uso de suelo correspondiente a la parte alta de las cuencas de Ligua-Petorca. 65	
Tabla 4.4 Estaciones fluviométricas presentes en la parte alta de las cuencas de Ligua-Petorca.	68
Tabla 5.1 Detalle del estrato, tipo de roca y simbología con su clase de permeabilidad correspondiente. Los valores de iP son valores aproximados, fueron estimados tomando en consideración los niveles de permeabilidad presentes en [49] y las recomendaciones propuestas por [46].	71
Tabla 5.2 Detalle del tipo de uso de suelo disgregado en tres niveles y la clase de vegetación iV correspondiente a cada nivel con base en lo indicado en [46].	72
Tabla 5.3 Constantes numéricas de ajuste A, B, C y D para cada parámetro hidrológico correspondiente. ...	75
Tabla 5.4 Resumen de las contribuciones por dimensión y variable de cada componente principal.....	80
Tabla 5.5 Área total y su porcentaje correspondiente por subcuenta y unidad hidrológica. Caso de tres URH.	86
Tabla 5.6 Área total y su porcentaje correspondiente por subcuenta y unidad hidrológica. Caso de cinco URH.	86
Tabla 5.7 Área total y su porcentaje correspondiente por subcuenta y unidad hidrológica. Caso de seis URH.	86
Tabla 5.8 Set de datos asociados a los parámetros hidrológicos para una delimitación con 3 URH.	89
Tabla 5.9 Set de datos asociados a los parámetros hidrológicos para una delimitación con 5 URH.	89
Tabla 5.10 Set de datos asociados a los parámetros hidrológicos para una delimitación con 6 URH.	89
Tabla 5.11 Set de variables y parámetros de calibración utilizados para los tres casos de delimitación.	90
Tabla 5.12 Rendimiento del modelo WEAP evaluado mediante tres indicadores de eficiencia, para una delimitación en base a 3 URH.	93
Tabla 5.13 Rendimiento del modelo WEAP evaluado mediante tres indicadores de eficiencia, para una delimitación en base a 5 URH.	93
Tabla 5.14 Rendimiento del modelo WEAP evaluado mediante tres indicadores de eficiencia, para una delimitación en base a 6 URH.	94

Tabla 6.1 Caudal medio simulado, observado y diferencia porcentual en el período de análisis definido.	97
Tabla 6.2 Caudal medio observado, simulado y diferencia porcentual entre los dos métodos de modelación.	101
Tabla 6.3 Parámetros de calibración correspondientes a la subcuenca del estero Alicahue en Colliguay.	101
Tabla 6.4 Parámetros de calibración correspondientes a la subcuenca del río Sobrante en Piñadero.	102
Tabla 6.5 Parámetros de calibración correspondientes a la subcuenca del río Pedernal en Tejada.	102
Tabla 6.6 Rendimiento del modelo WEAP bajo un escenario de 5 URH.	103
Tabla 6.7 Detalle de las principales variables medias anuales pertenecientes a cada URH utilizada en modelación hidrológica. Cada valor está comprendido en la escala temporal de análisis, ene-1892 a dic-2018.	104
Tabla 6.8 Detalle del número de coberturas vegetales presentes por cada banda de elevación.	106
Tabla 6.9 Detalle de los elementos considerados por tipo de modelación hidrológica en WEAP, mediante la metodología de la humedad del suelo.	108

Índice de Ecuaciones

(1).....	19
(2).....	19
(3).....	20
(4).....	20
(5).....	20
(6).....	24
(7).....	24
(8).....	24
(9).....	25
(10).....	25
(11).....	37
(12).....	39
(13).....	39
(14).....	39
(15).....	39
(16).....	39
(17).....	40
(18).....	55
(19).....	73
(20).....	73
(21).....	75
(22).....	75
(23).....	75
(24).....	75
(25).....	75

CAPÍTULO I

1. Descripción del trabajo

1.1. Planteamiento del problema

La Dirección General de Aguas (DGA) en 2019 comenzó a trabajar en el desarrollo de Planes Estratégicos de Gestión Hídrica (PEGH) para las 101 cuencas de Chile que contaban con más información y mayores problemas hídricos, con la finalidad de conocer la oferta y la demanda histórica, actual y potencial de agua; establecer el balance hídrico y sus proyecciones a 30 años; diagnosticar la calidad de las aguas subterráneas y superficiales entre otros [1].

El modelo WEAP [2] de Ligua-Petorca [3], diseñado para la DGA en 2019, es un modelo que cuenta con una amplia cantidad de unidades de respuesta hidrológica (URH) respecto a otros PEGH, como el diseñado para modelar la cuenca del Elqui [4], compuesto por alrededor de 350 URH, o el utilizado para modelar la cuenca de Casablanca que utilizó cerca de 75 URH [5]. Si bien, la cantidad de URH empleadas para la modelación dependerá de la información que se disponga en el área de aplicación (tamaño, característica climáticas, hidrológicas, geológicas, etc.), de los criterios del modelador y de lo que se busca interpretar con el modelo, la simulación efectuada en las cuencas de Ligua y Petorca (donde se emplearon aproximadamente 1150 URH) está muy lejos de convertirse en un modelo eficiente, manipulable y de bajo costo computacional, muy por el contrario, este modelo se caracteriza por su ineficiencia computacional y alto costo de recursos empleados para su modelación, que no necesariamente añaden una mejor interpretación por parte del modelo.

Es por ello que uno de los principales objetivos y motivaciones del presente estudio consistirá en aplicar mejoras sobre la metodología de delineamiento de URH, bajar los tiempos de procesamiento, y a la vez mejorar los indicadores hidrológicos, como los de Nash-Sutcliffe [6], PBIAS [7] o el criterio de Kling-Gupta [8]. Todo esto, aplicado en tres subcuencas del sector alto de Ligua-Petorca, identificadas como: Alicahue en Colliguay, Sobrante en Piñadero y Pedernal en Tejada.

Parte importante del proceso de la modelación hidrológica consiste en simplificar los parámetros de interés, reduciendo la heterogeneidad de la cuenca y aumentando la representatividad en la respuesta. En general este proceso de simplificación suele ser excesivo, ya sea por una mala estimación de parámetros o simplemente porque las ecuaciones utilizadas en el modelo son muy simples, lo que implica que los procesos hidrológicos en estudio no puedan ser representados de la mejor forma. A partir de esta situación, durante los últimos años autores como Flügel [9] o Devito et al. (2005) [10] han centrado sus esfuerzos en determinar qué características o índices principales pueden generalizarse para explicar colectivamente la mayor variación de los procesos hidrológicos preponderantes, y la escala adecuada con la que estos interactúan. Esto, con la intención de interpretar de la manera más fidedigna los procesos ocurridos dentro de un área de aplicación, sin enmascarar los factores que le siguen en un orden inferior. Por ejemplo, Poblete et al. (2020) [11] aplican un análisis de las componentes principales y clúster jerárquicos, o denominado por ellos como la metodología “PCA/HCPC” como estrategia para modelar óptimamente sin perder esa heterogeneidad o precisión en los resultados. Esta es una técnica utilizada para describir un conjunto de datos en términos de nuevas componentes no correlacionadas entre sí, permitiendo utilizar la experiencia del modelador para asignar más importancia a variables específicas, proporcionando una mayor relevancia a aquellas variables que realmente son preponderantes (por ejemplo, precipitación y temperatura) y una menor importancia a aquellas que no son tan representativas para el modelo. Esta metodología permite capturar la información más representativa de la zona, agruparla mediante URH donde la heterogeneidad interna sea mínima, y la externa entre las distintas unidades sea máxima. De esta forma, el producto final es un modelo hidrológico liviano, de alta eficiencia computacional, que no descuida la precisión en la simulación, brindando rapidez en la entrega de resultados.

Para la implementación del PCA/HCPC, se requerirá contar con mapas de los principales parámetros hidrológicos y variables meteorológicas del sector. Actualmente, el Balance Hídrico Nacional (BHN) [12] pone

a libre disposición las variables meteorológicas más importantes por medio de archivos NetCDF. Sin embargo, si bien no existen los mapas que requiere el método, éstos pueden ser generados procesando y agregando temporalmente la información entregada por el BHN. No obstante, con respecto a los parámetros hidrológicos, no existe registro alguno o estudios que hayan generado esta información de manera espacializada, ni mucho menos mapas en formato ráster de los mismos. Para ello deberá ser aplicada alguna metodología que permita la generación de esta información cuadriculada, permitiendo establecer cada uno de los parámetros hidrológicos por utilizar.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Modelar hidrológicamente tres subcuencas pertenecientes al sector alto de las cuencas de Ligua-Petorca, basadas en la metodología de delineamiento de unidades de respuesta hidrológica PCA/HCPC. Para aplicar este método será necesario contar con mapas en formato ráster de los principales parámetros hidrológicos y variables meteorológicas de la zona, inexistentes actualmente, por lo cual deberán ser generados en base a información geomorfológica y variables meteorológicas extraídas del BHN.

1.2.2. Objetivos específicos

- Desarrollar una metodología para generar mapas ráster para los parámetros hidrológicos correspondientes al balde superior del método de la humedad del suelo de WEAP (f, Ks, Sw, RRF) y variables meteorológicas (precipitación, temperatura, humedad relativa, evaporación, albedo, velocidad del viento).
- Aplicar la metodología de delineamiento de las URH mediante el método PCA/HCPC.
- Obtener los resultados de modelación; los cuales deberán ser ajustados mediante calibración.
- Comprobar los resultados del modelo utilizando factores de eficiencia (NSE/KGE/R²) y tiempos de simulación del modelo.
- Verificar la respuesta hidrológica del modelo en base a las estaciones fluviométricas de los ríos Pedernal en Tejada, Sobrante en Piñadero y estero Alicahue en Colliguay.

1.3. Organización del documento

Sin contar el presente capítulo, el documento se compone de otros seis, los cuales serán definidos a continuación:

En el Capítulo II, se presenta una revisión de los principales antecedentes y definiciones que fueron utilizadas a lo largo del estudio. Se describe lo qué es una modelación hidrológica, los criterios para su evaluación y el software empleado para llevar a cabo ésta. Algunos conceptos claves como que es una URH, la metodología PCA/HCPC entre otros.

En el Capítulo III, se describe la metodología empleada en este estudio. Se entregan algunas definiciones para obtener información en formato raster de los principales mapas, como también los criterios usados para la delimitación de las distintas URH y la representación de estas mismas dentro del modelo WEAP. Finalmente, se presenta la forma en que se calibrará y validará el modelo.

Toda la recopilación de antecedentes, la caracterización de la zona de estudio y el procesamiento de la información disponible son presentados en el Capítulo IV.

Los resultados del modelo mediante la metodología de creación de mapas y del PCA/HCPC son presentados en el Capítulo V. Se detalla la creación de los mapas ráster utilizados, la composición de las URH sobre la cuenca y finalmente el análisis mediante indicadores de eficiencia y tiempos de simulación del modelo.

En el Capítulo VI, se analizan los resultados obtenidos en el capítulo anterior, se presentan estrategias de mejoramiento en la respuesta hidrológica para su posterior calibración. Se evidencia el comportamiento de las distintas URH que conforman la cuenca y finalmente se presenta la eficiencia y tiempos de respuesta en la simulación.

Finalmente, el Capítulo VII presenta las conclusiones, comentarios finales y recomendaciones de este trabajo.

1.4. Alcances del trabajo

- El estudio se realizará en tres subcuencas pertenecientes a la parte alta de La Ligua y Petorca. Las cuencas de estudio no poseen intervención antrópica (cuencas en régimen natural).
- Para el punto de salida de cada cuenca se utilizarán las estaciones fluviométricas “Río Pedernal en Tejada, Río Sobrante en Piñadero y Estero Alicahue en Colliguay”.
- Para hacer la modelación hidrológica se usará el software de modelación WEAP en su versión 2
- Se modelará a escala temporal mensual.
- Los datos observados de caudales, precipitaciones y temperaturas del sector serán extraídos de las estaciones fluviométricas de la DGA, información disponible del Balance Hídrico Nacional (BHN), ERA 5 y de la Red Agroclimática Nacional del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIA).
- La información geológica será extraída del Mapa Geológico de Chile y la Carta Quillota-Portillo, elaborados por SERNAGEOMIN.
- La información geográfica y elevaciones (DEM) se obtendrán por medio de ALOS PALSAR L1.0 2007 [13]
- Los datos de cobertura vegetal disponibles se obtendrán desde el Land Cover Chile elaborado por Zhao *et al.* (2016) [14].
- La manipulación de estos datos se realizará por medio del software QGIS 3.20.2 y R.

CAPÍTULO II

2. Revisión bibliográfica

Este capítulo tiene como finalidad introducir de manera específica todos aquellos fundamentos científicos en los que se apoyará el estudio actual. Dentro de los principales temas se encuentran definiciones de que es un modelo hidrológico, cómo clasificarlos, en base a que criterios de eficiencia evaluarlos, entre otros. Se describirá en detalle qué es una URH y como definir las adecuadamente, sumado a esto también se explicará la metodología para la generación de estas URH y todos los aspectos necesarios para llevarla a cabo (incluidos los datos requeridos para su ejecución).

2.2. Modelación hidrológica

Los modelos hidrológicos son herramientas cuyo principal objetivo es el de representar de manera simplificada un sistema real. Estas representaciones son un reflejo de cómo comprendemos el área de estudio y sus interacciones con el medio. La capacidad predictiva del modelo depende netamente de cómo lo diseñamos, por lo que la calidad de las predicciones es generalmente consistente con la calidad de nuestra comprensión del sistema y del modelo que lo representa. Esto significa que no existe el modelo perfecto aplicable a todas las cuencas del planeta, debido a que cada una de estas cuencas posee condiciones propias, (ya sea, clima, geografía, geología, etc.) provocando un incremento en la importancia de un proceso por sobre otros y condicionan la estructura del modelo [15].

Si bien existe una gran variedad de modelos hidrológicos, los más utilizados suelen ser clasificados en dos grupos, determinísticos o estocásticos. Esta clasificación depende principalmente de la forma en que queda representada la realidad física de la cuenca, podría decirse que los modelos determinísticos hacen pronósticos, ya que no consideran términos aleatorios dentro del modelo (cada simulación que se realice producirá el mismo resultado), mientras que los modelos estocásticos hacen predicciones [16].

Como se muestra en la Figura 2.1 dentro del grupo de modelos determinísticos se encuentran los modelos agregados y distribuidos.

En un modelo determinístico agregado, el sistema es considerado como un punto único sin dimensiones en el espacio, por ejemplo, la precipitación como dato de entrada al modelo es modelada uniformemente en toda la cuenca ignorando su variación espacial. En contraste, un modelo distribuido es capaz de representar las características generales de la cuenca de manera heterogénea y distribuida, esto mediante esquemas engrillados o por medio de un número limitado de URH de los principales comportamientos hidrológicos observados en la cuenca. Este será el tipo de modelo que será utilizado para la modelación.

Por otra parte, están los modelos estocásticos, los cuales no serán considerados en el estudio actual ni se profundizará en su explicación.

Finalmente, la evaluación del comportamiento y el rendimiento de los modelos hidrológicos se realiza y se expresa mediante comparaciones de las variables simuladas y observadas, generalmente usando como comparaciones el caudal simulado y el medido a la salida de la cuenca, como también se pueden integrar procesos de evaluación para calificar el rendimiento global de la modelación [17].

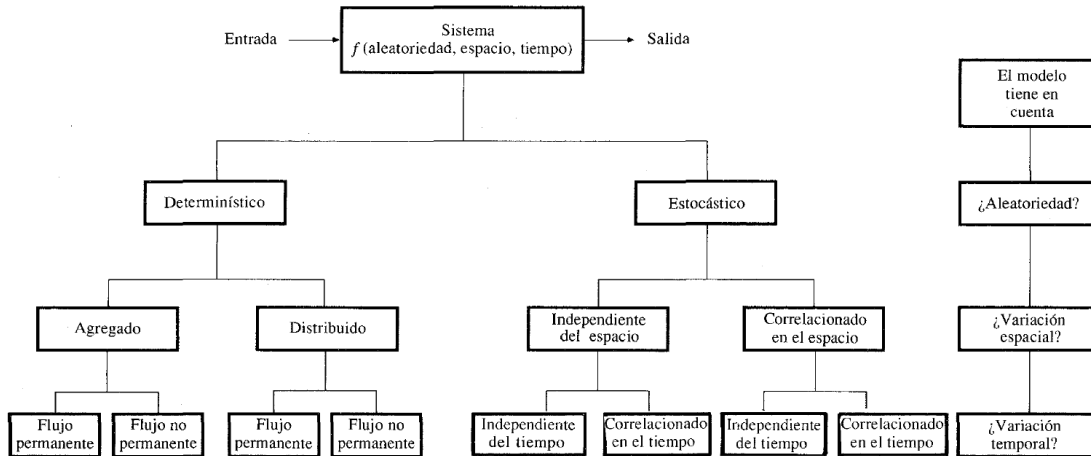


Figura 2.1 - Clasificación de modelos hidrológicos de acuerdo con la forma, la aleatoriedad y la variabilidad espacial y temporal.

Fuente: [18].

2.3. Criterios de eficiencia para la modelación hidrológica

Existen diversas razones por las que los modeladores hidrológicos necesitan evaluar el rendimiento que tendrá el modelo, entre las principales razones destacan:

- Una estimación cuantitativa de la capacidad del modelo para representar el comportamiento histórico y futuro de la cuenca.
- Generar un medio que sirva como estándar para evaluar las mejoras de la modelación, mediante ajustes de los parámetros de calibración del modelo, modificaciones en su estructura, información observada adicional y la representación de características espaciales y temporales de la cuenca a modelar.
- Comparar los esfuerzos actuales de la modelación con los resultados de estudios anteriores.

Basado en los estudios hechos por Krause [17], el proceso para la evaluación del rendimiento de un modelo hidrológico se puede llevar a cabo por medio de dos tipos de estimaciones, las subjetivas y/u objetivas de la “cercanía” del comportamiento simulado del modelo a las observaciones (normalmente caudales).

Las estimaciones subjetivas por lo general se enfocan en realizar una inspección visual de los resultados modelados y observados, con la finalidad de que el modelador realice evaluaciones (subjetivas) del comportamiento del modelo (por ejemplo, a través del comportamiento de los hidrogramas simulados y observados de la cuenca).

Por otra parte, la evaluación objetiva efectúa esta inspección en los resultados modelados y observados generalmente mediante el uso de una estimación matemática del error entre las variables hidrológicas simuladas y observadas, para ello se requiere la utilización de criterios de eficiencia los cuales permiten cuantificar el grado de ajuste de las series simuladas por el modelo. A continuación, se definirán los criterios que serán utilizados en el presente estudio.

2.3.1. Eficiencia de Nash-Sutcliffe

La eficiencia propuesta por Nash y Sutcliffe (1970) mide cuanto de la variabilidad de las observaciones (datos medidos) es explicada por la simulación, estableciendo la eficiencia del modelo para predecir los caudales en comparación con la utilización de la media como predictor de la variable (Morales, 2016) [19].

El rango de NS varía entre 1.0 (correspondiendo a un ajuste perfecto) y “ $-\infty$ ”. Moriasi (2007) [20] señala que una modelación adecuada usualmente se obtiene para valores de NS sobre 0.7.

La eficiencia de Nash-Sutcliffe se calcula mediante la ecuación (1):

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{(Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (1)$$

Donde:

- $Q_{obs,i}$, $Q_{sim,i}$: caudal medio observado (obs) y caudal medio simulado (sim), en (m³/s)
- \bar{Q}_{obs} : corresponde al promedio de los datos observados en (m³/s),
- Rango temporal de la simulación i (diario, semanal, mensual o anual).

A continuación, la Tabla 2.1 muestra los rangos de eficiencia del criterio de Nash-Sutcliffe:

Tabla 2.1 Rangos de eficiencia del criterio de Nash-Sutcliffe.

Desempeño	Rango
Malo	$NS \leq 0.25$
Regular	$0.25 \leq NS \leq 0.50$
Bueno	$0.50 \leq NS \leq 0.70$
Muy bueno	$0.70 < NS < 0.80$
Excelente	$0.80 < NS < 1.0$

Esta eficiencia también puede ser calculada mediante valores logarítmicos, a dicho criterio se le denomina como NSLog. Principalmente, utiliza los valores obtenidos en la ecuación (1) a diferencia que los caudales ingresados vendrían en formato logarítmico, como se presenta en la ecuación (2):

$$NSLog = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\text{Log}_{10}(Q_{obs,i}) - \text{Log}_{10}(Q_{sim,i}))^2}{(\text{Log}_{10}(Q_{obs,i}) - \bar{\text{Log}}_{10}(Q_{obs}))^2} \quad (2)$$

2.3.2. Coeficiente de determinación (R^2)

El coeficiente de determinación R^2 corresponde a una medida estadística usada en el contexto de un modelo estadístico; el principal objetivo es predecir el comportamiento de futuros resultados o probar la veracidad de una hipótesis planteada. El R^2 determina qué tan buena es la calidad de un modelo estadístico para representar los resultados y qué tan dispersos resultan ser los mismos. El coeficiente puede ser estimado mediante de la ecuación (3):

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs}) \cdot (Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2 \cdot (Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim})^2}} \quad (3)$$

El valor del índice R^2 varía entre 0 y 1, siendo 1 una correlación positiva perfecta, mientras que un valor cercano a 0 indica que no existe ninguna correlación entre las variables.

2.3.3. Criterio de Kling-Gupta (KGE)

El criterio de eficiencia Kling-Gupta proporciona un indicador para los problemas de modelamiento hidrológico, en función de tres términos provenientes del criterio de eficiencia de Nash-Sutcliffe, estos son: razón de correlación (r), la media (β) y la desviación estándar (α) de los valores observados y simulados.

Gupta (2009) [21] define este criterio como una distancia euclidiana de un punto ideal a un óptimo considerando los tres parámetros descritos con anterioridad. El criterio puede ser estimado mediante la ecuación (4):

$$KGE = 1 - \sqrt{(1 - r)^2 + (1 - \alpha)^2 + (1 - \beta)^2} \quad (4)$$

Donde:

- r : coeficiente de correlación entre las descargas simuladas y observadas,
- β : proporción entre la media de las descargas simuladas y la media de las descargas observadas,
- α : proporción entre el coeficiente de variación de las descargas simuladas y observadas.

2.3.4. Sesgo estadístico ($PBIAS$)

El sesgo porcentual o PBIAS corresponde al promedio de la diferencia entre valores medidos y estimados. Este coeficiente es utilizado para medir o evaluar los errores asociados a la subestimación o sobreestimación de las variables modeladas. El valor óptimo del PBIAS es 0, ya que bajas magnitudes en los valores indican una mayor precisión en el modelo de simulación. Valores positivos señalan que el modelo está subestimando este sesgo, valores negativos indican que el modelo estaría sobreestimando el sesgo [22]. El PBIAS es calculado mediante la siguiente ecuación:

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i}) \cdot 100}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i})} \right] \quad (5)$$

2.4. Modelo WEAP

2.4.1. Generalidades

El software que será utilizado para el presente estudio es “Water Evaluation and Planning” de su sigla en inglés “WEAP”, es utilizado para la planificación integrada de los recursos hídricos ligados a un modelo hidrológico de un sector determinado. WEAP se caracteriza por poseer un enfoque integrado a la hora de simular sistemas de aguas. Colocando en igualdad de condiciones la oferta (flujo de aguas, aguas subterráneas, embalses y transferencias de aguas) y la demanda (patrones de uso del agua, eficiencias de uso, reutilización, costos y asignación) de agua.

WEAP es integral, directo y fácil de usar, e intenta ayudar en lugar de sustituir al planificador calificado. Al ser una base de datos, WEAP provee un sistema para mantener la información de demanda y suministro de agua. Como herramienta de pronóstico, WEAP simula la demanda de agua, el suministro, la escorrentía, los flujos de corriente, el almacenamiento, la generación de contaminación, el tratamiento, descarga y calidad del agua. Como herramienta de análisis de políticas, WEAP evalúa y tiene en cuenta una gama completa de opciones de desarrollo y gestión del agua [23], como se observa en la Figura 2.2.

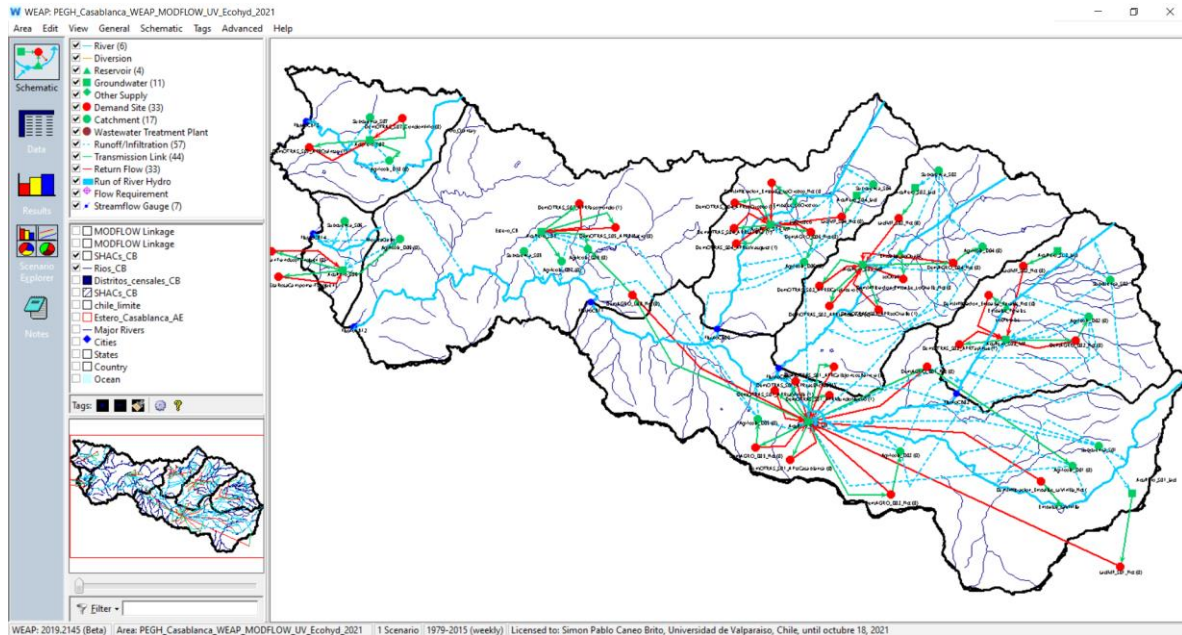


Figura 2.2 - Interfaz del software de modelación WEAP.

En Chile, el modelo WEAP ha sido utilizado de manera muy amplia para la modelación hidrológica, siendo uno de los principales actores dentro de la modelación, esto principalmente se debe a su diseño, el cual permite operar en distintos modos tales como: base de datos de balance de agua (el cual proporciona un sistema para mantener información de oferta y demanda de agua), herramientas de generación de escenarios (donde se puede simular la oferta, demanda, escorrentías y caudales, tratamientos y calidades del agua en los principales cauces del área de aplicación) y herramientas de análisis de política (donde se evalúa una completa gama de operaciones para el manejo del agua, tomando en cuenta los diversos usos que se le da a los recursos hídricos).

2.4.2. Métodos de simulación

El modelo WEAP cuenta con cinco métodos para calcular el balance hídrico de una cuenca. El usar uno o el otro depende netamente del nivel de complejidad o el detalle que se quiera incorporar en los procesos de la modelación hidrológica y con la información disponible que se disponga. Los cinco métodos de simulación son:

El “Método de las Demandas de Riego” se basa en el análisis y utilización de los coeficientes de cultivo para generar el cálculo de la evapotranspiración potencial (ETp), esto por medio del volumen de agua requerido para cubrir las demandas evapotranspirativas que la lluvia no logra suplir. A diferencia de los métodos que se definirán a continuación, este no simula cambios en la humedad del suelo, escorrentía o infiltración.

Por otra parte, el “Método Precipitación-Escorrentía” es casi un complemento del anterior, utilizando las bases del anterior en cuanto a la modelación, este método considera los remanentes de lluvia que no son evapotranspirados como un aporte directo a la cuenca o como escorrentía superficial.

Correspondiente al método que será usado en el presente estudio, el “Método de la Humedad del Suelo (Soil Moisture)” es de mayor complejidad debido a que requiere de una mayor cantidad de información para su operación, no obstante, suele ser más representativo a la hora de entregar resultados. Este método representa la cuenca mediante 2 baldes, basados en funciones empíricas que describen la evapotranspiración, la escorrentía superficial y subterránea y la percolación profunda para una unidad de cuenca. Este método permite caracterizar el uso de la tierra y los impactos del tipo de suelo en estos procesos.

El modelo “MABIA”, es una simulación diaria de la transpiración, la evaporación, las demandas de riego, la programación del riego, el crecimiento del cultivo y los rendimientos característicos de cada uno. También es capaz de simular el crecimiento de las plantas y el uso del agua junto con el rendimiento a nivel diario.

Siendo el último de los cinco métodos, “Plant Growth Model (PGM)” es un modelo capaz de estimar rendimientos de cultivos, demandas de agua para riego, eficiencias de aplicación y caudales de retorno [24].

Como se muestra en la Figura 2.3, en la capa superior se simula la evapotranspiración, precipitaciones, riego, flujo subsuperficial, pérdidas subsuperficiales y cambios en la humedad del suelo.

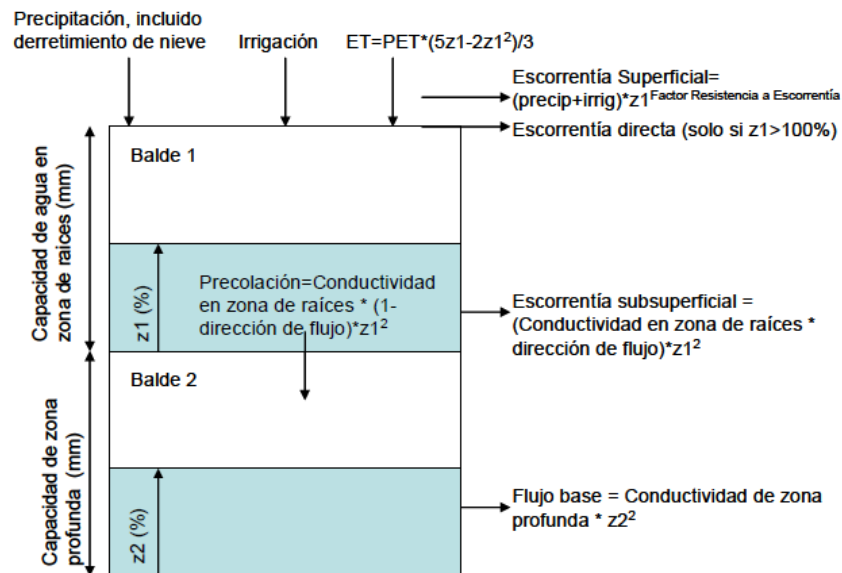


Figura 2.3 - Elementos hidrológicos considerados por el modelo de Humedad de Suelo en WEAP.

Fuente: [24].

2.4.3. Variables y Parámetros involucrados en el modelo WEAP

Como se definió en la sección anterior, el concepto de modelo hidrológico está directamente ligado al proceso de precipitación-escorrentía, proceso que puede ser descrito mediante el modelo integrado de los 2 baldes ver Figura 2.3. Este esquema es capaz de reproducir el comportamiento de los distintos componentes de los flujos superficiales y subterráneos por medio de funciones empíricas que describen, la evapotranspiración, la escorrentía superficial y subterránea y la percolación de un área o “unidad de respuesta hidrológica (URH)” específica. Este método tiene la propiedad de caracterizar el uso de la tierra y los impactos que provocan los distintos tipos de suelo en dichos procesos.

Cada URH se utiliza principalmente para la desagregación de una superficie mediante bandas de elevación (DEM), áreas de cultivo, usos de suelo, variables meteorológicas del modelo, etc.

El presente trabajo se centrará en la descripción de los procesos y variables involucradas del balde superior (balde 1). El balde inferior (balde 2) y todos los procesos involucrados en este no serán considerados en los cálculos y análisis posteriores. Esta decisión es impulsada principalmente como una medida de simplificación (ya que no existen estudios de apoyo que permitan generar una base de información mínima necesaria para su generación), y con la intención de generar un modelo más liviano y de bajo coste computacional, por lo cual se decidió solo considerar aquellas variables que están presentes en el balde superior y no describir los procesos subterráneos. La Tabla 2.2 presenta las variables y parámetros que utiliza el modelo WEAP.

Tabla 2.2 Variables y parámetros utilizados por el modelo WEAP.

Uso del Suelo	VARIABLES DE ENTRADA	<ul style="list-style-type: none"> • Área de la cuenca • Coeficiente de cultivo (k_c)
	Parámetros internos del modelo, sujetos a calibración	<ul style="list-style-type: none"> • Almacenamiento del suelo, estanque superior (S_w) • Almacenamiento profundo, estanque inferior (D_w) • Conductividad de la zona radicular o estanque 1 (K_s) • Conductividad de la zona profunda o estanque 2 (k_d) • Factor de resistencia al escurrimiento (RRF) • Dirección preferencial del flujo (f) • Almacenamiento inicial en el estanque 1 (z_1) • Almacenamiento inicial en el estanque 2 (z_2)
Clima	VARIABLES DE ENTRADA	<ul style="list-style-type: none"> • Series de precipitación • Series de temperatura • Latitud • Humedad relativa (se puede omitir) • Viento (se puede omitir) • Fracción nublada (se puede omitir) • Radiación (se puede omitir) • Albedo de la nieve (se puede omitir)
	Parámetros internos del modelo, sujetos a calibración	<ul style="list-style-type: none"> • Nivel de nieve inicial • Temperatura de fusión de la nieve • Temperatura de derretimiento de la nieve • Albedo de nieve vieja • Albedo de nieve nueva
Afluentes naturales	VARIABLES DE ENTRADA	<ul style="list-style-type: none"> • Series históricas de caudal del afluente perteneciente a la zona de estudio, utilizar para calibración

Si la cuenca de estudio es dividida en N áreas fraccionales o URH que representen los diferentes usos de suelo y suponiendo que el clima es uniforme en cada una de estas URH, la humedad del suelo puede ser descrita por medio de un balance hídrico asociado a cada URH generada, representado en la ecuación (6):

Balde 1:

$$Sw_j \frac{dz_{1,j}}{dt} = P_e(t) - PET(t)k_{c,j}(t) \left(\frac{5z_{1,j} - 2z_{1,j}^2}{3} \right) - P_e(t)z^{RRF_j}_{1,j} - f_j k_{s,j} z_{1,j}^2 - (1 - f_j)k_{s,j} z_{1,j}^2 \quad (6)$$

Donde:

- j : contador asociado a un elemento hidrológico [1 → N].
- Sw_j : capacidad de almacenamiento efectivo total de la zona de raíces [mm].
- $z_{1,j}$: almacenamiento relativo o nivel de humedad en la zona de raíces [1,0].
- P_e : precipitación total, incluye el deshielo de la capa de nieve acumulada y el riego [mm].
- PET : evapotranspiración potencial para un cultivo de referencia (mediante Penman-Monteith) [mm].
- $k_{c,j}$: coeficiente de cultivo asociado a una porción de cobertura de suelo.
- RRF_j : factor de resistencia a la escorrentía, para las distintas coberturas de suelo.
- f_j : dirección preferencial del flujo, estrechamente relacionado con el tipo de suelo, cobertura y topografía del sector, la variación del flujo puede variar de horizontal a vertical.
- $k_{s,j}$: conductividad de la zona de raíces.

La precipitación total del sector viene asociada directamente a la acumulación y derretimiento de nieve (en caso de que el área de estudio este en una zona alta) más la precipitación del paso de tiempo, la cual utiliza parámetros de calibración asociados a la temperatura de congelamiento y derretimiento.

$$P_e(t) = (A_{c,i}(t) + P_{p,i}(t)) \cdot m_c \quad (7)$$

Con:

$$m_c = \begin{cases} 0 & T_i < T_s \\ 1 & T_i > T_l \\ \frac{T_i - T_s}{T_l - T_s} & T_s < T_i < T_l \end{cases}$$

$$A_{c,i} = A_{c,(i-1)} + (1 - m_c)P_i \quad (8)$$

Donde:

- i : contador asociado al mes.
- P_e : aporte de la precipitación más el derretimiento de nieve a la escorrentía [mm].
- A_c : acumulación de nieve a partir de la nieve acumulada del paso de tiempo [mm].
- P_p : precipitación total del paso de tiempo [mm].
- m_c : coeficiente de deshielo.
- T_i : temperatura observada del mes actual [°C].
- T_s : temperatura de congelación [°C].
- T_l : temperatura de fusión [°C].

La evapotranspiración de referencia ET_o es la combinación entre la evaporación ocurrida en la superficie del suelo y la transpiración del cultivo presente en la superficie del suelo asociada. También conocida como evapotranspiración de cultivo ET_c , esta puede ser medida o representada en condiciones estándar o bajo condiciones no estándar (bajo estrés hídrico) (FAO 56, 2006) [25], este estudio basa sus cálculos en la condición estándar.

De acuerdo con el enfoque del coeficiente de cultivo, la evapotranspiración de cultivo puede ser calculada como el producto entre evapotranspiración de referencia ET_o y el coeficiente de cultivo K_c :

$$ET_c = K_c ET_o \quad (9)$$

Donde:

- ET_c : evapotranspiración del cultivo [mm/d].
- K_c : coeficiente del cultivo [adimensional].
- ET_o : evapotranspiración de referencia [mm/d].

La mayor parte de los efectos climáticos ocurridos por los diferentes factores climatológicos están incorporados en la estimación de la ET_o representado un indicador de la demanda climática, el valor de K_c principalmente varía en función de las características específicas del cultivo variando solo en una pequeña porción en función del clima, lo que permite una transferencia de los valores del coeficiente de cultivo entre distintas áreas geográficas y climáticas.

La evapotranspiración de referencia ET_o puede ser definida y calculada por medio de la ecuación de la FAO Penman-Monteith (FAO 56, 2006).

$$ET_o = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34u_2)} \quad (10)$$

Donde:

- R_n : radiación neta en la superficie del cultivo [$\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$].
- R_a : radiación extraterrestre [mm día^{-1}].
- G : flujo de calor de suelo [$\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$].
- T : temperatura media del aire a 2 metros de altura [$^{\circ}\text{C}$].
- u_2 : velocidad del viento a 2 metros de altura [m s^{-1}].
- e_s : presión de vapor de saturación [kPa].
- e_a : presión real de vapor [kPa].
- $e_s - e_a$: déficit de presión de vapor [kPa].
- Δ : pendiente de la curva de presión de vapor [$\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$].
- γ : constante psicométrica [$\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$].

El hecho de conocer y manejar estos valores de ET_o proveen un estándar de comparación mediante el cual se puede comparar la evapotranspiración de diversas regiones o áreas de estudio para un periodo específico del año. También se puede relacionar la evapotranspiración de otros cultivos.

Durante el periodo de crecimiento del cultivo, el coeficiente K_c asociado a cada cultivo varía en función de los cambios en la vegetación (crecimiento y maduración) y en el grado de cobertura del suelo, existen valores tabulados de K_c asociados a estos cambios en la vegetación y porcentaje de cobertura.

Conocidas las principales ecuaciones utilizadas por el método de humedad del suelo, para representar los fenómenos que ocurren en el balde superior se presenta en la Tabla 2.3 los parámetros contenidos en la base conceptual del modelo WEAP. Estos parámetros están sujetos a calibración y validación dependiendo de la

respuesta entregada por el modelo. Es importante mencionar que solo se presentarán los parámetros en base a las consideraciones dichas al principio de este inciso, es decir, sólo se realizará un análisis superficial y no subterráneo.

Tabla 2.3 Principales parámetros de calibración del modelo WEAP, asociados al análisis superficial.

Parámetro	Símbolo	Medida	Descripción
Nivel de humedad en la zona de raíces	z_1 inicial	%	Porcentaje de humedad de suelo del balde 1 con que se inicia la simulación.
Factor de resistencia a la escorrentía	RRF	[ad]	Este parámetro se utiliza para calibrar la respuesta de la escorrentía superficial de un sector específico. Depende directamente de factores como la pendiente y el porcentaje de cobertura del suelo.
Dirección preferencial del flujo	f	[ad]	Se utiliza para diferenciar la dirección del flujo, la cual puede ser horizontal o vertical. Estrechamente relacionado con la topografía del sector, el tipo de suelo y cobertura vegetal.
Coefficiente de cultivo	K_c	[ad]	Coefficiente asociado a un cultivo en específico, utilizado para la obtención de la evapotranspiración de cultivo, varía en función de los cambios sufridos por el cultivo.
Capacidad de almacenamiento efectivo total en la zona de raíces (balde 1)	Sw	[mm]	Capacidad que posee la primera capa de suelo para retener el agua.
Conductividad de la zona de raíces (balde 1)	k_s	[mm/mes]	Conductividad hidráulica del balde 1.

Fuente: Elaboración propia con base en [34].

2.5. Unidades de Respuesta Hidrológica URHs

Los primeros modelos hidrológicos desarrollados consideraban a la cuenca como una unidad cuyo análisis era basado en datos promedio de la cuenca. Si bien el análisis era simple y con un bajo requerimiento de datos, la validez de los resultados obtenidos se reducía a medida que el tamaño de la cuenca era mayor [26]. Esto se debía principalmente a que, a mayores tamaños considerados en el estudio, las configuraciones de ciertos procesos involucrados en la modelación como el tipo de suelo, las características meteorológicas, etc., se volvían cada vez más variables y complejas, por lo que fue necesario dividir la cuenca en áreas con similar comportamiento.

De manera más general, Flügel (1995) [4] propone que las URH se pueden definir como áreas homogéneas en términos de respuesta hidrológica, topografía y climatología. Esta homogeneidad muchas veces se ha malinterpretado, asociando las URH como un sinónimo de subcuenca [26], muy por el contrario, una URH es aquella que está conformada muchas veces por áreas desconectadas entre sí, pero manteniendo propiedades comunes de especial importancia hidrológica.

Si bien algunas de las propiedades mencionadas con anterioridad son indispensables para definir una URH, depende del criterio del modelador definir cuáles propiedades son las que tienen un mayor peso por sobre las otras a la hora de modelar. Principalmente, a la hora de definir una URH se debe verificar que la dinámica de los procesos hidrológicos al interior de una URH debe ser menor que la dinámica de los procesos hidrológicos entre las distintas URH utilizadas.

Flügel (1995) propone un esquema para la generación de estas URH, asociadas a las distintas capas ráster como se muestra en la Figura 2.4.

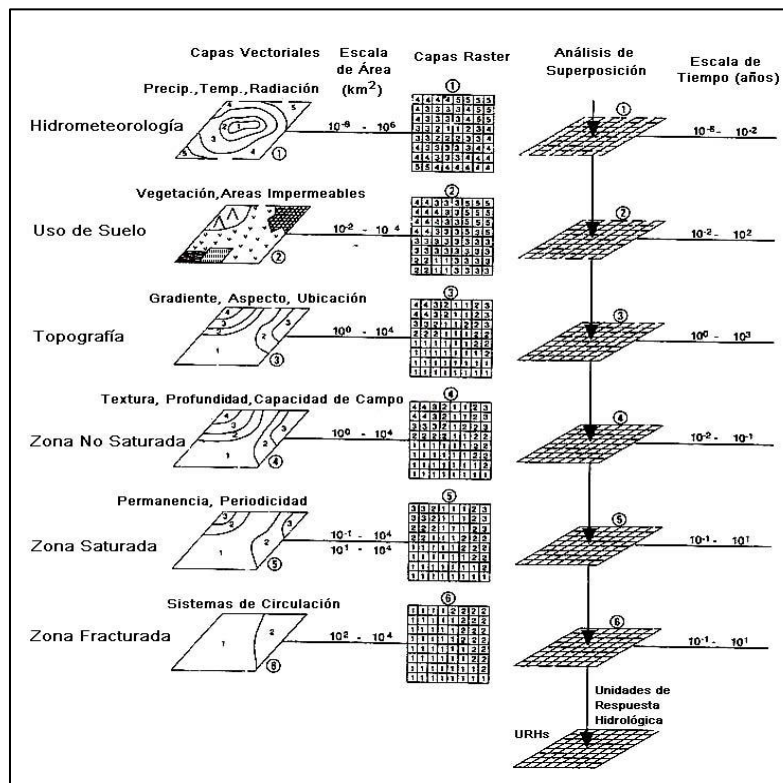


Figura 2.4 - Variables y capas ráster consideradas en la generación de las URH.

Fuente: Flügel (1995) [27].

2.5.1. Factores necesarios para determinar unidades de respuesta hidrológica

Usualmente, muchos hidrólogos a la hora de definir las unidades de respuesta hidrológicas de manera natural tienden a definir las basándose en la topografía del sector. Devito *et al.* (2005) [28], señala que se requiere más que solo un enfoque topográfico para la definición de las URHs, ya que, una correcta delimitación es aquella que involucra en sus alcances conceptos unificadores como el ciclo hidrológico y la conservación de masa. Plantea que esto se debe al uso entusiasta y generalizado de los modelos digitales de elevación DEM y que a su vez este desmesurado uso se ve impulsado por los avances tecnológicos y el bajo costo que conlleva adquirirlos. Sugiere que los hidrólogos deberían determinar qué características o índices principales pueden generalizarse para explicar colectivamente la mayor variación de los procesos hidrológicos preponderantes, y la escala adecuada con la que estos interactúan.

Surgen preguntas como ¿cuáles son las principales características climáticas que deben considerarse a la hora de definir estas URHs? Se debería determinar cuáles son las características más preponderantes del área de estudio, esto principalmente a que no todas las zonas presentan las mismas condiciones climáticas o geomorfológicas, es por ello por lo que se debe establecer cuáles son los factores que representa la mayor variación en los procesos hidrológicos preponderantes sin enmascarar la influencia de los factores que le siguen en un orden inferior.

A continuación, se presenta una clasificación jerárquica para generalizar los factores dominantes en el ciclo del agua y sus índices correspondientes para poder definir las URHs de manera efectiva [28]. Se sugiere seguir el orden especificado, de la A hasta la E, para poder desarrollar un marco conceptual que permita al modelador determinar que componentes son más preponderantes en el ciclo hidrológico y así determinar la escala de interacción correspondiente a considerar en cada caso.

Tabla 2.4 Clasificación jerárquica para generalizar los factores dominantes en el ciclo del agua y los índices para una definición efectiva de las URHs.

Factor	Rango del factor		Escala
A. Clima	Seco, árido a subhúmedo ($P > PET$)	Húmedo, lluvioso ($P > PET$)	Continental a local
	<ul style="list-style-type: none"> Caudal de baja correlación con precipitación Domina el almacenamiento o la absorción Tendencia a flujo vertical 	<ul style="list-style-type: none"> Caudal de alta correlación con precipitación Caudal dominante Tendencia a flujo lateral 	
B. Geología del lecho rocoso	Lecho de roca permeable	Lecho de roca impermeable	Continental a regional
	<ul style="list-style-type: none"> Sistema de flujo intermedio a regional Falta de control topográfico en dirección del flujo local Flujo vertical dominante en la superficie de sustrato 	<ul style="list-style-type: none"> Sistema de flujo de intermedio a local Control topográfico en dirección del flujo local Flujo lateral dominante en la superficie de sustrato 	
	Pendiente del lecho de roca perpendicular a la superficie de tierra	Pendiente del lecho rocoso paralela a la superficie de tierra	
	<ul style="list-style-type: none"> Cuencas hidrográficas con delimitación compleja Acuífero regional con dirección de flujo indeterminado 	<ul style="list-style-type: none"> Cuencas hidrográficas con delimitación sencilla 	

C. Geología superficial	<p>Sustratos profundos</p> <ul style="list-style-type: none"> Flujo regional a intermedio <p>Textura gruesa</p> <ul style="list-style-type: none"> Flujo vertical Flujo subsuperficial profundo <p>Depósitos espacialmente heterogéneos</p> <ul style="list-style-type: none"> Sistema complejo de flujo subterráneo Importancia de la modelación del flujo subterráneo 	<p>Sustratos poco profundos</p> <ul style="list-style-type: none"> Mayor probabilidad de flujo local (requiere comprobar geología del lecho rocoso) <p>Textura fina</p> <ul style="list-style-type: none"> Flujo lateral Almacenamiento y flujo subsuperficial poco profundo <p>Depósitos espacialmente homogéneos</p> <ul style="list-style-type: none"> Sistema simplificado de flujo subterráneo Importancia de la modelación del flujo superficial 	Regional a local
D. Tipo de suelo y profundidad	<p>Suelos minerales altos</p> <ul style="list-style-type: none"> Flujo subsuperficial dominante Generación de flujo lento <p>Almacenamiento</p> <ul style="list-style-type: none"> Suelos profundos con gran potencial de almacenamiento de agua <p>Transpiración</p> <ul style="list-style-type: none"> Raíces profundas con acceso al agua almacenada 	<p>Suelos orgánicos bajos</p> <ul style="list-style-type: none"> Flujo de retorno y superficie del flujo dominante Generación de flujo rápido <p>Almacenamiento</p> <ul style="list-style-type: none"> Suelos poco profundos con poco potencial de almacenamiento de agua Bajo rendimiento en suelos orgánicos <p>Transpiración</p> <ul style="list-style-type: none"> Raíces poco profundas con acceso limitado al almacenamiento de agua 	Local a regional
E. Topografía y redes de drenaje	<p>Pendientes suaves</p> <ul style="list-style-type: none"> Redes de drenaje desorganizadas e ineficientes Gran recarga de aguas subterráneas Rendimiento de escorrentía variable 	<p>Pendientes empinadas</p> <ul style="list-style-type: none"> Redes de drenaje organizadas y eficientes Bajo recarga de aguas subterráneas Rendimiento de escorrentía uniforme 	Local a regional

Fuente: elaboración propia con base en [28].

Habiendo identificado los procesos más dominantes para la determinación de las URH, es importante considerar la escala temporal escogida en el análisis, ya que ésta tiene directa relación con las variables involucradas del modelo hidrológico. Por ejemplo, la escorrentía superficial es representativa en escalas temporales cortas, mientras que los flujos subterráneos suelen ser representados en escalas temporales mayores, por lo que se debe tener especial cuidado a la hora de seleccionar la escala temporal para el análisis, ya que puede llevar a subestimar o sobreestimar las respuestas obtenidas del modelo.

2.6. Método PCA/HCPC

2.6.1. Análisis de las Componentes Principales (PCA)

Este análisis consiste en simplificar la extensión de un espacio muestral con muchas variables perdiendo la menor cantidad de información posible. Se supone un espacio muestral con n individuos cada uno con p variables (dimensiones). El PCA permite encontrar un número de factores s ($s < p$) que puedan explicar de manera cercana lo mismo que las p variables originales del espacio muestral, es decir, si antes se requería de p variables para caracterizar n individuos, ahora se necesitarán s variables para caracterizar la misma cantidad n de individuos, donde cada una de estas s nuevas variables reciben el nombre de componentes principales. No existe un método que indique el número óptimo de componentes principales a utilizar, no obstante, se puede saber con certeza la cantidad máxima. Para el caso de una matriz de datos ($n \times p$), el número máximo de componentes principales será $(n - 1)$ individuos o p (el menor valor de estas dos variables). Sin embargo, existe una forma muy usada para establecer el número de componentes que contengan la mayor cantidad de información posible, consiste en evaluar la proporción de la varianza explicada acumulada y seleccionar el número de componentes mínimo a partir del cual el incremento deja de ser sustancial [29].

A continuación, se detallara mediante un ejemplo sencillo los pasos para calcular las componentes principales de un conjunto de datos expresados por medio de la tabla 2.5:

Tabla 2.5 Tabla para ejemplificación del método en 2 dimensiones

Individuos	Precipitación	Temperatura
1	*	*
2	*	*
...	*	*
n-1	*	*
n	*	*

1. Establecer la matriz de covarianza Σ para el conjunto de parámetros meteorológicos de la tabla, supongamos una matriz arbitraria con los valores al azar:

$$\Sigma = \begin{pmatrix} 9 & 4 \\ 4 & 3 \end{pmatrix}$$

2. Calcular los valores y vectores propios de la matriz de covarianza Σ , donde:
 - *Valor propio dirección x* = {11}
 - *Valor propio dirección y* = {1}
 - *Vector propio dirección x* = $\begin{pmatrix} 2 \\ 1 \end{pmatrix}$
 - *Vector propio dirección y* = $\begin{pmatrix} -1 \\ 2 \end{pmatrix}$
3. El valor propio de mayor magnitud será el que guarde la mayor información. Dicha información será condensada en la dirección del vector propio asociado, es decir:

- *La dirección de la componente principal es x* $\rightarrow \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \end{pmatrix}; \{11\}$

Donde la representación gráfica correspondiente se presenta en la Figura 2.5:

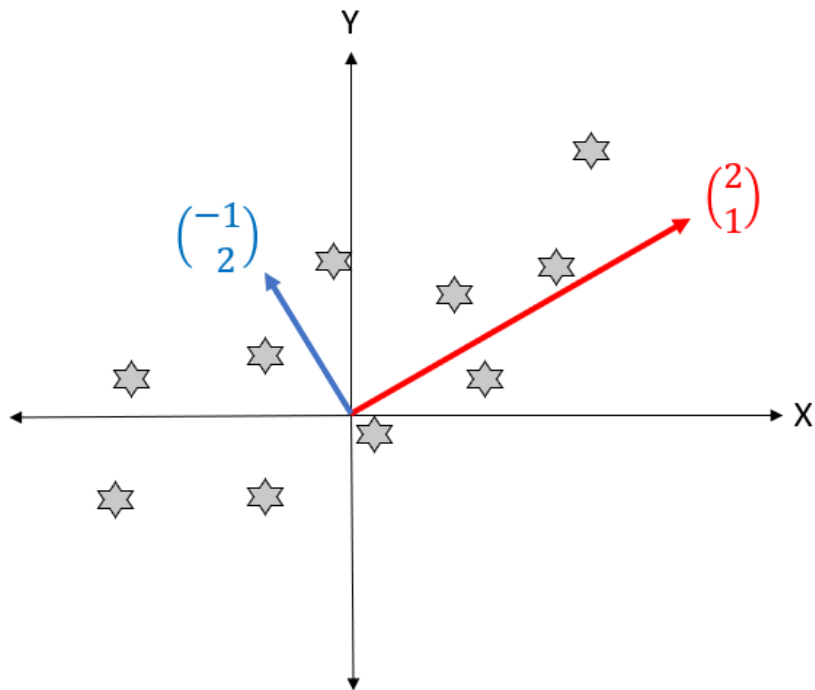


Figura 2.5 - Representación gráfica de las variables meteorológicas en el espacio, las flechas roja y azul corresponden ser los vectores propios.

Luego, la componente principal quedaría representada en una sola dimensión, condensando toda la información (variables) en la proyección del vector propio de mayor magnitud en el espacio, como se muestra en la Figura 2.6:

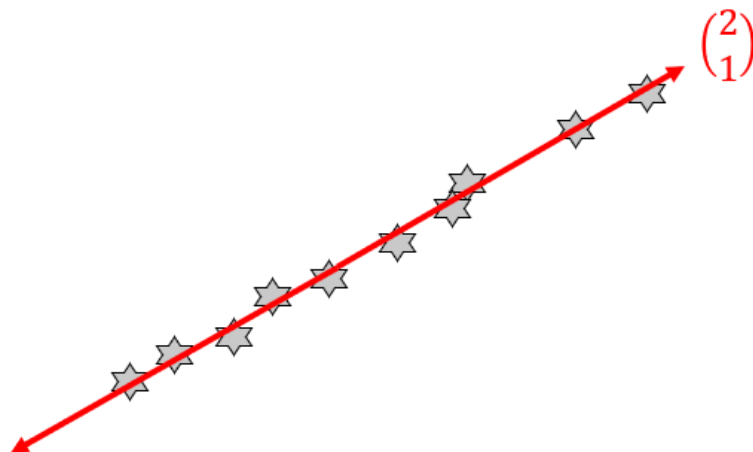


Figura 2.6 - Componente principal en la dirección del vector propio de mayor magnitud.

En otras palabras, el PCA puede ser visto como un método para la eliminación de ruido entendiendo ruido a aquellas variables o datos irrelevantes para cierto análisis conceptual en específico, son aquellas variables con menor peso que pueden ser descartadas fácilmente sin perder precisión en los resultados, centrándose solo en extraer lo esencial de la información de un conjunto de variables y dejando el ruido de lado. Por lo tanto, el PCA es considerado como un paso de procesamiento casi indispensable previo de aplicar métodos de agrupamiento. El número de dimensiones guardadas para la agrupación puede llevarse a cabo mediante varios métodos. Si el número de dimensiones guardadas es muy pequeño, ocurrirá una supresión de información, por lo que es menos problemático especificar un número excesivo de agrupamientos que un número muy pequeño que como resultado conduzca a la pérdida de información.

Esta pérdida o supresión de información hubiese ocurrido si se hubiese seleccionado como componente principal el vector propio de menor magnitud, resultando lo mostrado en la Figura 2.7:

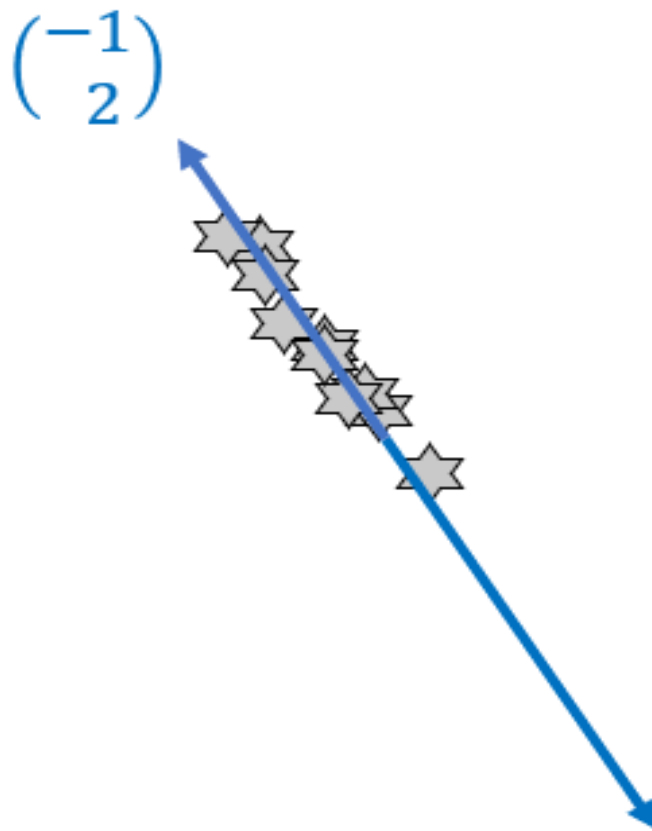


Figura 2.7 - Componente principal en la dirección del vector propio de menor magnitud.

Gráficamente, la aglomeración y superposición en las variables es sinónimo de pérdida de información, por lo cual escoger como componente principal el vector de menor magnitud no sería adecuado.

2.6.2. Análisis de Clúster Jerárquicos

Los métodos jerárquicos tienen por finalidad agrupar clúster para formar otros nuevos o en caso contrario separar alguno ya existente para dar origen a otros dos, de manera que, si sucesivamente se va efectuando este proceso de aglomeración o división, se pueda minimizar las distancias (o maximizarlas) de alguna medida de similitud.

Existen dos tipos de métodos jerárquicos, los aglomerativos y disociativos. Por su parte los aglomerativos comienzan el análisis con tantos grupos como individuos haya, por lo que a partir de estas unidades iniciales se van formando grupos de manera ascendente, hasta que al final del proceso todos los casos están agrupados en un mismo conglomerado. Por el contrario, los métodos disociativos construyen un proceso inverso al anterior. Comienzan con un conglomerado que agrupa todos los casos tratados y, a partir de este conglomerado inicial por medio de divisiones, se van formando grupos cada vez más pequeños, por lo que al final de dicho proceso se tienen tantas agrupaciones como casos tratados (condición inicial del método aglomerativo).

A continuación, se presenta de manera esquemática el procedimiento de un método aglomerativo:

- Primer paso: Se forma un solo grupo.
- Segundo paso: Se alcanza el número de grupos prefijado.
- Tercer paso: Se detecta que hay razones estadísticas para no continuar agrupando clúster, ya que los más similares no son lo suficiente homogéneos como para determinar una misma agrupación.

El dendrograma es un diagrama de árbol que muestra los grupos que se forman al crear conglomerados de observaciones en cada paso y sus niveles de similitud [31]. La Figura 2.8 ilustra de manera sencilla mediante un dendrograma la esquematización del método aglomerativo.

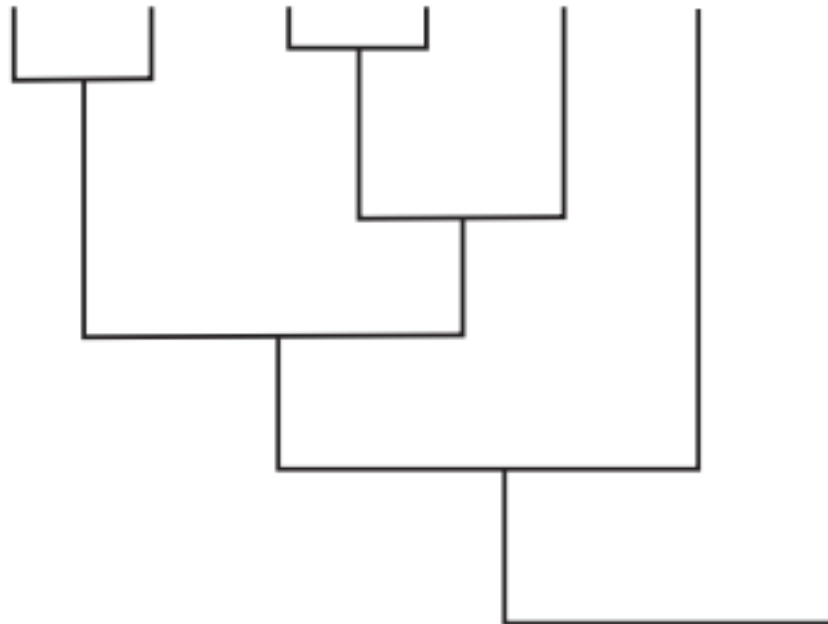


Figura 2.8 - Dendrograma asociado a un método aglomerativo.

Fuente: Gallardo (1994) [30].

El presente trabajo será realizado en base al método jerárquico aglomerativo: este método presenta diversas estrategias las cuales pueden ser empleadas a la hora de unir los clúster en las diversas etapas del procedimiento jerárquico. Es importante señalar que ninguna de estas estrategias (o métodos) proporcionan una solución óptima, muy por el contrario, es posible llegar a distintos resultados según la estrategia (o método) elegida(o).

A continuación, se presentará el método seleccionado para hacer el análisis de conglomerados.

2.6.2.1. Método de Ward

El método de Ward es un criterio aplicado al análisis de clúster jerárquicos que permite descomponer la varianza total, entre y dentro de la varianza de los grupos. Consiste en la agregación de dos grupos con la finalidad de que el crecimiento de la varianza total dentro del grupo sea mínimo, es decir, minimizando la reducción de la varianza total entre los grupos en cada paso del algoritmo. La varianza total dentro de los grupos caracteriza la homogeneidad que posee un grupo. La agrupación jerárquica realizada sobre las componentes principales se representa por medio de un dendrograma que está indexado por la ganancia de la varianza total dentro de los grupos [32].

La varianza total puede descomponerse:

$$\sum_{k=1}^K \sum_{q=1}^Q \sum_{i=1}^{I_q} (X_{iqk} - \bar{X}_k)^2 = \sum_{k=1}^K \sum_{q=1}^Q I_q (\bar{X}_{qk} - \bar{X}_k)^2 + \sum_{k=1}^K \sum_{q=1}^Q \sum_{i=1}^{I_q} (X_{iqk} - \bar{X}_k)^2$$

Varianza total = Varianza entre los grupos + Varianza dentro de los grupos

En donde:

- X_{iqk} : valor de una variable k , para el dato i del clúster q .
- \bar{X}_{qk} : valor de la media de la variable k , del clúster q .
- \bar{X}_k : valor de la media general de la variable k .
- I_q : número de individuos en el grupo o clúster q .

2.6.3. Método HCPC (Hierarchical Clustering on Principal Components)

El enfoque principal del HCPC (en español Agrupamiento Jerárquico en las Componentes Principales) es calcular la agrupación jerárquica en las componentes principales: este enfoque permite combinar los tres métodos estándar utilizados para analizar datos multivariados, estos métodos son:

1. Análisis de las Componentes Principales (PCA).
2. Agrupación Jerárquica (método de Ward).

El algoritmo del método HCPC el cual viene implementado en el paquete FactoMineR [33], puede ser resumido de la siguiente manera:

1. **Calcular las Componentes Principales:** En este paso se debe escoger un número de dimensiones las cuales se conservarán en la salida especificando el argumento NCP.
2. **Calcular los Clúster Jerárquicos:** La agrupación jerárquica se realiza utilizando el criterio de Ward sobre las componentes principales seleccionadas. En la agrupación jerárquica es usado el método Ward porque se basa en la varianza multidimensional como análisis de las componentes principales.
3. **Escoger el número de clúster basados en el árbol jerárquico:** Se hace una partición inicial cortando el árbol jerárquico.

2.6.4. Método PCA/HCPC

Al pasar de los años, diversos autores e investigadores relacionados con el área de la hidrología han centrado esfuerzos en buscar metodologías que permitan determinar URHs de manera sencilla, precisa y sin descuidar los resultados. Poblete *et al.* (2020) [11] mediante un análisis cuantitativo, presentó una metodología para la determinación de URHs no estructuradas, estableciendo como base para esta determinación, la homogeneidad de los parámetros hidrológicos y meteorológicos asociados a una zona. Este método fue llamado “Análisis de las Componentes Principales y Análisis de los Clúster Jerárquicos” o PCA/HCPC¹. Si bien el PCA/HCPC es el resultado de la combinación de dos métodos PCA y HCPC (ver incisos: 2.6.1,2,3), éste tiene como finalidad determinar URH seleccionando la información hidrometeorológica más preponderante de una zona, para posteriormente clasificarla de manera jerárquica y así obtener URH independientes. El resultado obtenido minimiza la variabilidad interna de las propiedades hidrológicas de cada URH, lo que a su vez maximiza la variabilidad entre las diferentes URH y posteriormente de las respuestas hidrológicas de cada elemento.

2.6.4.1. Metodología del PCA/HCPC

Para implementar este método es necesario contar con un conjunto de mapas ráster que contengan los parámetros hidrológicos y las variables meteorológicas utilizados por el modelo hidrológico WEAP. Estos mapas ráster deben ser construidos o generados previamente con base en alguna metodología.

Es necesario establecer los parámetros hidrológicos que se utilizaran en el análisis, como se mencionó en el punto 2.3.3, solo se considera el análisis del balde superior asociado al método de la humedad del suelo, por lo que los parámetros considerados son:

- Sw : capacidad de almacenamiento en la zona de raíces.
- RRF : factor de resistencia a la escorrentía.
- k_s : conductividad hidráulica de la zona de raíces.
- f : dirección preferencial del flujo.

En estricto rigor podrían ser considerados todos los parámetros del modelo, ya sean superficiales o subterráneos, no obstante, por simplicidad para el análisis solo serán considerados aquellos parámetros que representan el comportamiento superficial, por lo cual todos los parámetros correspondientes al análisis subterráneo no serán tomados en cuenta para el desarrollo de este trabajo.

2.6.4.2. Metodologías y antecedentes para la determinación de parámetros del modelo WEAP

Parte importante de la modelación en WEAP recae en la calibración del modelo planteado sobre la base de un conjunto de parámetros hidrológicos que permitan obtener una representación de caudales que interpreten de la forma más cercana posible los datos históricos del sector [34]. Para explicar esto se presentará como otros estudios han determinado estos parámetros y con base en qué condiciones o suposiciones los han establecido.

Figueroa (2017) [35] modelando la cuenca del río La Ligua realizó su calibración a base de modelos hidrológicos con características geomorfológicas similares, con la intención de tener una condición inicial en sus primeros valores de calibración, para posteriormente ir calibrándolos de manera manual.

Cortés (2010) [36] modelando la cuenca del río Juncal realizó su calibración teniendo en cuenta el hecho de que hay altas pendientes en la cuenca, es decir, zonas con mayor y menor profundidad de suelo o capacidades de almacenamiento, tratando de mantener relaciones que fueran consistentes con la realidad, concluyendo que las zonas bajas tuviesen mayor capacidad de almacenamiento que las zonas altas.

¹ PCA/HCPC, en inglés: Principal Component Analysis / Hierarchical Clustering on Principal Components.

Morales (2016) [20] llevó a cabo su proceso de calibración de manera manual, mediante el concepto de prueba y error, basando la elección en un criterio de bondad de ajuste e inspección visual, utilizando periodos de tiempo establecidos que mantuviesen información continua en el plazo establecido.

El Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile y Stockholm Environment Institute (2009) [34] propone estrategias para ajustar caudales picos y bases. Señalan que, si se busca aumentar la respuesta de caudales pico, es necesario ajustar la escorrentía superficial la cual es directamente afectada por el RRF y K_s , afectando la reactividad de las URH. Por otra parte, si se desea ajustar los caudales base se debe ajustar f y K_d . Estas relaciones son no lineales, provocando que la modificación de un término afecte al resto de forma indirecta.

Como estos estudios muchos otros presentan diversas estrategias para la obtención de los parámetros de calibración de manera acotada con la finalidad de obtener las menores discrepancias posibles, a continuación, se presentaran los parámetros de calibración utilizados por diversos estudios para el modelo WEAP mediante el método de humedad del suelo (soil moisture), como se muestra en la Figura 2.6:

Tabla 2.6 Parámetros de calibración para del modelo WEAP utilizados por diversos autores y estudios.

Variable		Autor							
		Figueroa: Cuenca del río La Ligua	Cortés: Cuenca del río Juncal	Chávez: Cuenca del río Upeo	Salgado: Cuenca del río Claro	Reyes: Cuenca del río Tinguiririca	Poblete: Cuenca del río Alicahue	PEGH: Cuenca Ligua-Petorca	PEGH: Cuenca Quilimarí
Escala temporal		Mensual	Mensual y diaria	Diaria	Mensual	Diaria	Mensual	Semanal	Semanal
k_c	[-]	0 - 0.12	-	-	0 - 0.9	-	0.3 - 1	0.2 - 3	1.2 - 12
RRF	[-]	1 - 4.5	-	1.2 - 5.2	0.5 - 6	0.8	0.2 - 2	1 - 1.5	1.2 - 1.8
f	[-]	0.05 - 0.5	-	0.8 - 0.9	0.05 - 0.94	0 - 1	0 - 1	0.3 - 1	0.12 - 0.3
s_w	[mm]	0 - 2000	1000 - 15000	290 - 2700	2080	1100 - 5000	80 - 150	100 - 800	20 - 160
K_s	[mm/mes]	0 - 4000	80000	250 - 350	2700 - 14000	4500	300 - 900	50 - 500	27 - 1500
z_1	[%]	5 - 25	-	50	1 - 32	1	-	-	5
T_1	[°C]	4 - 13	1	5.5	10	16	2.7	10	5
T_2	[°C]	-3 - 4	-1	-2	1	2	-5	7.5	-1

Fuente: elaboración propia con base en [11],[35],[36],[37],[38],[39].

Es importante señalar que los rangos de parámetros obtenidos por los diversos autores y estudios no tienen relación entre ellos, si bien puede que hayan tomado consideraciones similares para su calibración (como alturas, pendientes, tipos de suelo o escalas temporales) no necesariamente tienen que asimilarse unos con los otros.

2.7. Balance Hídrico Nacional (BHN)

El balance hídrico nacional desarrollado en el periodo comprendido entre 1983 y 1987 consistía en un completo estudio realizado por la Red Hidrometeorológica Nacional, con la finalidad de determinar las forzantes meteorológicas de precipitación y evapotranspiración, como también la escorrentía de forma distribuida por el territorio de Chile.

Al pasar de los años, con la llegada de nuevas tecnologías y el constante crecimiento de la red hidrometeorológica nacional, contando con mayor cantidad de datos registrados, zonas monitoreadas y nuevas variables observadas tanto en terreno como de manera se actualiza del balance hídrico nacional en 2017, como respuesta a la necesidad de incorporar 30 años de nuevos registros y fuentes de información, con la finalidad de poder cuantificar la disponibilidad de los recursos hídricos de Chile.

Este estudio se utiliza como línea base de cualquier estudio hidrológico, así como proyectos de consultoría a nivel nacional, teniendo una metodología uniforme y variable la cual permita incorporar procesos físicos con la finalidad de obtener un producto robusto [12].

Una de las principales ventajas que brinda este extenso estudio es la entrega de recomendaciones sobre diversas decisiones vitales a la hora de modelar una cuenca hidrológica, las recomendaciones están orientadas:

- En cuanto a las precipitaciones.
- En cuanto a las temperaturas.
- Respecto al enfoque estadístico.
- Modelación hidrológica.
- Evapotranspiración.
- Recarga del acuífero.

2.7.1. Fuentes de información del Balance Hídrico Nacional

El balance hídrico se puede resumir como la diferencia entre la oferta y la demanda hídrica de un sector en específico, esta diferencia puede ser traducida en términos de escorrentía, y puede ser descrita mediante la ecuación [11]:

$$P + Q_i - Q_o - R - E - T = \Delta V_{sup} + \Delta V_{sub} + \Delta V_h + \Delta H_{suelo} \quad (11)$$

Donde:

- P : precipitación total caída en un periodo de tiempo.
- Q_i : caudal de ingreso, puede ser superficial, subterráneo o ambos.
- Q_o : caudal de salida, puede ser superficial, subterráneo o ambos.
- R : precipitación retenida por la vegetación.
- E : evaporación de superficies con presencia de agua.
- T : transpiración del cultivo del sector.
- ΔV_{sup} , ΔV_{sub} : volumen almacenado de manera superficial (ríos, lagos, etc.) o subterránea (acuíferos subterráneos, ríos subterráneos, etc.)
- ΔV_h : volumen almacenado por hielos eternos o glaciaciones.
- ΔH_{suelo} : humedad contenida en el suelo.

Es por ello por lo que, para la determinación los distintos componentes presentes en el balance hídrico, se consideraron tres fuentes de información:

1. **Observaciones puntuales (in situ)**: son aquellas mediciones las cuales incluyen la determinación de parámetros que, debido a sus características, deben ser medidas en campo, es decir que poseen una

estructura física de medición permanente o eventual en el territorio nacional. Especialmente los distintos procesos físicos relacionados con el balance hídrico se diferencian en cuatro grandes grupos:

- I. Mediciones hidrometeorológicas:** son todas aquellas variables que permiten cuantificar las forzantes meteorológicas del balance hídrico y los caudales pertenecientes a una cuenca.
 - II. Mediciones de aguas subterráneas:** para ello es preciso conocer los niveles piezométricos en los pozos, ya que son la principal fuente de información de los sistemas de aguas subterráneas [12], es por ello por lo que el monitoreo piezométrico es vital para la validación de los datos medidos.
 - III. Mediciones en nieve y glaciares:** es preciso conocer la acumulación de la nieve y sus propiedades, ya que estas se encuentran en constante variación, dependiendo del periodo de acumulación y derretimiento, como la edad del manto nival. Para el balance hídrico existen mediciones de profundidad como de equivalente en agua de nieve (pasando por la densidad). Con respecto a los monitoreos de glaciares, estos se llevan a cabo mediante instalaciones meteorológicas y/o balizas para medir la meteorología y el derretimiento de estos mismos.
 - IV. Información de infraestructura:** para una correcta determinación del balance hídrico de una cuenca, es necesario catastrar la infraestructura hidráulica que éstas poseen, por ejemplo, lagunas y embalses existentes, sobre todo aquellas infraestructuras que modifican el régimen natural de los ríos.
2. **Percepción Remota:** completamente opuesta a las observaciones in situ, la percepción remota es definida como la obtención de la información disponible de un lugar o zona geográfica, sin necesidad de ir al sitio para la obtención de información. Para llevar a cabo este tipo de obtención de información suelen utilizarse satélites, aviones y radares. Para aquellas zonas que abarquen grandes extensiones geográficas, suelen realizarse mediciones de tipo satelital, los cuales miden distintas partes del espectro electromagnético y traducen la información reflejada.
 3. **Reanálisis Climático:** el reanálisis climático es un producto obtenido mediante un examen retrospectivo de las observaciones, donde se asimila un conjunto de datos a nivel histórico (con la mayor calidad posible en los datos) incluyendo información terrestre, de boyas, barcos y satélites entre otras, con la finalidad de obtener una descripción lo más fidedigna posible de las ocurrencias climáticas.

2.7.2. Información disponible para la modelación

El presente estudio tomará como base para su modelación los datos que se utilizaron para definir las distintas etapas del Balance Hídrico Nacional. Dentro de esta gran nube de información se encuentran datos vectoriales referenciados como elementos de tipo Shape e información por grillas en formato NetCDF. Con respecto a la información entregada por grillas (NetCDF) ésta contiene información meteorológica (precipitación, temperatura, humedad relativa, etc.) en una grilla de 5x5 [km²], en un rango de datos históricos del 1979 al 2019, también se incluye información sobre los caudales de salida sobre la base del modelo hidrológico VIC (Variable Infiltration Capacity).

2.8. Relaciones geomorfológicas y de parámetros hidrológicos

El método de curva número (CN) desarrollado por el Soil Conservation Service (SCS)² es un modelo conceptual de pérdida de precipitación, cuyo objetivo es calcular la precipitación efectiva o la escorrentía generada por una tormenta [45]. El modelo cuenta con dos hipótesis principales, la primera, que explica que la escorrentía comienza cuando se satisface el umbral de pérdidas iniciales y la segunda, una vez superado el umbral de escorrentía la relación entre la retención efectiva de la precipitación y la retención potencial es igual a la relación entre la escorrentía efectiva y potencial. De lo descrito anteriormente se establecen las siguientes relaciones:

$$\frac{F_a}{S} = \frac{P_e}{P - I_a} \quad (12)$$

$$P = P_e + I_a + F_a \quad (13)$$

Donde:

- F_a : es la pérdida efectiva (después de iniciada la escorrentía).
- S : retención potencial (después de iniciada la escorrentía).
- P_e : precipitación efectiva.
- P : precipitación total.
- I_a : pérdidas iniciales (umbral de escorrentía).

Resolviendo las dos ecuaciones anteriores se tiene:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad (14)$$

Donde las pérdidas iniciales (I_a) pueden ser definidas como:

$$I_a = \lambda \cdot S \quad (15)$$

Donde λ adopta un valor de 0.2 en base a mediciones en cuencas experimentales, por lo que la precipitación efectiva queda definida como:

$$\begin{cases} P_e = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} & \text{si } P < 0.2S \\ P_e = 0 & \text{si } P \leq 0.2S \end{cases}$$

Por lo que el parámetro de curva número (CN) planteado por el SCS queda definido por la ecuación (16):

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (16)$$

² Actualmente Natural Resources Conservation Service (NRCS)

Una de las principales ventajas de este método recae en su simplicidad, ya que realiza el cálculo de la precipitación efectiva en base a un único parámetro CN (que va de 1 a 100, valor que es directamente proporcional a la tasa de escorrentía), el cual va variando en función del uso del terreno como se muestra en la Tabla [2.7], su tratamiento y cubierta vegetal. No obstante, este método fue desarrollado utilizando datos locales del tipo de cobertura terrestre de los Estados Unidos lo cual acota su uso directo (internacionalmente), ya que se requiere de estudios de las coberturas locales para su aplicación internacional, sumado a lo anterior el método está enfocado para el análisis en pequeñas cuencas (menores a 10 acres), de carácter agrícola (preferencialmente) y no está enfocado para efectuar un análisis en zona de pastizales ni mucho menos en cuencas de tipo forestales o heterogéneas, ya que los resultados que entrega el método son de carácter pobre bajo estas condiciones, López (2001) [45].

Para complementar estas falencias y volver el método más aplicable a las distintas características presentes en una cuenca Savvidou *et al.* (2018) [46] realiza un procedimiento basado en GIS para generar un mapa del parámetro de CN. Principalmente, el enfoque se basa en la combinación lineal de tres mapas ráster asociados a los tres indicadores de las características fisiográficas (distribuidas en cinco niveles) de la zona. La clase de permeabilidad (*iP*, asociada al tipo de suelo), la clase de densidad de vegetación (*iV*, asociada a la cobertura vegetal) y la clase de capacidad de drenaje (*iS*, asociada a las pendientes). El detalle de cada clase se presenta en la Tabla 2.7 a continuación:

Tabla 2.7 Codificación de las características fisiográficas para la estimación de CN para condiciones de referencia (humedad del suelo Tipo II y radio de extracción inicial 20%).

Clase de permeabilidad	<i>iP</i>	Clase de vegetación	<i>iV</i>	Clase de capacidad de drenaje	<i>iS</i>
Muy alto	1	Denso	1	Despreciable	1
Elevado	2	Moderado	2	Bajo	2
Moderado	3	Bajo	3	Moderado	3
Bajo	4	Escaso	4	Elevado	4
Muy bajo	5	Despreciable	5	Muy alto	5

Fuente: Adaptado de [46].

Basados en los valores característicos presentados en la Tabla 2.7, Savvidou propone la siguiente relación empírica, para estimar el valor representativo de CN:

$$CN = 10 + 9iP + 6iV + 3iS \quad (17)$$

Donde:

- *iP*: clase de permeabilidad asociado al tipo de suelo [1 a 5].
- *iV*: clase de vegetación asociado al tipo de cobertura vegetal [1 a 5].
- *iS*: clase de drenaje asociado al tipo de pendiente y topografía [1 a 5].

Según la ecuación anterior, CN puede llegar a tener un valor mínimo de 28 y un máximo de 100. Donde el mínimo representaría un caso extremo de áreas con permeabilidad muy alta, vegetación densa y una capacidad de drenaje muy baja (insignificante), mientras que para un valor máximo de CN igual a 100, por definición se aplica a áreas cubiertas por cuerpos de agua (ríos, lagos, lagunas, etc.), dando como resultado que toda la precipitación se convierte en escorrentía.

Para la estimación de cada una de las clases fisiográficas (iP, iV e iS) contenidas en la ecuación de CN será necesario contar con información referente a la zona de estudio, principalmente se requiere contar con:

Tipo de suelo (geología): será utilizado el Mapa Geológico de Chile [47] elaborado por el SERNAGEOMIN en el año 2002 y corregido en el año 2010, siendo esta última la versión para utilizar. Este mapa se encuentra en formato vectorial (tipo Shape) y contiene toda la información litológica a lo largo de todo el territorio nacional, para efectos prácticos en la Figura 2.9 se presentará el mapa recortado la zona de estudio correspondiente a Ligua-Petorca, el recorte del mapa fue realizado mediante procesos internos en QGIS.

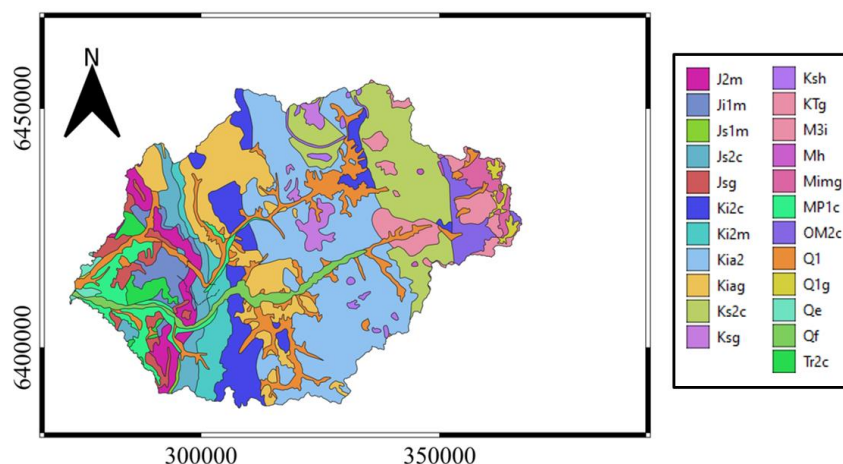


Figura 2.9 - Mapa geológico acotado al sector de las cuencas de Ligua-Petorca.

Fuente: elaboración propia con base en [47].

Para la clasificación del Mapa Geológico de Chile se utilizó la carta geológica Quillota-Portillo [48], la cual contiene en detalle el tipo de estrato correspondiente a cada delimitación.

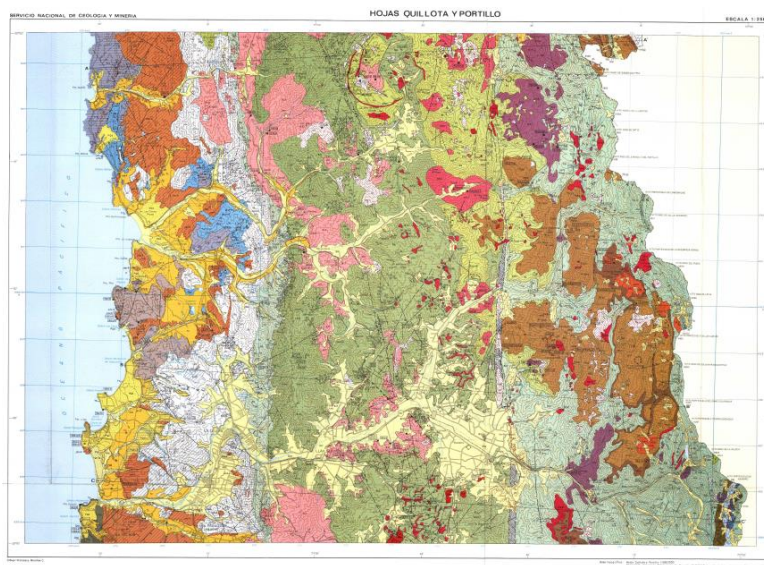


Figura 2.10 - Carta Geológica Quillota-Portillo.

Fuente: [48].

Cobertura vegetal y densidad: Zhao et al. (2016) [14] produjeron un mapa en formato ráster de la cobertura vegetal para todo el territorio nacional, a partir de resultados de mapeo multiestacional y una serie de mapas dinámicos estacionales utilizando imágenes de Landsat 8, complementadas con datos del índice de vegetación mejorado de MODIS e imágenes de alta resolución en Google Earth y Shuttle, dando como resultado una clasificación detallada de las clases de cobertura vegetal a lo largo de todo Chile, los tipos de cobertura vegetal y sus niveles correspondientes son presentados a continuación en la Tabla 2.8:

Tabla 2.8 Tipos de cobertura vegetal según [14].

Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
100 tierras de cultivo	110 campos de arroz	
	120 cultivo de invernadero	
	130 otras tierras de cultivo	
	140 huertos	
	150 tierras de cultivo descubiertas / barbecho	
200 bosques	210 natural de hoja ancha	211 primario
		212 secundario
	220 coníferas naturales	221 primario
		222 secundario
	230 naturales mixtos	241 años plantaciones
	240 plantaciones de latifoliadas	242 talas
250 plantaciones de coníferas	251 años plantaciones	
	252 talas	
300 pastizales	310 pastos	
	320 otros pastizales	
	330 praderas marchitas	
400 matorrales	410 matorrales	
	420 arbustos y mosaico de árboles escasos	
	430 suculentas	
	440 plantaciones de arbustos	
	450 matorrales marchitos	
500 humedales	510 marismas	
	520 marismas	
	530 otros humedales	
600 cuerpos de agua	610 lagos	
	620 embalses / estanques	
	630 Ríos	
	640 océano	
800 superficies impermeables		
900 tierras baldías	910 salinas secas	
	920 arenas	
	930 rocas desnudas expuestas	931 rocas
		932 gravas
1000 nieve y hielo	1010 nieve	
	1020 hielo	
1200 nubes		

Fuente: Zhao et al. (2016) [14].

Donde cada nivel representa el tipo de cobertura vegetal desagregada con respecto al nivel anterior. Para el mapeado integrado del nivel 1 la precisión es del 80%, del 73% es la precisión para el nivel 2 (según datos de validación independiente) y del 70% para el nivel 3 [14]. Para efectos prácticos en la Figura 2.11 se presenta el Land Cover Chile, correspondiente a las cuencas de Ligua-Petorca. La manipulación del mapa fue realizada mediante procesos internos en el software QGIS.

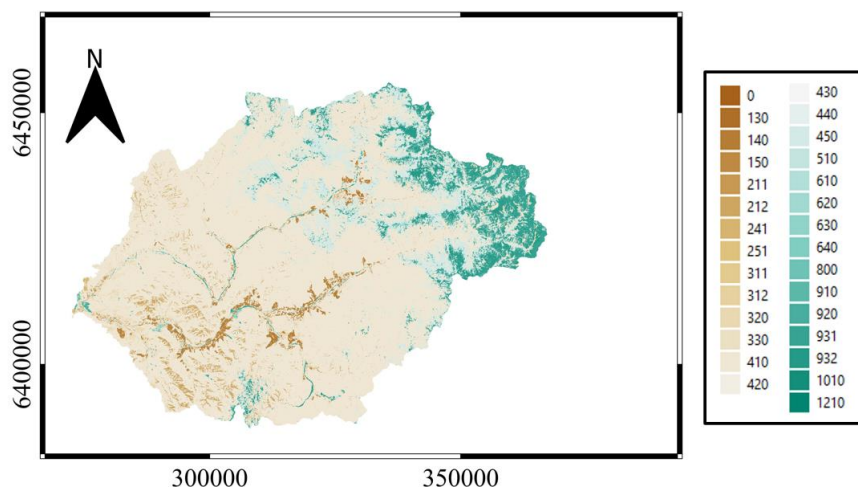


Figura 2.11 - Mapa de la cobertura vegetal de la cuenca Ligua-Petorca. A la derecha se visualiza la paleta de colores correspondiente al tipo de cobertura vegetal definida en la Tabla 2.8.

Fuente: elaboración propia, con base en [14].

Pendiente y topografía: Para determinar las pendientes y elevaciones de la zona de estudio se utilizó la información disponible en la plataforma IDE (Infraestructura de Datos Geospaciales) [42] sobre el DEM de la región de Valparaíso. Este archivo en formato ráster con una resolución de 30 metros proporciona las elevaciones correspondientes de toda la quinta región.

Posteriormente, mediante manipulaciones internas realizadas en QGIS, se obtuvo un mapa de pendientes de toda la Quinta Región, en la Figura 2.12 se muestra el producto final obtenido, correspondiente al mapa de pendientes (en formato ráster) de Ligua-Petorca.

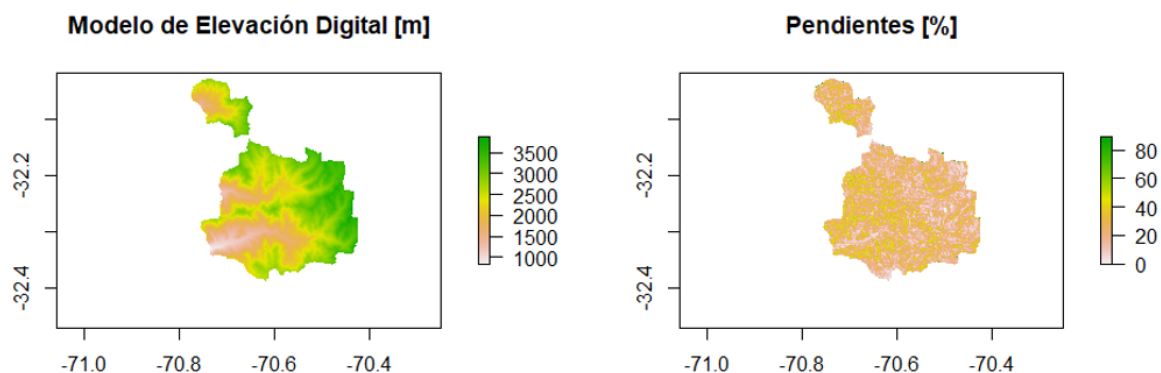


Figura 2.12 - Modelo de elevación digital (DEM) y mapa de pendientes en formato ráster del área de estudio.

Fuente: Elaboración propia con base en [42].

2.9. Planes Estratégicos de Gestión Hídrica PEGH

La DGA-MOP comenzaron a trabajar en el desarrollo de Planes Estratégicos de Gestión Hídrica (PEGH) para las 101 cuencas de Chile. Los primeros 10 PGH correspondientes a las planificaciones 2019-2020 correspondieron a las cuencas de los ríos:

- Copiapó
- Huasco
- Limarí
- Choapa
- Quilimarí
- Ligua (zona del presente estudio)
- Petorca (zona del presente estudio)
- Aconcagua
- Maule.

El objetivo de esta iniciativa es proponer un plan estratégico indicativo para cuencas priorizadas, que considere las particularidades de sus recursos hídricos (7 DGA NOTICIAS, 2020) [41]:

- Conocer la oferta y demanda histórica, actual y potencial de agua.
- Establecer balances hídricos y sus proyecciones a 30 años.
- Diagnosticar la calidad de las aguas subterráneas y superficiales.
- Diagnosticar el estado de información, infraestructura e instituciones que toman decisiones respecto al recurso hídrico.
- Proponer cartera de acciones DGA y de terceros públicos-privados.
 - Suplir la demanda de agua y adaptación al cambio climático.
 - Un portafolio de acciones que aseguren la sustentabilidad en cantidad y calidad.
 - Mejorar la gestión y gobernanza de las aguas a nivel de cuencas.

Los PEGH realizados por la DGA se contrastan con la demanda proyectada del agua calculada por el balance hídrico nacional en 2017, por lo que se introdujeron algunos datos relacionados con el agua, de modo de dar contexto a las estrategias y planificaciones de la DGA, como se presenta en las Figuras 2.13 y 2.14:

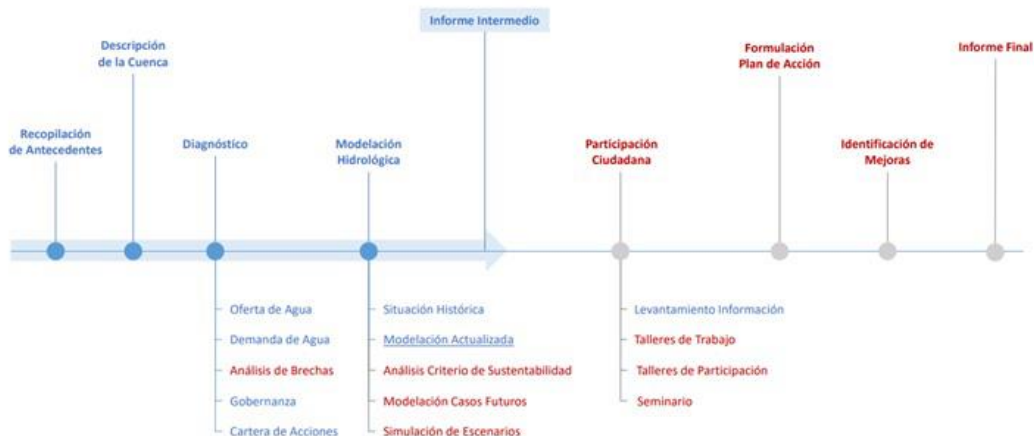


Figura 2.13 - Hoja de trabajo del PEGH.

Fuente: Noticias DGA [41].

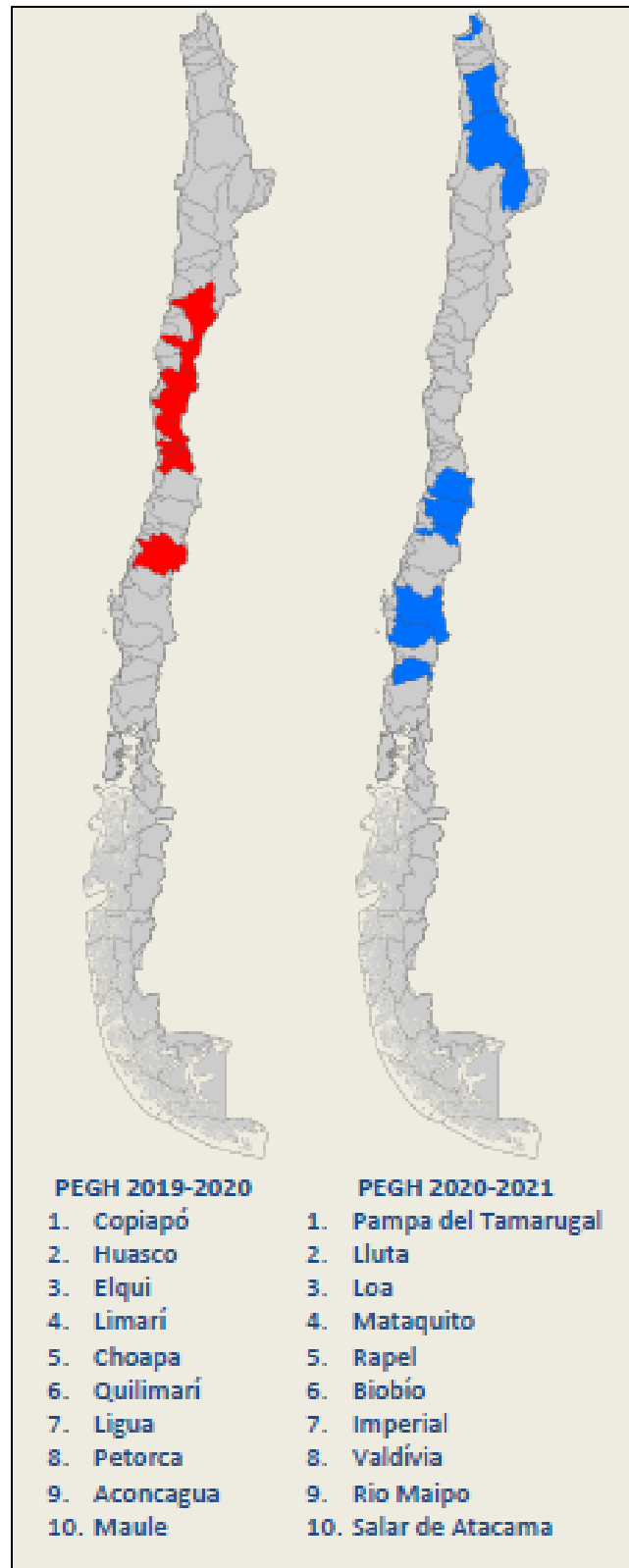


Figura 2.14 - Ubicación geográfica de los Planes Estratégicos de Gestión Hídrica.

Fuente: Noticias DGA [41].

2.10. Procesamiento de datos: R y QGIS

Como se mencionó en la sección anterior, se contará con una gran nube de datos para llevar a cabo los procesos de modelamiento, estos vienen en paquetes con distintos formatos (.shp, .tif, .nc, entre otros) los cuales describen los distintos procesos del ciclo hidrológico para todo el territorio nacional. Para un mejor manejo y procesamiento de esta información se acotaran los datos a la zona de estudio comprendida en la parte alta de Ligua y Petorca. Esta interpretación, acotación, procesamiento y generación de datos será realizada mediante los siguientes softwares:

2.10.1. QGIS

QGIS es un Sistema de Información Geográfica (SIG) de código abierto y gratuito oficial de Open Source Geospatial Foundation (OSGeo), con compatibilidad para los diversos sistemas operativos actuales en el mercado (Windows, Linux, Unix, Mac y Android).

Dentro de sus características principales QGIS ofrece una amplia gama de capacidades dentro de sus funciones básicas y complementos a la hora de manipular datos, de las cuales destacan:

- Visualizar.
- Edición y análisis.
- Diseño y generación de mapas de todo tipo.
- Manejo de formatos vectoriales, Shapefiles, GRASS GIS, DXF, MapInfo, etc.
- Manejo de formatos ráster, GRASS GIS, GeoTIFF, TIFF, JPG, etc.

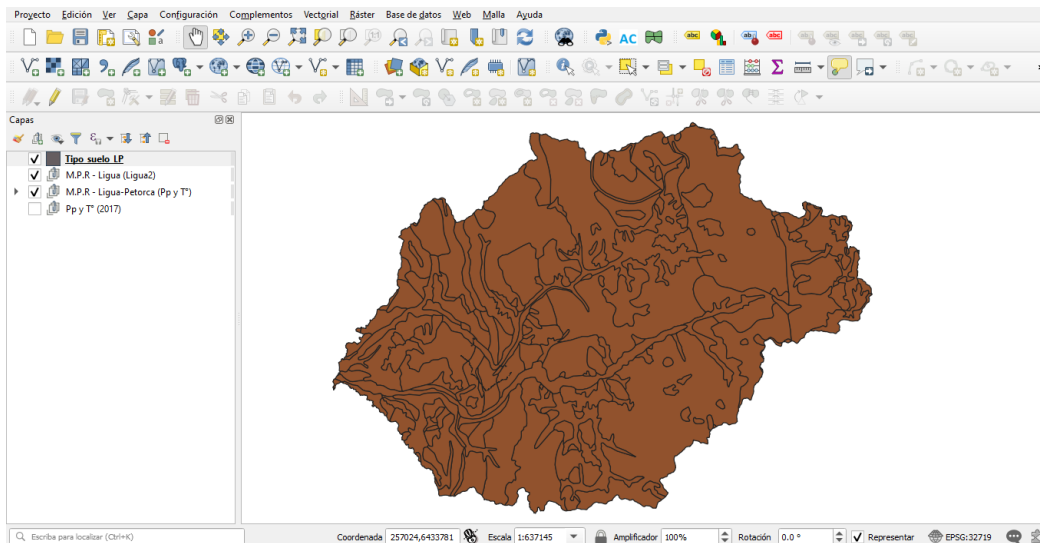


Figura 2.15 - Interfaz principal del Software QGIS en su versión 3.10.

2.10.2. R y su interfaz RStudio

R es un lenguaje de programación que proporciona una amplia variedad de herramientas estadísticas, tales como modelos lineales (o no lineales), análisis de series temporales, test estadísticos, algoritmos de clasificación y agrupamiento entre otros. Al ser un lenguaje de programación, R permite que los usuarios puedan generar sus propias funciones, escribiéndolas en el mismo R o softwares compatibles con este.

RStudio, es un IDE (en español, entorno de desarrollo integrado) para el lenguaje de programación R, el cual incluye una consola de trabajo, editores de sintaxis que validan la ejecución de los códigos integrados de R, como herramientas para la depuración, trazado y gestión del espacio de trabajo, volviendo este lenguaje de programación mucho más amigable y accesible a más público. Su interfaz se puede ver en la Figura 2.16.

Dentro de una amplia variedad de paquetes utilizados por este lenguaje de programación, se destacan los que se utilizaran para el desarrollo de este estudio, los cuales son:

- GISTools, aplicaciones de GIS enfocados en R.
- Ráster, analiza y modela datos geográficos de tipo ráster.
- Ncdf: para gestionar los datos en formato netCDF.
- FactoMineR: análisis de datos multivariados.

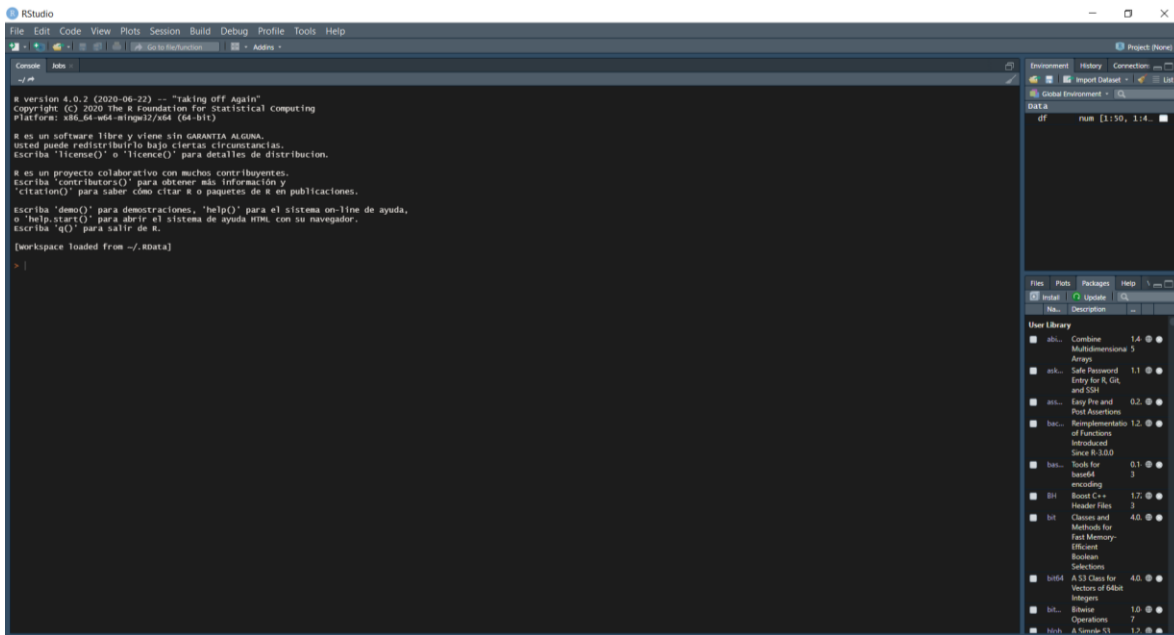


Figura 2.16 - Interfaz principal del software RStudio.

CAPÍTULO III

3. Descripción de la metodología a utilizar

Para la obtención de un modelo simplificado con un bajo costo computacional es necesario poder establecer de manera óptima la cantidad de URH necesarias para definir el modelo. Tomar esta decisión requiere de un análisis previo en donde se deberán detallar algunas directrices. Para el presente estudio, esta delimitación se llevará a cabo mediante la metodología PCA/HCPC, propuesta por Poblete et al. (2020) [11], que tiene como principal objetivo la delimitación de URHs basándose en la homogeneidad de los parámetros hidrológicos y variables meteorológicas utilizadas por el modelo objetivo WEAP.

Para la aplicación del PCA/HCPC es necesario contar con información cuadrículada en formato ráster de las principales variables meteorológicas y parámetros hidrológicos usados por el modelo WEAP. Actualmente, no existen mapas de las variables meteorológicas del sector alto de las cuencas de Ligua-Petorca, no obstante, existen algunas plataformas que disponen de información meteorológica espacializada, entre ellas el BHN. Con respecto a los parámetros hidrológicos, no existe registro alguno o estudios que hayan generado esta información de manera espacializada, ni mucho menos mapas en formato ráster de los mismos. Para ello se adaptará la metodología empleada por Savvidou et al. (2018) [46] para la generación de un mapa del parámetro Curva Número (CN) mediante la combinación lineal de indicadores con base en las características geomorfológicas de la zona ver punto 2.8. Para ello se contempla la creación de ecuaciones que permitan obtener los valores de los parámetros hidrológicos y la aplicación para su espacialización en mapas en formato ráster. Los parámetros hidrológicos en estudio son los correspondientes al balde superior del método de humedad del suelo (soil moisture, WEAP).

3.1. Definición para la obtención de mapas ráster

Como fue anteriormente explicado el método PCA/HCPC utiliza información en formato ráster de los parámetros hidrológicos y variables meteorológicas utilizadas por el modelo hidrológico WEAP. Para el presente trabajo, la generación de estos mapas se llevará a cabo siguiendo una serie de pasos, los cuales son presentados mediante un diagrama de flujo sencillo como se muestra en la Figura 3.1:

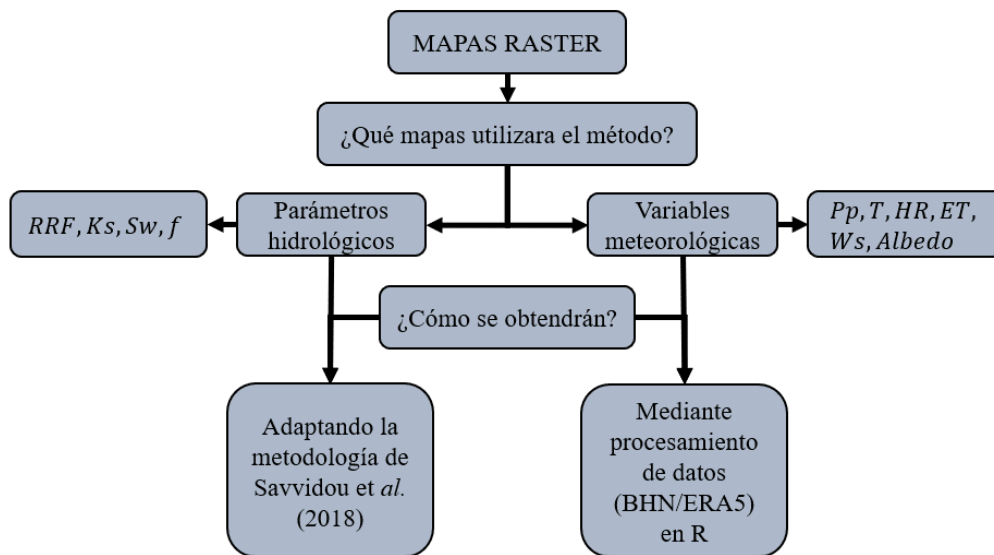


Figura 3.1 - Diagrama de flujo en el cual se detalla de manera generalizada los pasos para la obtención de los principales mapas en formato ráster que será utilizados en el método PCA/HCPC.

3.1.1. Parámetros Hidrológicos utilizados por el método

Los mapas utilizados por el método PCA/HCPC son aquellos correspondientes a los parámetros hidrológicos del método de humedad del suelo (soil moisture) del software WEAP. Este método se compone de dos baldes, con un total de nueve parámetros. Por simplicidad para el estudio solo se usarán cuatro de los nueve, correspondientes al balde superior, estos son la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo Sw (en mm) que representa la profundidad de la capa del suelo, el factor de resistencia a la escorrentía RRF (adimensional) el cual se puede asociar al inverso del clásico coeficiente de escorrentía de la ecuación racional, la conductividad de la zona de raíces Ks (en mm/mes) que se explica como la conductividad hidráulica presente en la capa superior del suelo y la dirección preferencial del flujo f (adimensional), que es la encargada de controlar el agua que fluye desde la capa superior a la capa inferior como percolación profunda (cuando f es uno, el agua fluye horizontalmente y cuando es cero, lo hace de manera vertical). Respecto a lo anterior descrito, la ecuación del balance hídrico, el balde superior y los parámetros que lo conforman se muestran en la ecuación (5).

A continuación, a modo de ilustración se presentan cuatro mapas correspondientes a los parámetros hidrológicos requeridos por el método. Estos mapas fueron elaborados por Poblete et al. (2020) [11] para la aplicación de la misma metodología, PCA/HCPC. Los mapas generados fueron los siguientes:

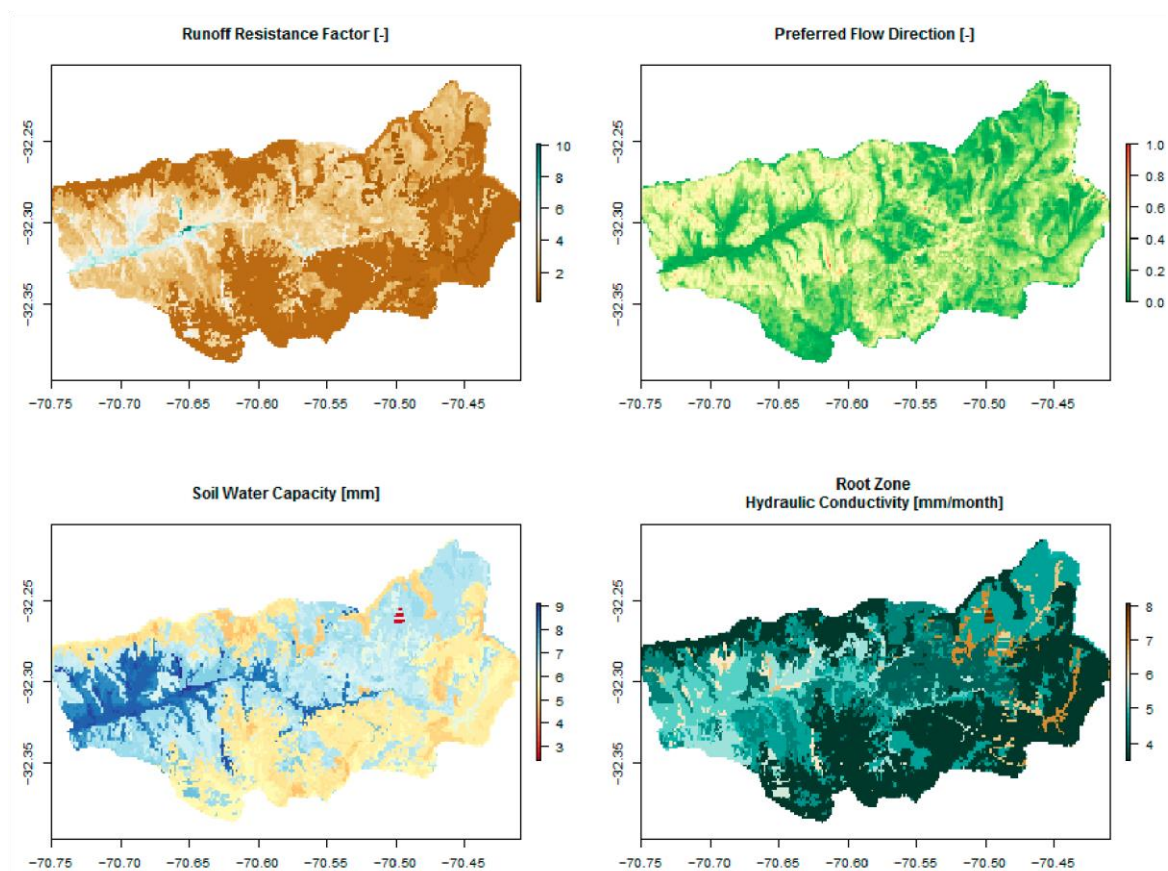


Figura 3.2 - Mapas de parámetros hidrológicos que cubren la cuenca del estero Alicahue para: (arriba a la izquierda) Factor de resistencia a la escorrentía (RRF), (arriba a la derecha) Dirección preferencial del flujo (f), (abajo a la izquierda) Capacidad de almacenamiento de agua en el suelo (Sw) y (abajo a la derecha) Conductividad hidráulica en la zona de raíces (Ks). Sw y K se representan en una escala logarítmica.

Fuente: Poblete et al. (2020) [11].

3.1.2. Variables meteorológicas utilizadas por el método

Es indispensable para la implementación del método PCA/HCPC contar con información meteorológica distribuida a través de la cuenca, precisamente con datos cuadriculados de los registros climáticos [11]. Si bien una cuenca puede contar con una o más estaciones meteorológicas con una gran cantidad de datos registrados, estos conjuntos de observaciones no necesariamente representan de manera fidedigna la verdadera distribución de las variables sobre la zona de estudio. Es por esta razón que se utilizara la información en formato NetCDF, ya que este formato permite obtener datos sobre el conjunto de celdas asociado a la cuenca de estudio para las variables de interés que se deseen obtener, sumado a que se pueden obtener promedios históricos de cada una de las variables para cada celda NetCDF. A continuación, en la Tabla 3.1 se presentan las variables meteorológicas que se utilizaran para la generación de mapas ráster y su fuente de procedencia asociada:

Tabla 3.1 Variables meteorológicas consideradas para la generación de mapas ráster.

Variable	Formato	Procedencia
Precipitación	NetCDF	Balance Hídrico Nacional
Temperatura	NetCDF	Balance Hídrico Nacional
Humedad relativa	NetCDF	ERA5
Evaporación	NetCDF	ERA5
Velocidad del viento	NetCDF	ERA5
Albedo	NetCDF	ERA5

A continuación, en la Figura 3.3 se muestra a modo de ejemplo los mapas en formato ráster de las precipitaciones y temperaturas distribuidas en la cuenca del río Alicahue:

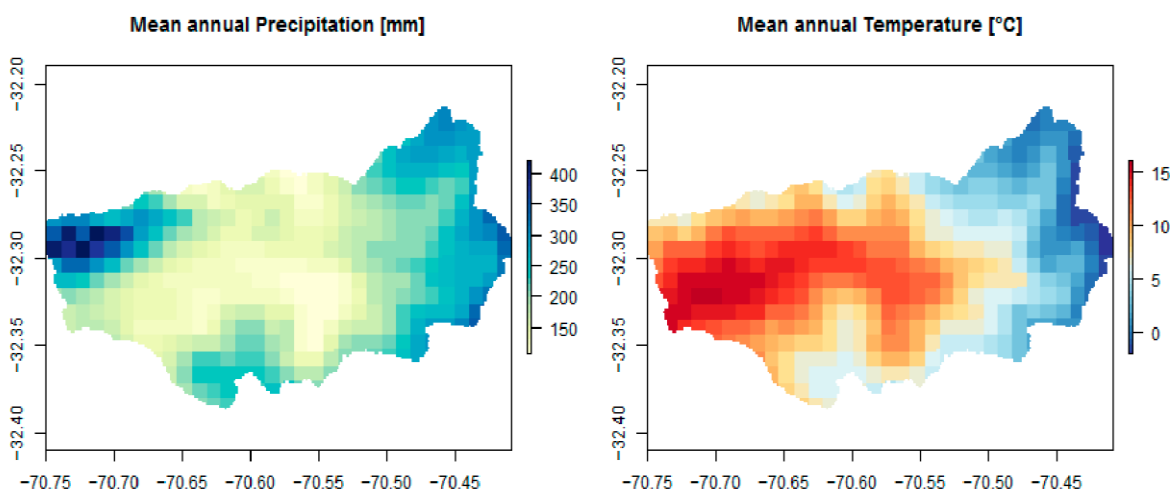


Figura 3.3 - Mapas ráster de la cuenca del río Alicahue, (izquierda) precipitación media anual, (derecha) temperatura media anual.

Fuente: Poblete et al. (2020) [11].

3.2. Definición de los criterios de delineamiento de URH

Como se mencionó en la sección 2.5 solo se consideran las características topográficas al definir las distintas URH que componen una cuenca. No obstante, la mayoría de las veces las URH están conformadas por zonas desconectadas (sin similitudes topográficas) entre sí, pero manteniendo propiedades hidrometeorológicas en común, convirtiendo el delineamiento a base de criterios topográficos en un proceso poco representativo. Con base en lo anterior expuesto y lo planteado por Devito et al. (2005) [10], es que para el presente trabajo se tomara como base para el delineamiento de las URH los siguientes criterios:

- El ciclo hidrológico y la conservación de la masa.
- Identificación de las áreas potencialmente homogéneas en términos de respuesta hidrológicas y características geo-climáticas [26].
- Identificación de los parámetros hidrometeorológicos que incidan de mayor manera en la variación de los procesos hidrológicos.
- Clasificación jerárquica para generalizar los factores dominantes en el ciclo del agua expuestos en la Tabla 2.4 adaptada de Devito et al. (2005) [10].
- Cantidad óptima de URH necesarias para una correcta representación de los procesos hidrológicos de la cuenca.
- No incurrir en excesos de URH para que el modelo no sea lento y sobredimensionado, ni acotar o comprimir la cantidad de URH excesivamente, ya que puede haber pérdidas de información considerables.

En resumen, el presente trabajo se basará en las características hidrometeorológicas para el delineamiento de las URH, identificando las variables con mayor peso dentro del proceso del ciclo hidrológico con la finalidad de que estas sean las que representen el comportamiento del modelo a nivel general sin “enmascarar” aquellas variables que posean una menor representatividad.

3.3. Definición por PCA/HCPC

Mediante la técnica del PCA se procesa el conjunto de datos correspondiente a los mapas de parámetros hidrológicos y variables meteorológicas de la zona de estudio, con el objetivo de disminuir la dimensionalidad del conjunto de datos aumentando su interpretabilidad a un coste de pérdida de información mínima. El análisis de las componentes principales se realiza utilizando la función “PCA ()” del paquete “FactoMineR” [33] del software RStudio, como se presenta en la Figura 3.4:

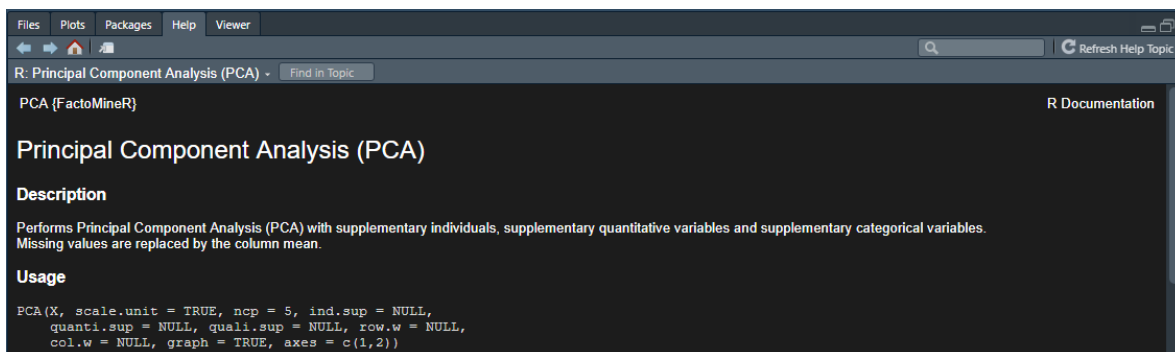


Figura 3.4 - Descripción y uso de la función PCA dentro de la interfaz RStudio.

La función será aplicada al conjunto de mapas en formato ráster correspondiente a las variables meteorológicas y parámetros hidrológicos de la zona de estudio. Esto con la finalidad de parte de la información más importante (componentes principales) de cada variable y parámetro a la vez que se deja de lado el ruido en los datos. Este preprocesamiento es indispensable para capturar la mayor representatividad de cada uno de los mapas generados. Los parámetros y variables a los que será aplicado el PCA, se presentan en la Tabla 3.2:

Tabla 3.2 Variables meteorológicas y parámetros hidrológicos en los que será aplicado un PCA.

Variable/Parámetro	Simbología
Precipitación	P_p
Temperatura	T
Velocidad del viento	w_s
Humedad relativa	HR
Evapotranspiración	ET
Albedo	Al_{Nip}
Factor de resistencia a la escorrentía	RRF
Conductividad en la zona de raíces	K_s
Almacenamiento en la zona de raíces	S_w
Dirección preferencial del flujo	f

Una vez aplicado el PCA sobre el set de datos considerado para el estudio los resultados pueden ser expresados sobre un plano cuyas dimensiones expresan la mayor varianza del conjunto de datos. Esta representación gráfica permite determinar las correlaciones ente las distintas variables consideradas, por ejemplo, con base en el PCA realizado por Poblete et al. (2020) [11] sobre la cuenca del río Alicahue, la precipitación se correlaciona negativamente en la primera dimensión con la temperatura, la evaporación y la radiación neta, como a su vez el RRF se correlaciona positivamente en la segunda dimensión con el almacenamiento en la zona de raíces S_w , tal como se muestra en la Figura 3.5:

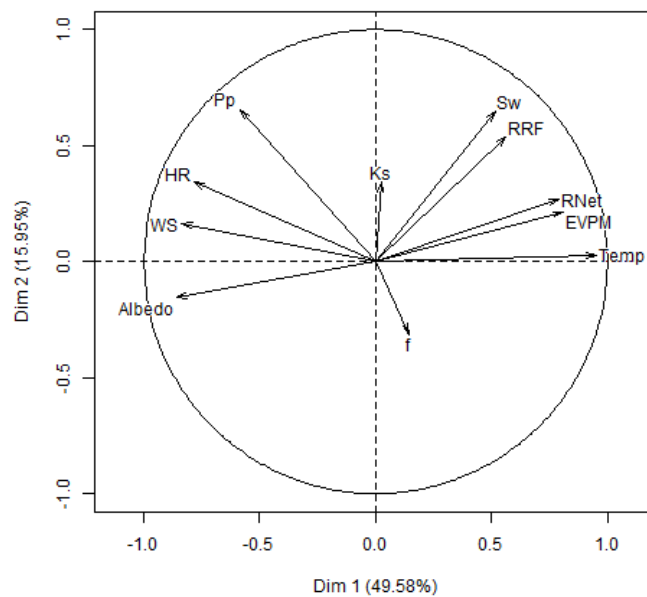


Figura 3.5 - Representación gráfica en dos dimensiones del PCA aplicado al set de datos considerados en el modelamiento realizado en la cuenca del río Alicahue.

Fuente: Poblete et al. (2020) [11].

Obtenidas las componentes principales del “set” de datos se prosigue con el agrupamiento mediante HCPC. Aplicar el HCPC sobre las componentes principales y no sobre los datos originales permite obtener resultados más estables en el proceso de agrupamiento. Esto se debe a que las primeras dimensiones (componentes principales) extraen la mayor parte de la información de los datos originales y las últimas son aquellas que contienen la información menos representativa. Las primeras componentes pueden llegar a representar la mayor parte de la varianza y son estas mismas las que serán utilizadas en el HCPC.

Dentro del mismo paquete “FactoMineR” mediante la función “HCPC ()” se realizará el análisis de clúster jerárquicos. Este agrupamiento internamente se llevará a cabo usando el método de Ward. Su aplicación dentro de la interfaz de RStudio se muestra en la Figura 3.6:

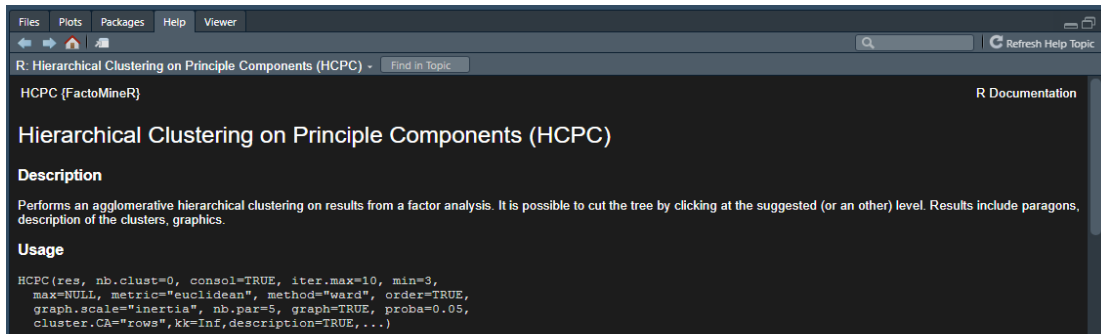


Figura 3.6 - Descripción y uso de la función HCPC dentro de la interfaz RStudio.

A continuación, se presenta una serie de pasos para la implementación del análisis de clúster jerárquicos utilizando la función HCPC del paquete FactoMineR [44]:

Paso 1: Ejecutar el análisis de las componentes principales PCA por medio de la función PCA, es importante definir el número de dimensiones que se deseen priorizar en el análisis. El número de dimensiones se deberá seleccionar mediante la función “NCP” en el PCA (por defecto la función asigna un número de dimensiones de 5).

Paso 2: Realizar el agrupamiento con base en la distancia entre las componentes principales, la función creará un árbol jerárquico (dendrograma) tomando como referencia el número de componentes principales definidos en el paso 1, los últimos ejes se aislarán del dendrograma principal porque se considera como ruido en los datos.

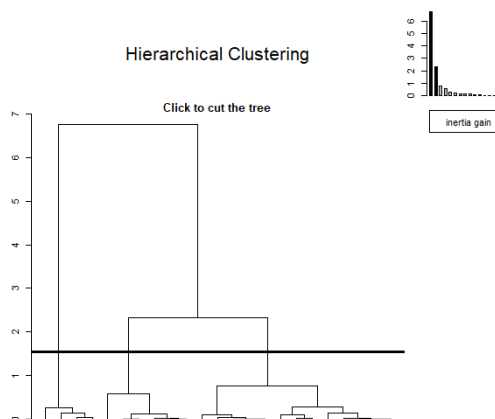


Figura 3.7 - Dendrograma que representa la agrupación jerárquica realizada a un grupo de individuos; la función HCPC señala automáticamente mediante una línea negra continua que la división óptima debe ser de tres grupos.

Fuente: Husson et al. (2010) [44].

Paso 3: Cortar el árbol jerárquico a una altura característica para definir los grupos (clúster). Esto puede ser realizado de manera automática seleccionando con el cursor (dando un clic sobre el dendrograma) donde se quiera cortar, por lo que automáticamente serán entregadas las agrupaciones correspondientes a la altura seleccionada. La Figura 3.7 corresponde al árbol jerárquico previo al corte, una vez hecho el corte, los nuevos grupos generados son los que se muestran en la Figura 3.8.

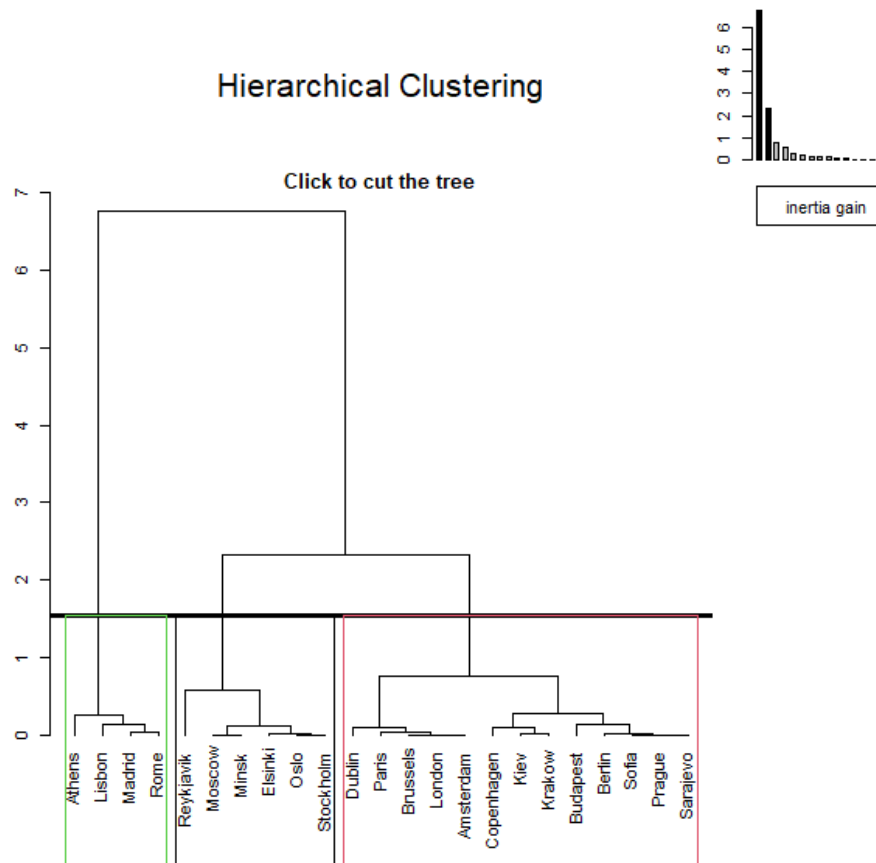


Figura 3.8 - Grupos generados de manera automática por la función HCPC.

Fuente: Husson et al. (2010) [44].

Paso 4 (opcional): Se puede hacer la partición más robusta utilizando K-means.

Paso 5: Definido los clúster en el paso anterior, hay que describir cada clúster utilizando variables cuantitativas o cualitativas con el objetivo de identificar cada grupo.

3.3.1. Número óptimo de URH a utilizar

Cada clúster generado mediante la función HCPC será equivalente a una URH dentro de la modelación, es por ello por lo que se requiere estimar de manera óptima la cantidad de clúster a utilizar con la intención de obtener un modelo liviano y de bajo costo computacional que no sobredimensione los elementos necesarios para la simulación (volviendo pesado el modelo) ni tampoco omita información.

Husson et al. (2010) [44] señala que el número de clúster puede ser seleccionado teniendo en cuenta las reglas del crecimiento de la inercia, las cuales vienen asociadas a la forma del árbol jerárquico generado y al gráfico de barras que indica la ganancia de inercia interior. Estas reglas sugieren una división en clúster Q cuando el aumento de la inercia entre clúster $Q - 1$ y Q es mucho mayor que el del clúster Q y $Q + 1$.

A continuación, se presenta un criterio empírico que permite representar el número óptimo de clúster donde, $\Delta(Q)$ representa el incremento de la inercia entre grupos al pasar de $Q - 1$ a Q clúster:

$$\frac{\Delta(Q)}{\Delta(Q + 1)} \quad (18)$$

Donde el número óptimo de clúster Q es aquel que minimiza la relación anterior.

Es importante señalar que la función HCPC implementa este cálculo después de haber construido el dendrograma y sigue un nivel óptimo de división de manera automática como se indica en la Figura 3.7. Esto resulta provechoso debido a la facilidad de obtener una cantidad óptima de agrupamientos, no obstante, una vez que un elemento ha sido agregado a un grupo (de forma automática) ya no podrá pertenecer a otro grupo, a esto se le conoce como anidamiento y es uno de los principales problemas que puede llegar a presentar esta agrupación automática.

Finalmente, una vez conocida la cantidad óptima de grupos generados “donde cada uno de estos grupos es sinónimo de URH” pueden ser representados en el modelo WEAP.

3.4. Representación de las URH en el modelo WEAP

Cada una de las URH definidas por el método PCA/HCPC pueden ser representadas por medio de la unidad básica que simula un área en el modelo WEAP, estas unidades básicas denominadas “**catchment o unidades hidrológicas**” tienen la finalidad de desagregar información correspondiente a la meteorología, tipo de cobertura vegetal, tipo de suelo, áreas de cultivo, etc. Es importante señalar que cada uno de estos catchment funcionan de manera independiente.

La Guía Metodológica de Modelación Hidrológica y de Recursos Hídricos con el Modelo WEAP [34] señala que cada catchment debe ser delimitado con respecto a puntos de interés hidrológico, es decir donde se desea conocer exactamente el valor del caudal en un momento determinado durante el uso del modelo, ya sea para la calibración o la simulación de escenarios futuros.

Los puntos de interés son:

- Confluencia de ríos.
- Puntos de aforo de caudales (estaciones fluviométricas).
- Reservorios existentes y proyectados.
- Puntos de inicio y de terminación de canales de derivación de agua.

Estos puntos de interés pueden ser fácilmente identificados por medio de herramientas SIG. Para el presente trabajo se utilizó como punto de interés para la delimitación de las URH los puntos de aforo de caudales o estaciones fluviométricas del sector. Estos puntos fueron identificados usando el archivo oficial en formato Shape de las estaciones fluviométricas de todo el territorio nacional, el cual fue acotado al sector de estudio mediante procesos internos en el software QGIS.

A continuación, en la Figura 3.9 se presentan las estaciones fluviométricas identificadas y empleadas para el estudio actual, las cuales contienen a los ríos Pedernal en Tejada, Sobrante en Piñadero y estero Alicahue en Colliguay.

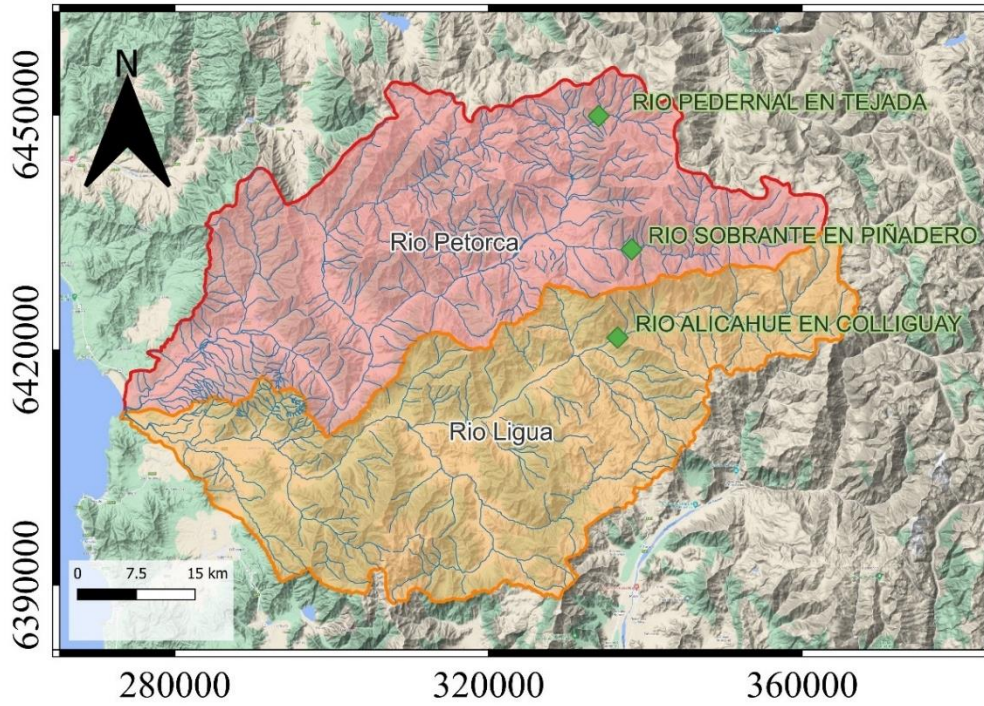


Figura 3.9 - Estaciones fluviométricas (rombos verdes) correspondiente a la parte alta de las cuencas de Ligua-Petorca.

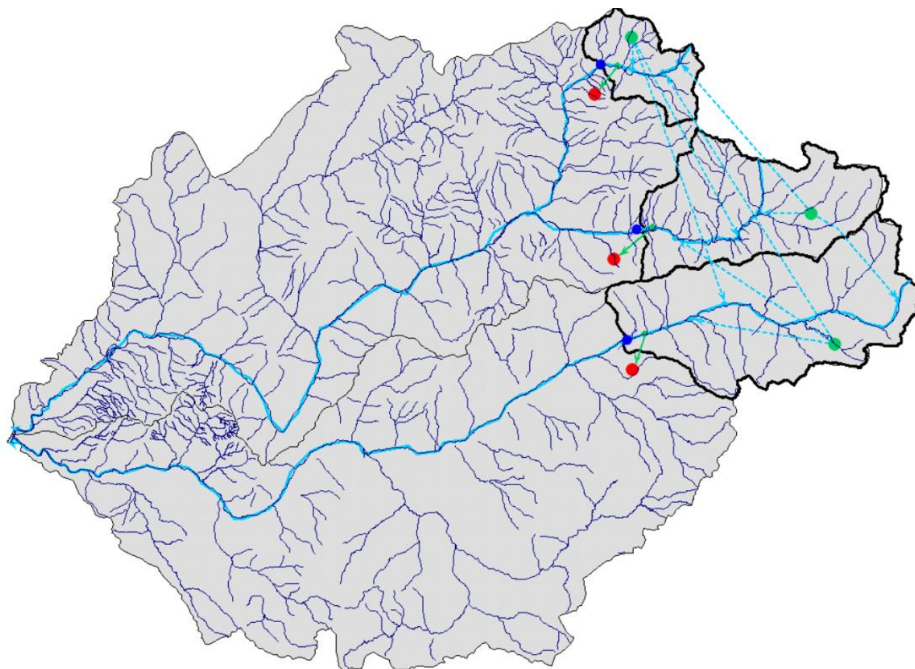


Figura 3.10 - Esquematización de las URH (en verde) y los principales afluentes de la parte alta de las cuencas de Ligua-Petorca en el software WEAP.

Finalmente, es en estos catchment presentados en la Figura 3.10 sobre los cuales WEAP estima parámetros como la evapotranspiración, infiltración, escorrentía superficial, flujo horizontal entre capas, flujo base entre otros.

3.5. Calibración y validación del modelo WEAP

Cuando se calibra un modelo hidrológico en WEAP se busca lograr un set de parámetros hidrológicos que permitan obtener una respuesta de los caudales (simulados) que se asemeje a los datos históricos (observados) de la forma más cercana posible. Para ello es necesario realizar comparaciones entre las series de datos simuladas versus las observadas en puntos de especial interés (estaciones fluviométricas) de la zona de estudio [34]. Posteriormente, para determinar la eficiencia de la respuesta del modelo en comparación con los datos observados en las estaciones fluviométricas será necesario utilizar los indicadores de eficiencia detallados en la sección 2.3.

Uno de los principales objetivos de este estudio recae en la generación de mapas en formato ráster de los principales parámetros hidrológicos usados por el software WEAP. Estos parámetros (correspondientes al balde superior) serán empleados para la calibración del modelo objetivo. En una calibración clásica se varía estos valores de manera manual hasta encontrar un set de datos que permitan ajustar la respuesta del modelo (simulada) asemejándola a la observada en las estaciones fluviométricas. A diferencia de la calibración manual, en el presente estudio dichos valores serán establecidos mediante dos pasos: el primero de ellos consta en la generación de mapas en formato ráster de los parámetros hidrológicos correspondientes al balde superior. El segundo paso corresponde a la aplicación de la metodología PCA/HPCPC sobre los mapas ya creados, en este punto serán extraídos los valores promedios de cada parámetro hidrológico correspondiente a una URH en específico y posteriormente ingresados al modelo hidrológico WEAP.

3.5.1. Ajustes en los parámetros de calibración del modelo

Como primera aproximación para la estimación del set de parámetros serán utilizados valores generales que permitan caracterizar toda el área, los cuales modifican los parámetros de uso de suelo. Como fue mencionado en varias oportunidades, el presente trabajo solo utilizará los parámetros que comprenden el balde superior, principalmente:

- Capacidad de almacenamiento de agua en la zona de raíces, S_w .
- Factor de resistencia a la escorrentía, RRF .
- Conductividad hidráulica en la zona de raíces, K_s .
- Dirección preferencial del flujo, f .

Establecidos los principales parámetros a calibrar, generalmente se debe buscar ajustar los caudales peak y los caudales base, para ello se deberá identificar cuáles son los parámetros que presentan mayor relación con cada respuesta. Por ejemplo, para aumentar la respuesta de los caudales peak simulados por el modelo, se debe ajustar la escorrentía superficial la cual es directamente afectada por el factor de resistencia a la escorrentía (RRF) y la conductividad hidráulica en la zona de raíces (K_s); si se desea modificar los caudales base se debe ajustar la dirección preferencial del flujo (f). Se debe destacar que la relación entre los distintos parámetros de calibración presenta un comportamiento no lineal, provocando que la modificación de un término afecte a otros de manera indirecta. Por ejemplo, si se aumenta la capacidad de almacenamiento en la zona de raíces (S_w), se logra un mayor flujo subsuperficial, y como consecuencia, un aumento de los caudales máximos [36].

Es importante destacar que el proceso de calibración es un proceso iterativo, el cual consiste en variar reiterativamente los parámetros del modelo hasta alcanzar valores óptimos entre las respuestas simuladas y las observadas.

La ventaja del PCA/HPCPC para la delimitación de URH y su posterior calibración recae principalmente en que se parte con un set de parámetros iniciales relativamente cercanos al set de parámetros objetivo. Esto añade una ventaja a la hora de la calibración a diferencia de una calibración manual, donde el punto de partida puede estar muy alejado del set de calibración objetivo, volviendo exhaustivo el proceso manual a diferencia del empleado en el estudio actual.

3.5.2. Verificación mediante indicadores de eficiencia

El proceso iterativo para la configuración de un set de parámetros que expliquen el comportamiento de la cuenca y sus respuestas asociadas no es un proceso completo si posteriormente no es validada la respuesta del modelo a base de indicadores de eficiencia. Estos indicadores principalmente le hacen ver al modelador qué tan bien se ajusta la respuesta simulada (previamente calibrada) a la respuesta observada (en estaciones fluviométricas).

Las respuestas del modelo se validarán utilizando los siguientes indicadores de eficiencia:

- Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE).
- Coeficiente de determinación (R^2).
- Criterio de Kling-Gupta (KGE).

La verificación mediante indicadores de eficiencia se aplicará al modelo hasta conseguir en la respuesta un punto de **no mejora**, lo cual indica que la respuesta no puede seguir siendo mejorada modificando los parámetros de calibración. No obstante, esto no asegura que la respuesta del modelo se considere óptima o se ajuste a los datos observados. El único medio para estimar que tan buena es la respuesta del modelo es inspeccionando visualmente que los rangos de eficiencia de cada criterio se encuentren dentro de valores aceptables.

3.5.3. Estrategias de mejoramiento en las respuestas simuladas en caso de no ser representativas

Tal como se mencionó en la sección anterior, si la verificación de la respuesta del modelo mediante indicadores de eficiencia llega a un punto de no mejora y la respuesta del modelo a la vez no es aceptable, ya no resulta útil seguir modificando el set de parámetros hidrológicos para mejorar la respuesta.

A continuación, en la Figura 3.11 se presenta el proceso iterativo necesario para la obtención de una respuesta hidrológica representativa.

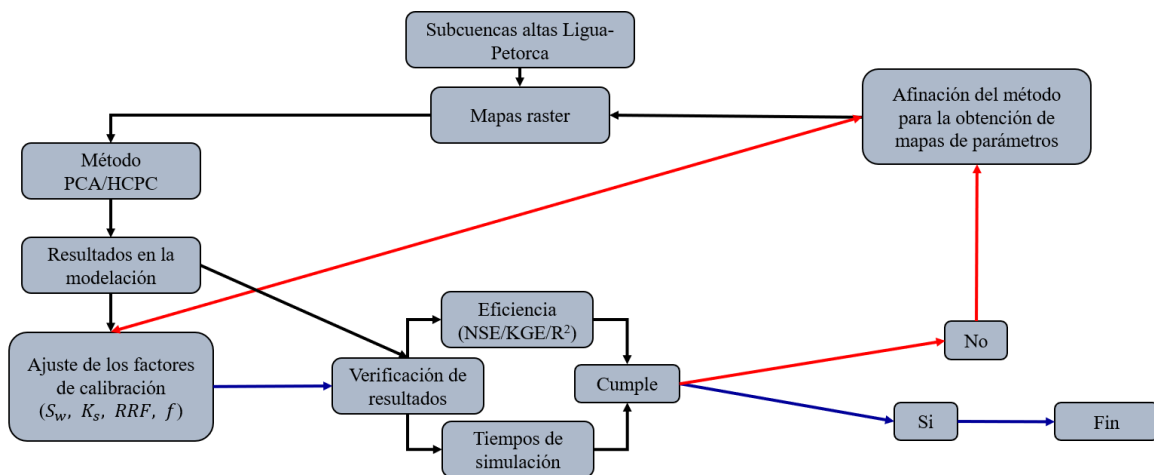


Figura 3.11 - Proceso iterativo para la obtención de una respuesta hidrológica representativa bajo la metodología de generación de mapas ráster y su posterior PCA/HCPC.

En caso de que la respuesta se encuentre en un punto de no mejora se deberá modificar y afinar el método para la obtención de los mapas de parámetros hidrológicos hasta que éstos sean consistentes y entreguen una eficiencia lo suficientemente buena para validar la respuesta. Para ello se deberá volver a generar los mapas ráster de los parámetros hidrológicos (RRF, f, S_w, K_s) a base de nuevos valores ajustados que representen de mejor forma las interacciones entre los distintos parámetros que representan el comportamiento de la zona.

CAPÍTULO IV

4. Recopilación de datos

4.1. Caracterización de la zona de estudio (antecedentes generales)

El dominio del área de estudio comprende las subcuencas de los ríos Pedernal en Tejada, río Sobrante en Piñadero y estero Alicahue en Colliguay. Estas tres subcuencas pequeñas suman un área aproximada de 670 [km²], y se caracterizan por no poseer intervención antrópica (intervención humana prácticamente nula).

Su clima se caracteriza por ser de carácter templado semiárido de temperaturas moderadas. Esto se debe principalmente por su condición de provincia interior, cercana a la precordillera. Algo característico de esta zona son sus microclimas y excelentes condiciones de suelo, lo cual permite una producción agrícola del más alto nivel.

Actualmente, ambas cuencas sufren una grave sequía la cual ha afectado enormemente la agricultura y ganadería del sector. Se cree que la escasez cíclica del recurso se agravó por el sobre otorgamiento de derechos de agua particularmente a mega productores de paltas, trayendo como consecuencia un agotamiento subterráneo y superficial de los recursos hídricos de la zona [47,48].

4.1.1. Ubicación

La zona de estudio comprende la parte alta de las cuencas de La Ligua y Petorca. Ambas cuencas están ubicadas en la Quinta Región de Valparaíso, pertenecientes a la provincia de Petorca y comuna de La Ligua. Se consideran como puntos de salida de las subcuencas, las estaciones fluviométricas mostradas en la Figura 4.1 y detalladas en la Tabla 4.1:

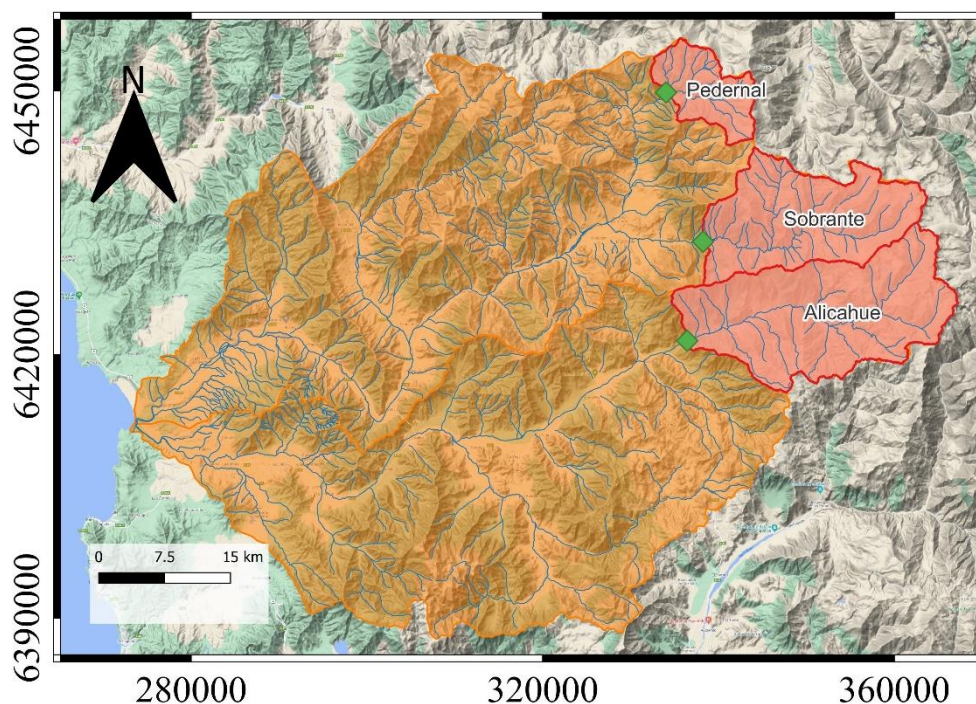


Figura 4.1 - En salmón el contorno correspondiente a las cuencas de La Ligua y Petorca. En rojo las tres subcuencas de la parte alta correspondientes a la zona de estudio. Los rombos verdes representan las estaciones fluviométricas.

Tabla 4.1 Descripción geográfica y estado actual de las estaciones de monitoreo en los puntos de salida de cada subcuenca.

Nombre Estación	Cuenca	Subcuenca	Estado	Latitud	Longitud	Altitud [m.s.n.m]	Área [km²]
Río Pedernal en Tejada	Río Petorca	Río Pedernal	Vigente	-32.2	-70.76	1331	81
Río Sobrante en Piñadero	Río Petorca	Río sobrante	Vigente	-32.23	-70.71	1130	250
Río Alicahue en Colliguay	Río Ligua	Estero Alicahue	Vigente	-32.33	-70.74	831	349

4.1.1. Características morfológicas

El sector oeste de la zona de estudio se inscribe en los cordones transversales y el sector oriente en las sierras transversales del tronco maestro andino. Los terrenos agrícolas están constituidos por terrazas aluviales formadas por sedimentos gruesos (bolones, gravas y arenas) procedentes de la erosión de la cadena andina. La parte más septentrional de la región cubre la vertiente norte de la cuenca de Petorca, cuya divisoria de aguas es el límite regional. El sector se caracteriza por el predominio de cerros cuyas cumbres poseen escasa superficie, excepcionalmente algunos cerros culminan en relieves ondulados, lateralmente limitados por taludes, o laderas de grandes pendientes.

Los valles Petorca y La Ligua tienen su origen en la cordillera andina, poseen un trazado sinuoso, esto principalmente se debe a que dos ejes montañosos lo desvían hacia el sur y luego al norte, produciendo un aumento considerable en la longitud de su recorrido principal. Es un valle relativamente angosto con bordes irregulares y limitado por altos cerros [47,48].

Mediante la utilización del software QGIS, modelos de elevación digital (DEM) y archivos en formato Shape de la zona, fueron obtenidas las elevaciones y las longitudes de cada cauce del área de estudio. En la Tabla 4.2 se presentan las características morfológicas de cada una de las subcuencas, mientras que en la Figura 4.2 se presentan las curvas hipsométricas pertenecientes a cada una de las subcuencas:

Tabla 4.2 Características morfológicas por subcuenca

Nombre Estación	Cuenca	Subcuenca	Altitud máxima [m.s.n.m]	Altitud media [m.s.n.m]	Altitud mínima [m.s.n.m]	Longitud cauce [km]
Río Pedernal en Tejada	Río Petorca	Río Pedernal	3453	2454	673	10.8
Río Sobrante en Piñadero	Río Petorca	Río sobrante	3729	2610	724	29.4
Río Alicahue en Colliguay	Río Ligua	Estero Alicahue	3997	2403	597	34.6

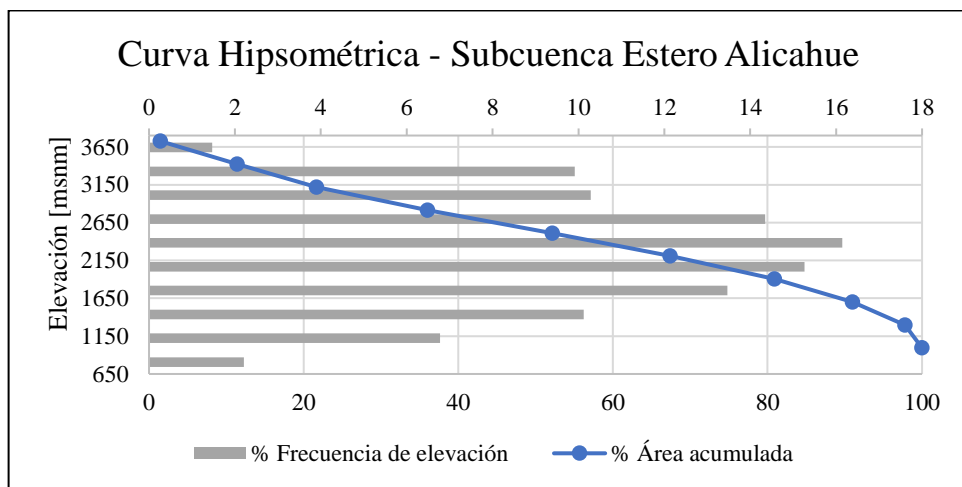
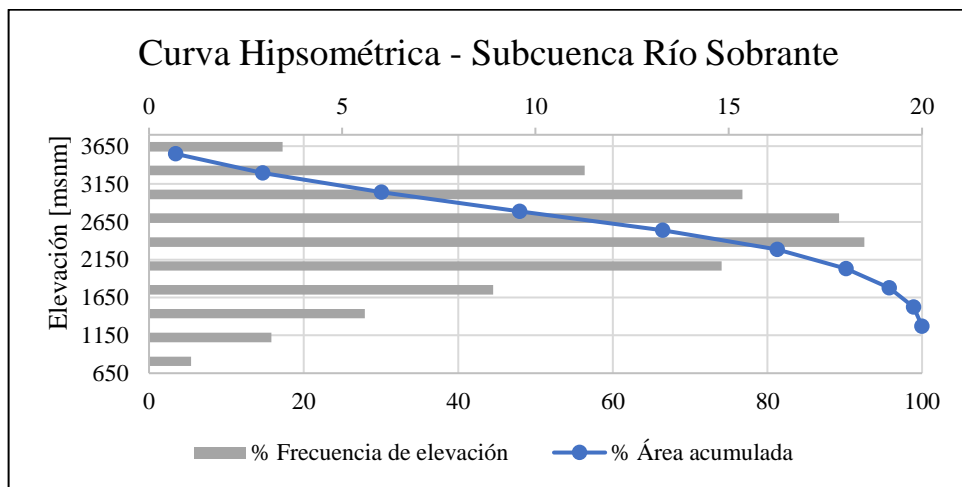
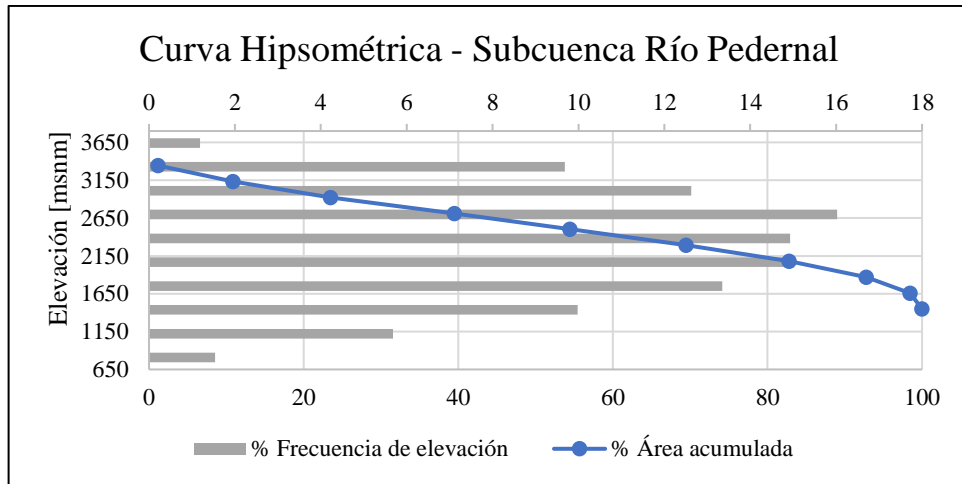


Figura 4.2 - Curvas hipsométricas correspondientes a las tres subcuencas de estudio. En cada gráfica se puede visualizar el área acumulada respecto a las elevaciones y su frecuencia (en porcentaje). De las tres curvas se desprende que el grueso de las superficies está comprendido entre los 2000 [msnm] y 2600 [msnm]. Las tres subcuencas se caracterizan por ser de gran altitud y pendientes pronunciadas.

La distribución del incremento de las elevaciones distribuidas en las tres subcuencas del área de estudio se muestra a continuación en la Figura 4.3:

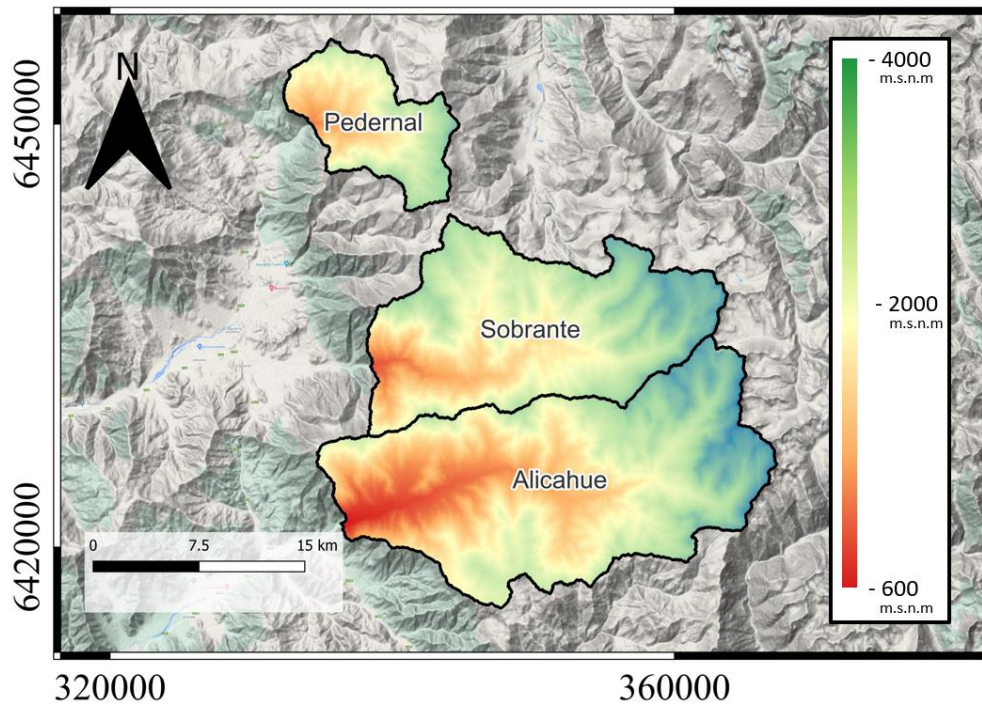
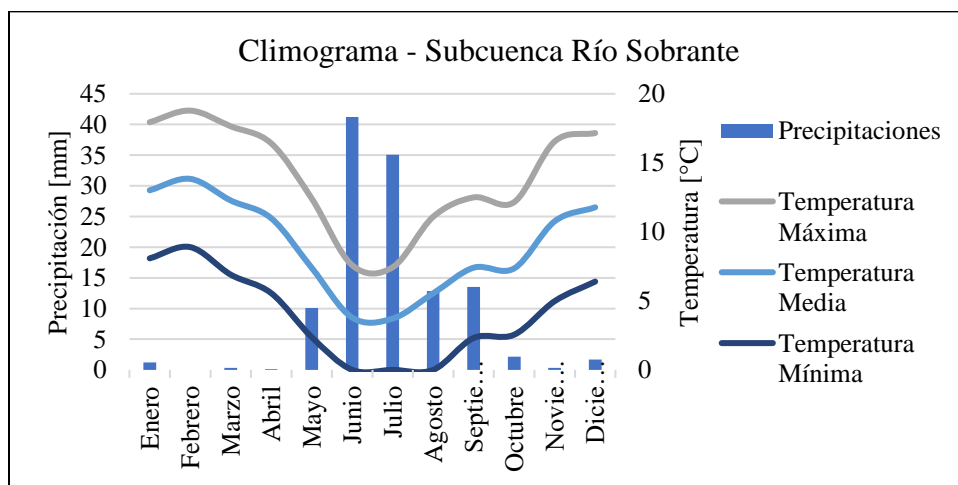


Figura 4.3 - Morfometría presente en las tres subcuencas de estudio.

4.1.2. Características climáticas

En base a la clasificación de Köppen modificada [49], la provincia de Petorca se caracteriza por tener un tipo de clima mayoritariamente semiárido templado con lluvias invernales. Posee una pequeña franja intermedia (o sector) en el cual predomina el clima templado cálido con lluvias invernales, culminando en el extremo oriental con un clima de tipo templado frío con lluvias invernales y tundra por efectos de la altura. Este clima se encuentra presente en ambas cuencas y se caracteriza principalmente por la escasa humedad atmosférica, gran oscilación térmica a nivel diario, alta luminosidad de ambiente y cielos por lo generalmente despejados. Los detalles climatológicos se presentan a continuación en la Figura 4.4:



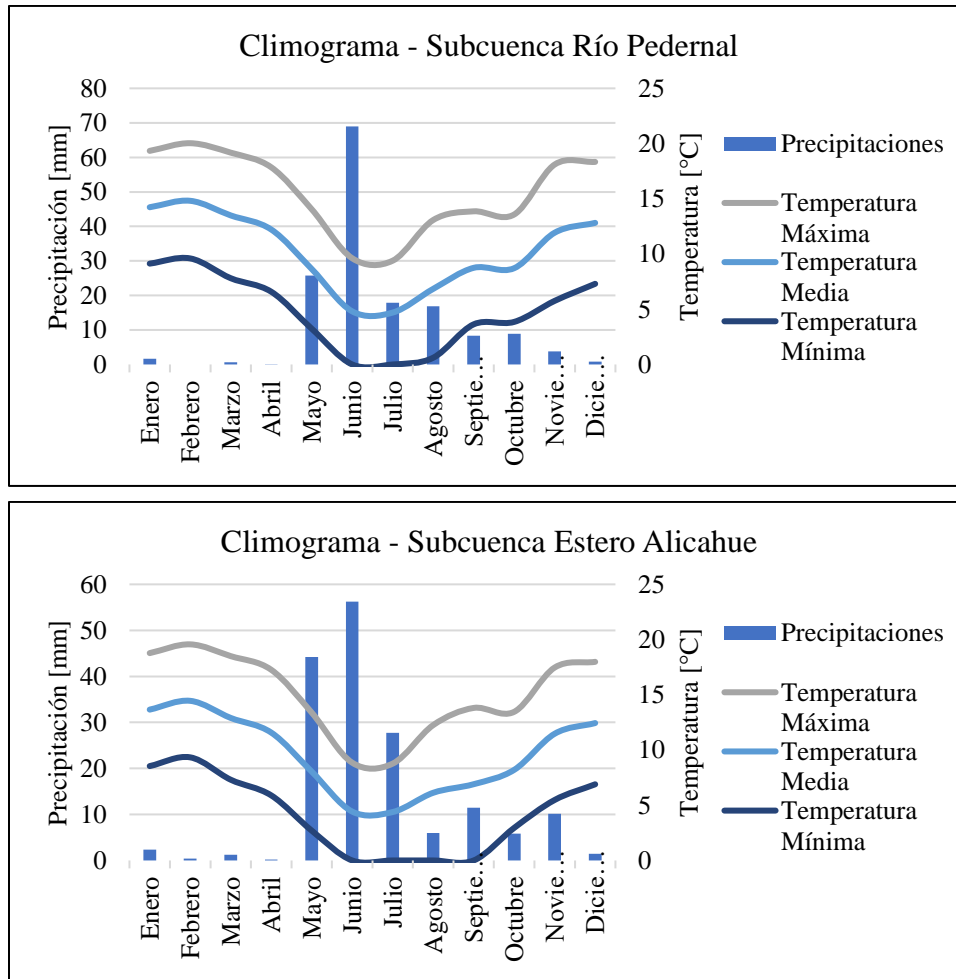


Figura 4.4 - Climogramas representativos de las tres subcuencas de estudio. Con base en datos extraídos desde el simulador climático (Cr)² [50].

4.1.3. Características del uso de suelo

El uso del suelo presente en la provincia de Petorca y comuna de La Ligua se caracteriza por un predominio absoluto del matorral en todo el territorio provincial y sectores menores de matorral con suculentas. Los terrenos agrícolas aparecen en los fondos del valle [47].

Existen diversos tipos de clasificaciones propuestos para los suelos de la provincia de Petorca, entre ellas está la propuesta por Luzio y Alcayaga (1992) [51], la que indica que corresponden a una zona de transición entre suelos de serranías áridas y semiáridas, suelo granítico de la costa y el comienzo de los suelos aluviales del valle central.

La información que detalla los usos de suelo presentes en las tres subcuencas altas de La Ligua-Petorca se presentan a continuación en la Figura 4.5:

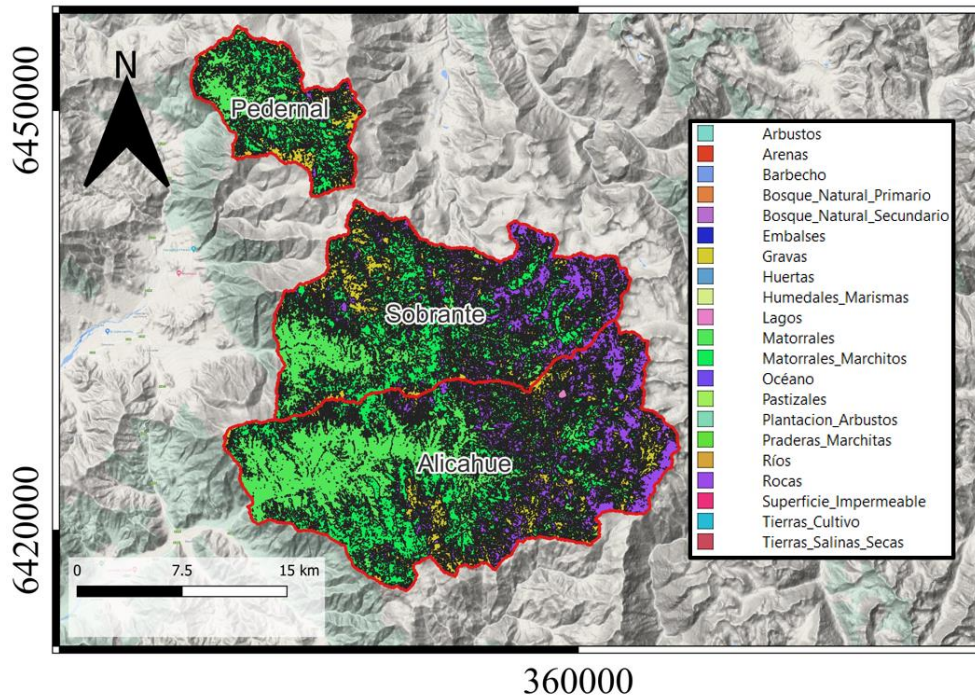


Figura 4.5 - Uso de suelo presente en las subcuencas de los ríos Pedernal, Sobrante y Estero Alicahue.

En la Figura 4.6 se presenta de manera gráfica la proporción de superficie por uso de suelo de las tres subcuencas de la zona de estudio, mientras que en la Tabla 4.2 se detalla numéricamente el área en [km²] de cada superficie. Se debe tener en cuenta que la gráfica representa la distribución de área total de las tres subcuencas que comprenden la zona de estudio:

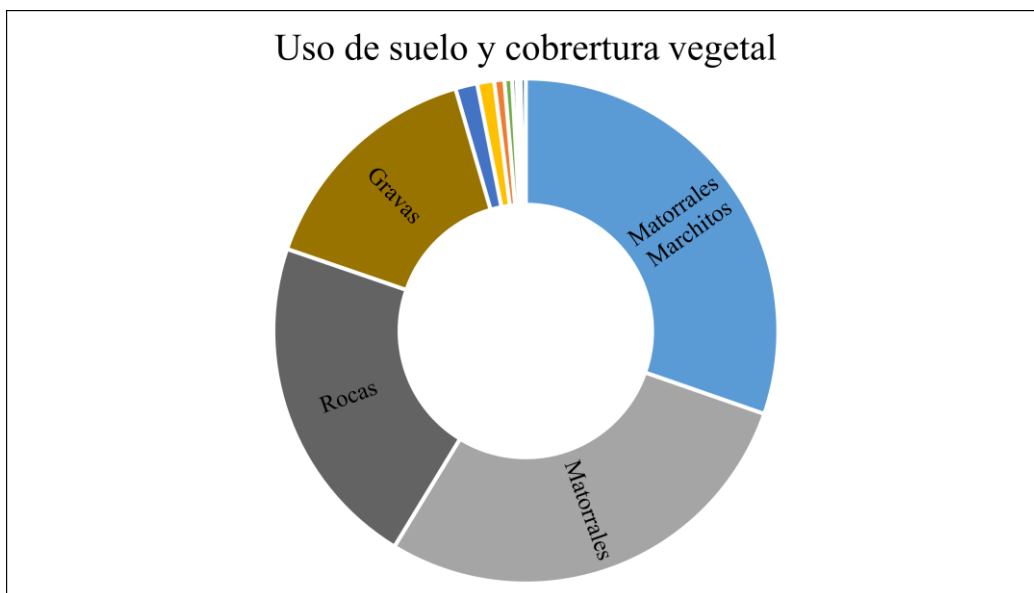


Figura 4.6 - Gráfica de proporciones por uso de suelo de las tres zonas de estudio.

Tabla 4.3 Detalle del área por uso de suelo correspondiente a la parte alta de las cuencas de Ligua-Petorca.

Uso de Suelo	Área [km ²]
Tierras de Cultivo	0.008
Huertas	0.243
Barbecho	0.348
Bosque Primario	0.008
Bosque Secundario	1.3
Bosques Latifoliadas	0.0
Bosques Coníferas	0.0
Pastos	0.0
Pastizales	9.9
Praderas Marchitas	4.6
Matorrales	199.8
Arbustos	7.6
Suculentas	0
Plantación Arbustos	0
Matorrales Marchitos	213.4
Humedales Marismas	0.084
Lagos	3.4
Embalses	0.030
Ríos	0.011
Océano	2.0
Superficie Impermeable	1.8
Tierras Salinas Secas	0.012
Arenas	0.245
Rocas	151.7
Gravas	107.2

Fuente: elaboración propia con base en la descripción realizada por Zhao et al. (2016) [14].

4.2. Procesamiento de la información disponible

En base a la información meteorología extraída de ERA5 [52] y el Balance Hídrico Nacional se prosigue con el procesamiento necesario de la información para su utilización en formato de mapas.

4.2.1. Información meteorológica

La información meteorología requerida para el estudio fue detallada en la Tabla 3.5. La fuente de obtención de la información meteorológica en formato NetCDF fue extraída de dos fuentes distintas. Las temperaturas y precipitaciones se obtuvieron directamente desde el BHN, mientras que el resto de las variables como la humedad relativa, radiación solar neta, velocidad del viento, evaporación y albedo fueron extraídas de la plataforma de datos ERA5. Debido a que la información proviene de dos fuentes distintas, será necesario manipular las escalas temporales y las resoluciones espaciales para que coincidan entre ellas como producto final.

4.2.1.1. Información meteorológica – Balance Hídrico Nacional (BHN)

El BHN pone a libre disposición información meteorológica de las precipitaciones y temperaturas a lo largo de todo el territorio nacional. Esta información en formato NetCDF se encuentra en resoluciones de 5x5 [km] a una escala temporal diaria, con un registro histórico comprendido entre 1979-2020. El ajuste de las resoluciones del archivo NetCDF correspondientes a las temperaturas y precipitaciones se realiza por medio de una interpolación con distancia inversa ponderada (IDW) [53] y procesos internos en QGIS, el producto final se muestra a continuación en las Figuras 4.7 y 4.8:

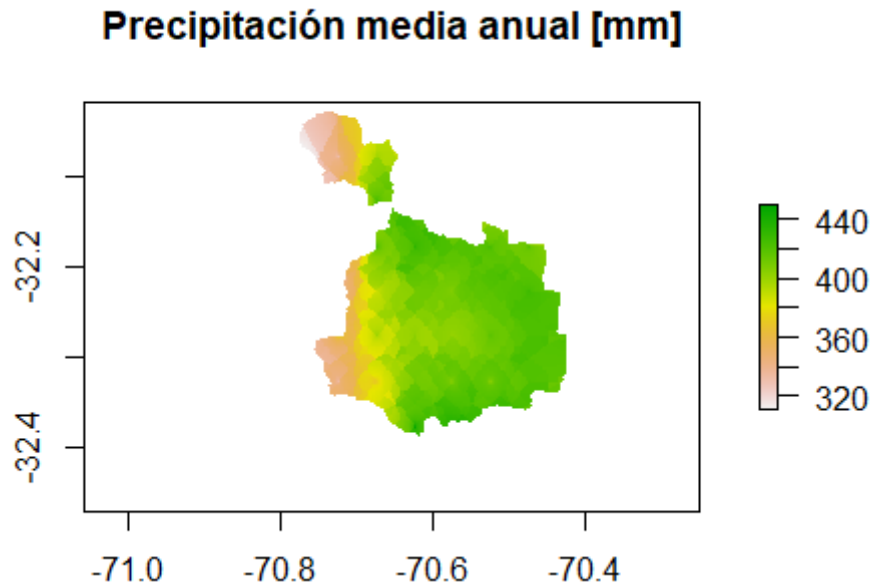


Figura 4.7 - Distribución de la precipitación media anual por medio de IDW para las tres subcuencas altas de Ligua-Petorca.

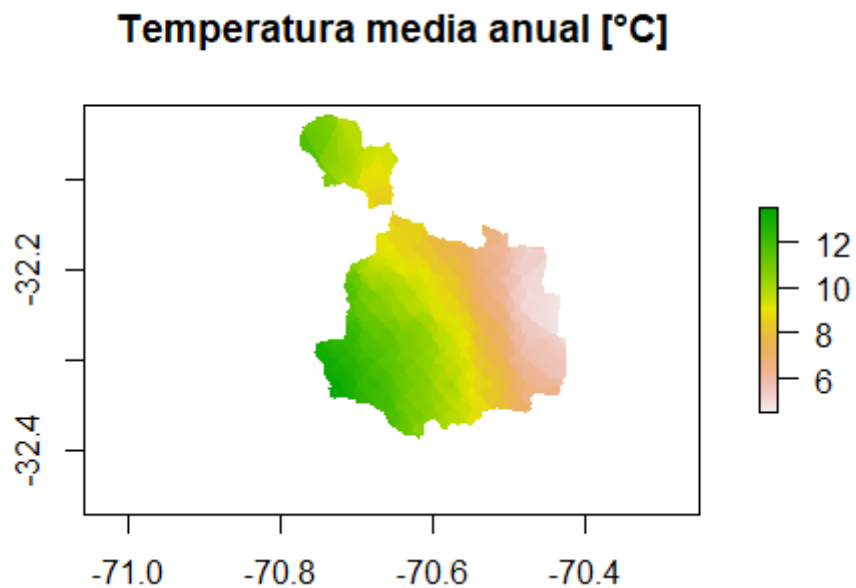


Figura 4.8 - Distribución de la temperatura media anual por medio de IDW para las tres subcuencas altas de Ligua-Petorca.

4.2.1.2. Información meteorológica – ERA5 (Servicio de cambio climático Copernicus)

Datos meteorológicos como la evaporación, velocidad del viento, radiación solar neta, humedad relativa y albedo no se encuentran disponibles en el BHN. El Servicio de Cambio Climático de Copernicus [52] elaboró un conjunto de datos llamado ERA5 el cual contiene todas las variables faltantes (mencionadas con anterioridad) que no posee el BHN. Una diferencia importante con respecto a los datos del BHN son las resoluciones de los archivos NetCDF que pone a disposición ERA5, poseyendo estos últimos una resolución considerablemente mayor. No obstante, al ser forzantes climáticas secundarias (a diferencia de la precipitación y temperatura) el hecho de no poseer una resolución detallada no contribuye en una mala representación final de los resultados.

El proceso realizado para la distribución de las variables meteorológicas de ERA5 a lo largo de la zona de estudio fue el mismo que se llevó a cabo para la distribución de las variables del BHN. Se realizó un IDW a cada set de datos, dando como resultado las distribuciones correspondientes que se presentan a continuación en la Figura 4.9:

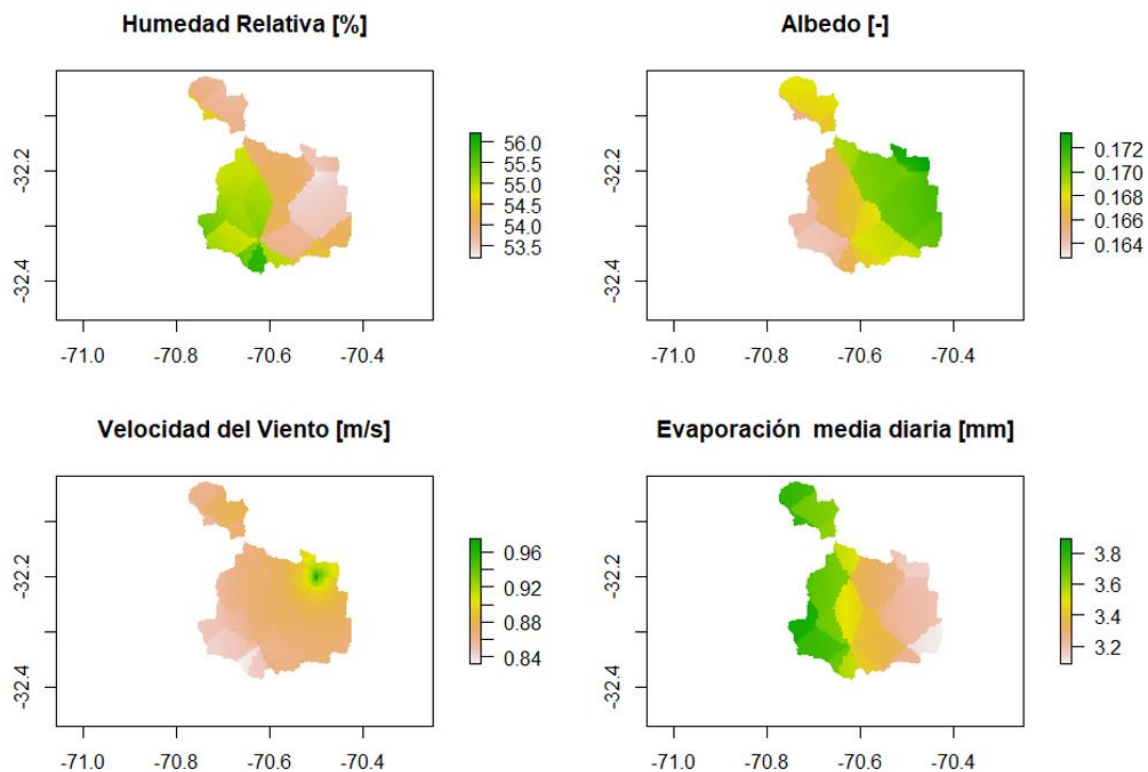


Figura 4.9 - Distribución espacial de las forzantes climáticas correspondientes a la evaporación media diaria [mm], velocidad del viento [m/s], albedo [-] y humedad relativa [%] para las tres subcuencas altas de Ligua-Petorca.

Cada una de las distribuciones presentadas en la Figura 4.9 está relacionada con diversos factores como la temperatura, la vegetación, tipo de superficie, elevaciones, etc. Sumado a las bajas resoluciones de los datos entregados por ERA5 y tratándose de una distribución por medio de la interpolación IDW es que se presentan estos “cúmulos” u “ojos de buey” (como se les denomina en la literatura) en la distribución de cada variable. Este comportamiento se podría “suavizar” mediante la aplicación de modelos lineales que puedan incorporar las variables de las cuales depende cada distribución, no obstante, debido al comportamiento altamente no lineal entre las relaciones de un factor y otro no es posible llevar a cabo este proceso de una manera sencilla. Independientemente de este comportamiento, al tratarse de variables secundarias y de distribuciones bastante representativas no será necesario realizar ajustes extras en los mapas previamente generados.

4.2.1.3. Información fluviométrica

Las estaciones fluviométricas presentes en la zona de estudio se detallan a continuación en la Tabla 4.4 y su ubicación se detalla en la Figura 4.10.

Tabla 4.4 Estaciones fluviométricas presentes en la parte alta de las cuencas de Ligua-Petorca.

Estación	Código DGA	UTM Este	UTM Norte	Vigencia	Período registro
Río Pedernal	05101001-9	334042	6449855	Activa	* 1979 – 2018 *
Río Sobrante	05100001-3	338253	6432848	Activa	1979 – 2018
Estero Alicahue	05200001-7	336451	6421573	Activa	1979 – 2018

Fuente: Dirección General de Aguas, DGA.

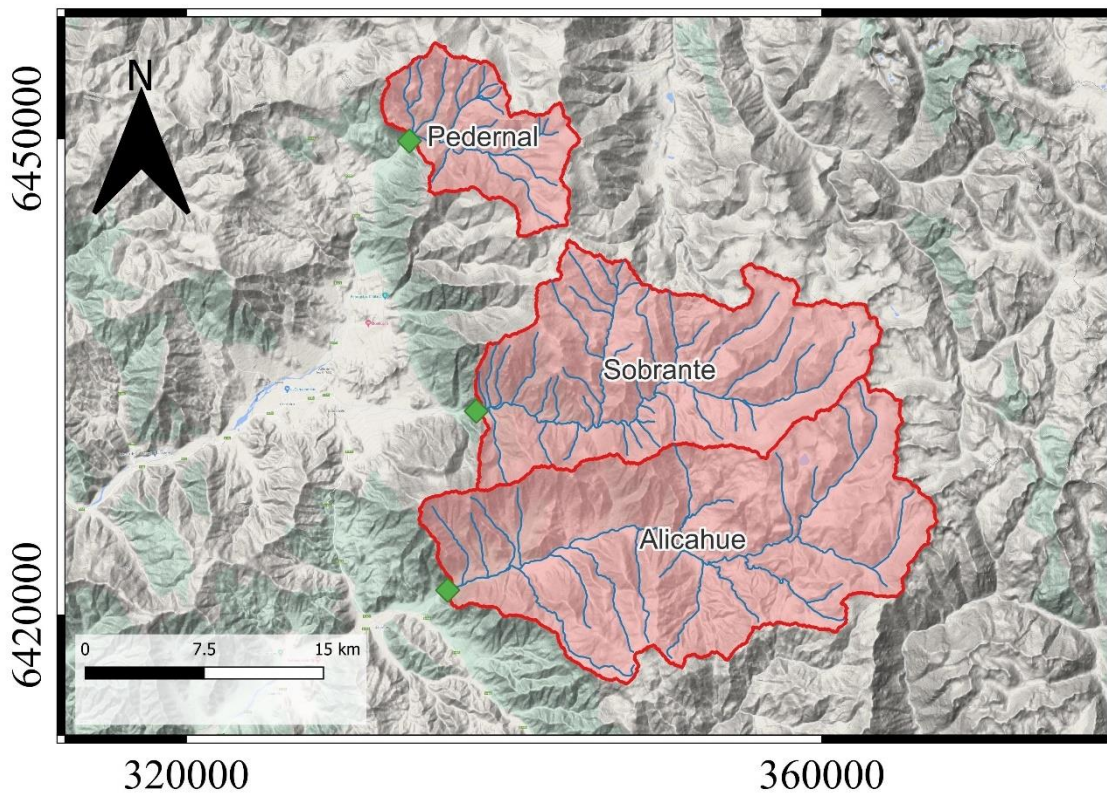


Figura 4.10 - Ubicación estaciones fluviométricas (rombos verdes) y su área de contribución correspondiente.

CAPÍTULO V

5. Resultados del modelo

En el presente capítulo serán presentados los principales pasos para la construcción del modelo hidrológico WEAP mediante la metodología de delimitación de URH (PCA/HCPC).

Será detallado el proceso para la creación de mapas ráster de los parámetros hidrológicos y las ecuaciones empleadas para su obtención, junto con el procesamiento de la información meteorológica necesaria.

Posteriormente, será descrita la composición de las distintas URH sobre la cuenca para tres, cinco y seis clúster respectivamente y la descripción de sus principales elementos dentro del modelo hidrológico.

Finalmente, la respuesta obtenida para los tres casos de simulación será analizada de dos formas: la primera mediante indicadores de eficiencia (según lo expuesto en la sección 3.5.2) y la segunda mediante los tiempos de simulación del modelo.

A continuación, en la Figura 5.1 mediante un diagrama de flujo simple, se detallan los pasos a seguir en el presente capítulo:

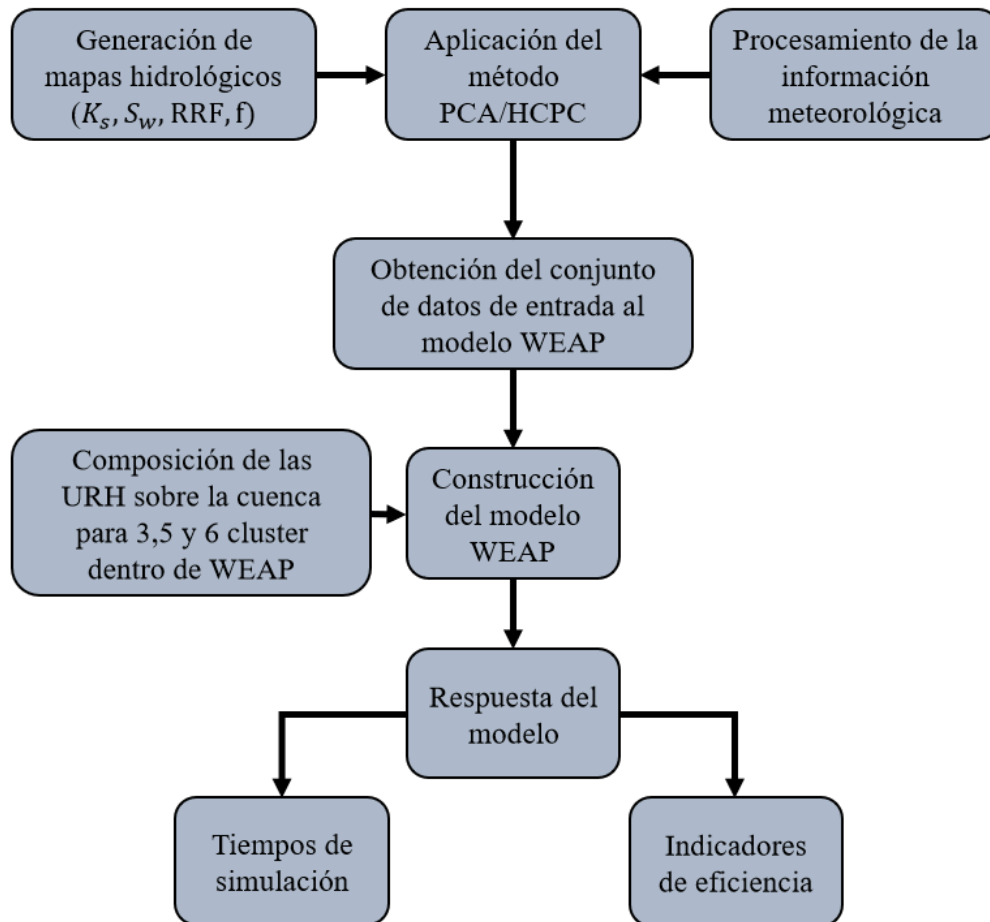


Figura 5.1 - Diagrama de flujo con los principales pasos del capítulo para la generación y verificación del modelo.

5.1. Construcción del modelo

En esta sección se presentan los aspectos prácticos empleados para la construcción del modelo en WEAP. Presentando los pasos previos necesarios en el procesamiento de datos, aplicación de metodologías (PCA/HCPC) y las herramientas utilizadas para la construcción.

5.1.1. Creación de mapas ráster

5.1.1.1. Indicadores fisiográficos – iP, iV e iS

Como fue descrito en la sección 2.8 para la implementación de la metodología propuesta por [46] se requiere conocer la información geomorfológica de la zona de aplicación.

Para establecer el índice de permeabilidades de la zona se usó el mapa Geológico de Chile y la Carta Geológica Quillota-Portillo, elaborados por el SERNAGEOMIN (1993, 2002). Con esto se identificaron los tipos de litologías correspondientes a cada sector como se muestra a continuación:

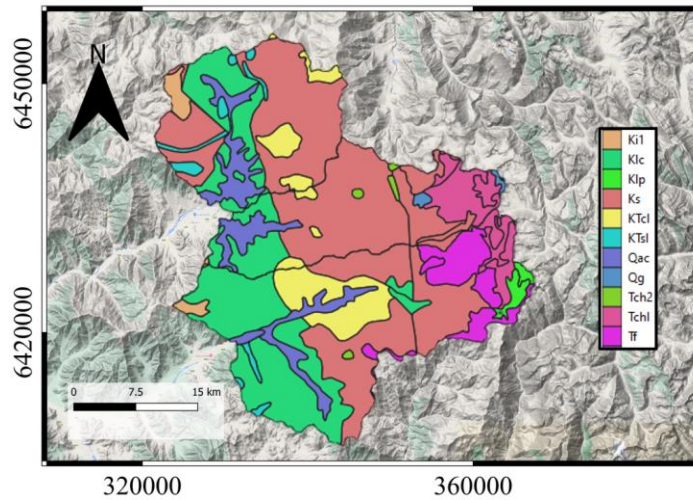


Figura 5.2 - Litología del sector alto de las cuencas de Ligua-Petorca.

Una vez identificados las distintas litologías de la zona de estudio, se utilizó la escala de permeabilidades de la Figura 5.3 de Gleeson *et al.* (2010) [49], con el objetivo de estimar una permeabilidad local aproximada de cada uno de los estratos definidos en la Figura 5.2. En base a lo propuesto por las referencias en [46] y [49] se establecieron valores aproximados para cada clase de permeabilidad iP como se detalla en la Tabla 5.1.

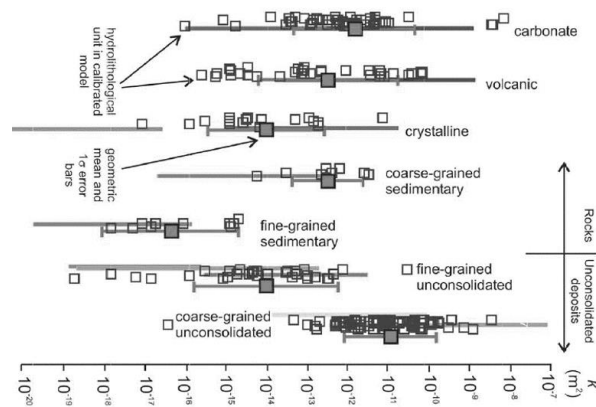


Figura 5.3 - Escala de permeabilidad local (K).

Fuente: [49].

Tabla 5.1 Detalle del estrato, tipo de roca y simbología con su clase de permeabilidad correspondiente. Los valores de *iP* son valores aproximados, fueron estimados tomando en consideración los niveles de permeabilidad presentes en [49] y las recomendaciones propuestas por [46].

Estrato	Tipo	Simbología	<i>iP</i>
Dioritas (gris)	Ígnea	KTel	5.0
Granodioritas y dioritas cuarcíferas	Ígnea	Kil	5.0
Pórfidos andesíticos y dioríticos	Ígnea	KTsl	5.0
Pórfidos de Cuarzo	Ígnea	Tch2	4.5
Pórfidos diacíticos (blanco)	Ígnea	Tchl	5.0
Andesitas	Ígnea-volcánica	Tf	4.5
Sedimentos aluviales y coluviales	Sedimentos no consolidados	Qac	2.5
Sedimentos glaciales y fluvioglaciales	Sedimentos no consolidados	Qg	3.5
Lavas andesíticas y dacíticas	Volcánica acida	Ks	4.5
Lavas andesíticas, tobas, volcarenitas	Volcánica acida	Klp	4.5
Diamicitas, volcarenitas, tobas	Volcánica intermedia	Klc	4.0

Fuente: elaboración propia con base en [46], [47], [48] y [49].

Finalmente, por medio procesos internos en QGIS, se generó el mapa en formato ráster asociados a las clases de permeabilidad correspondiente a cada estrato presente en la parte alta de las cuencas de Ligua-Petorca.

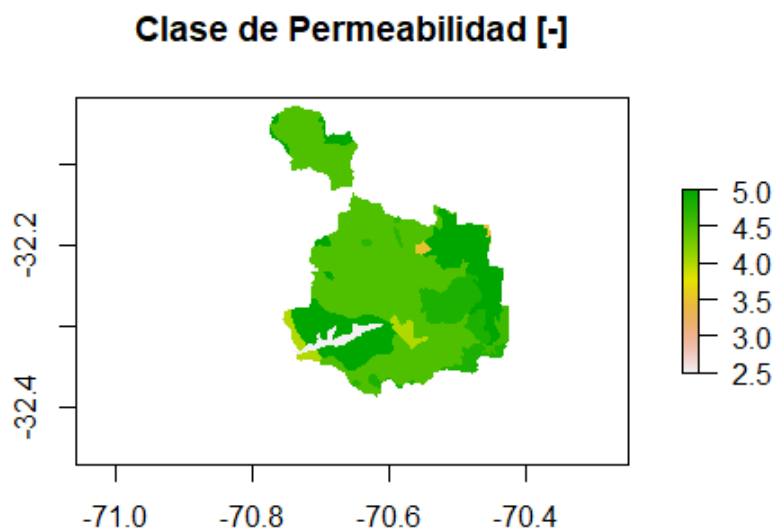


Figura 5.4 - Mapa en formato ráster con cada clase de permeabilidad presentes en la parte alta de las cuencas de Ligua-Petorca.

Con base en los tipos de cobertura vegetal y el uso del suelo se formularon las distintas clases de vegetación. Para identificar los tipos de cobertura vegetal y el uso del suelo presentes en la zona de estudio, se utilizó el Land Cover Chile Figura 2.11 y la Tabla 2.8, elaborado por Zhao et al. (2016) [14]. En él se detallan los distintos tipos de uso del suelo a lo largo de todo el territorio nacional representados mediante códigos que van desde el 100 (Tierras de cultivo) al 1200 (Nubes), permitiendo así, poder establecer el valor de cada índice correspondiente a una cobertura específica como se detalla a continuación en la Tabla 5.2:

Tabla 5.2 Detalle del tipo de uso de suelo disgregado en tres niveles y la clase de vegetación iV correspondiente a cada nivel con base en lo indicado en [46].

Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	iV	
100 tierras de cultivo	110 campos de arroz			2.3
	120 cultivo de invernadero			2.4
	130 otras tierras de cultivo		2.4	
	140 huertos			2.6
	150 tierras de cultivo descubiertas / barbecho			3
200 bosques	210 natural de hoja ancha	211 primario	1	
		212 secundario		1.5
	220 coníferas naturales	221 primario	1.5	
		222 secundario		1.7
	230 naturales mixtos	241 años plantaciones	1.5	
	240 plantaciones de latifoliadas	242 talas	2	
	250 plantaciones de coníferas	251 años plantaciones	2	
		252 talas		2.2
300 pastizales	310 pastos		3	
	320 otros pastizales		3.2	
	330 praderas marchitas		3.2	
400 matorrales	410 matorrales		3.2	
	420 arbustos y mosaico de árboles escasos		3.6	
	430 suculentas		3.5	
	440 plantaciones de arbustos		3.4	
	450 matorrales marchitos		3.4	
500 humedales	510 marismas		5	
	520 marismas		5	
	530 otros humedales		5	
600 cuerpos de agua	610 lagos		5	
	620 embalses / estanques		5	
	630 Ríos		5	
	640 océano		5	
800 superficies impermeables			4.8	
900 tierras baldías	910 salinas secas		4.9	
	920 arenas		4.9	
	930 rocas desnudas expuestas	931 rocas	5	
		932 gravas	5	
1000 nieve y hielo	1010 nieve		5	
	1020 hielo		5	
1200 nubes			5	

Fuente: elaboración propia con base en [14] y [46].

Finalmente, mediante procesos internos en QGIS se generó el mapa en formato ráster de las distintas clases de cobertura vegetal presentes en la parte alta de las cuencas de Ligua-Petorca, como se presenta en la Figura 5.5 a continuación:

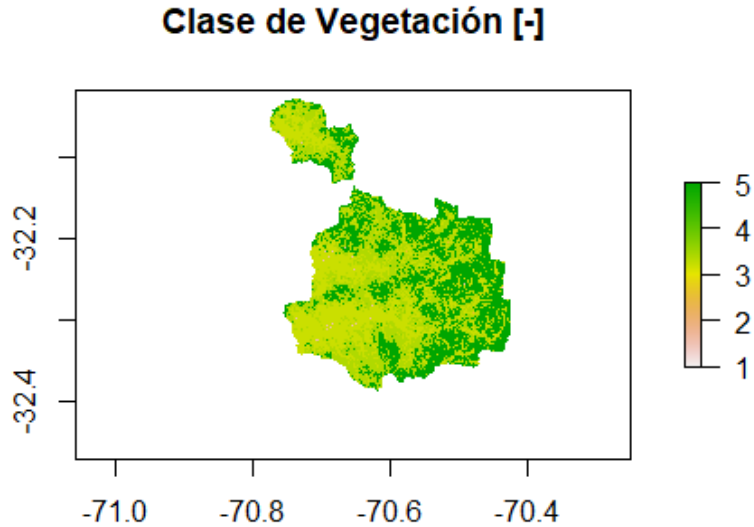


Figura 5.5 - Mapa en formato ráster con cada clase de cobertura vegetal correspondiente a la parte alta de las cuencas de Ligua-Petorca.

Para estimar las clases de drenaje es necesario contar con las características geomorfológicas de la zona de estudio asociado a la topografía y pendiente Figura 2.12. Posteriormente, una vez identificadas las pendientes en cada punto del espacio, la referencia [46] propone asignar una clase de drenaje despreciable (asociada a un índice de uno) a aquellas zonas que son prácticamente horizontales o menores a un 30% de la pendiente, mientras que para pendientes superiores al 30% se asigna un índice de cinco.

Con base en lo anterior descrito se realizaron las siguientes relaciones lineales:

Para un índice de drenaje iS entre 0 y 1 se estableció un rango de pendientes comprendidos entre el 0 y 20%, mediante la siguiente relación lineal:

$$iS = 0.0488 \cdot (\text{pendiente}) + 0.0244 \quad (19)$$

Para una clase de drenaje iS entre 1 y 5 se estableció un rango de pendientes comprendidos entre el 20 y 30%, mediante la siguiente relación lineal [46]:

$$iS = 0.4 \cdot (\text{pendiente}) - 7 \quad (20)$$

Para pendientes mayores al 30% se fijó una clase de drenaje $iS = 5$.

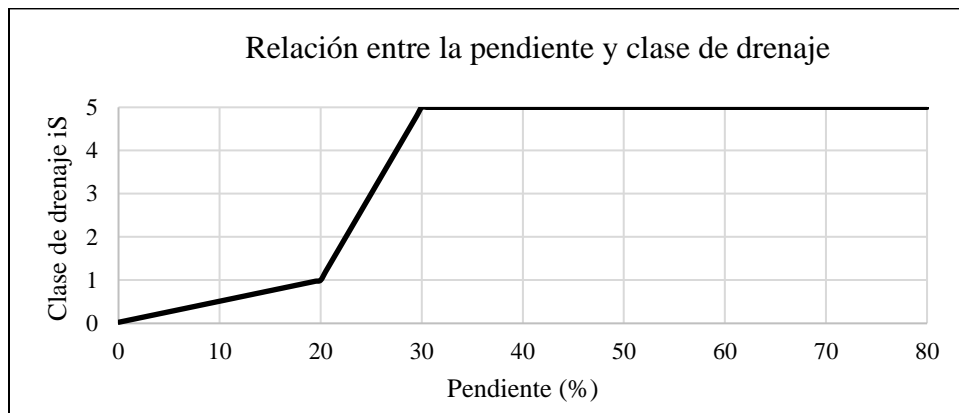


Figura 5.6 - Representación gráfica de la relación lineal entre la pendiente y la clase de drenaje.

Finalmente, conocidas las relaciones lineales para cada rango de pendientes y mediante procesos internos en QGIS se creó el mapa en formato ráster asociado a la clase de capacidad de drenaje iS.

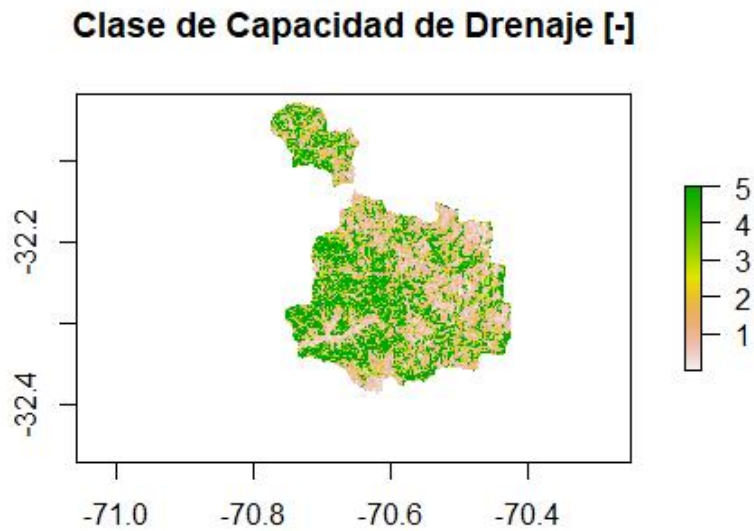


Figura 5.7 - Mapa en formato ráster correspondiente a las clases de drenaje presentes en la parte alta de las cuencas de Ligua-Petorca.

Fuente: elaboración propia con base en [42] y [46].

5.1.1.2. Parámetros hidrológicos – f , Ks , Sw , RRF

Savvidou *et al.* (2018) [46] mediante la combinación lineal de las tres clases fisiográficas de la zona (iP, iV e iS) y procesos internos en GIS obtiene un mapa final del parámetro de CN (ver sección 2.8) tal como se muestra a continuación en la Figura 5.8:

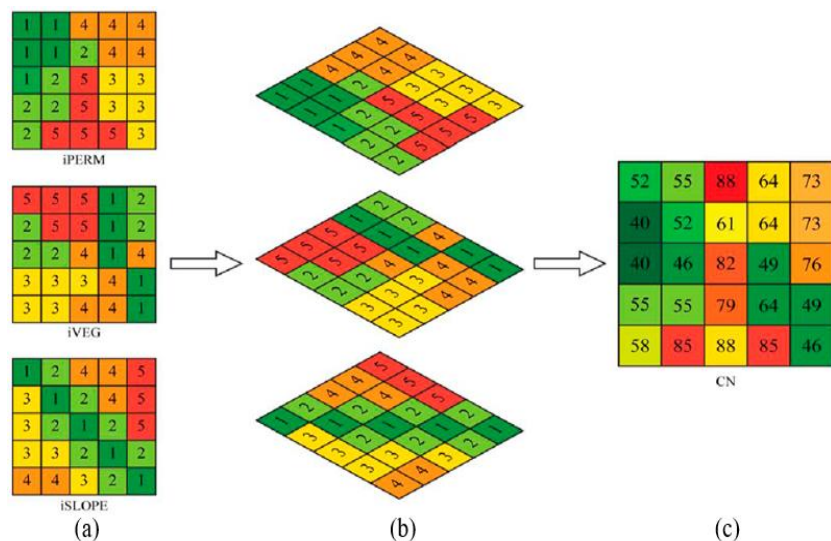


Figura 5.8 - (a) Capas de información fisiográfica para clases de: permeabilidad (iP), densidad de vegetación (iV) y capacidad de drenaje (iS); (b) combinación lineal de capas; (c) Mapa de parámetros CN.

Fuente: Savvidou *et al.* (2018) [46].

Basados en el procedimiento establecido con anterioridad, serán generados los mapas asociados a los parámetros hidrológicos del sector. Para ello, fueron creadas cuatro ecuaciones empíricas adaptando la ecuación (16). Cada ecuación permite calcular los valores por cuadrícula de cada uno de los parámetros hidrológicos por medio de una combinación que relaciona los tres tipos de clase *iP*, *iV* e *iS*. Donde la ecuación general adaptada es la siguiente:

$$(f, K_s, S_w, RRF) = D + (A \cdot iP + B \cdot iV + C \cdot iS) \quad (21)$$

Donde:

- A, B, C y D: son constantes numéricas (reales positivas, R^+) utilizadas para asignar un mayor o menor peso a la clase que esté más relacionada al parámetro que se desee estimar.
- *iP*: clase de permeabilidad, en formato ráster.
- *iV*: clase de cobertura vegetación, en formato ráster.
- *iS*: clase de capacidad de drenaje, en formato ráster.

Mediante la combinación lineal de la ecuación (20) son obtenidos los parámetros correspondientes a:

1. La dirección preferencial del flujo (*f*), relacionada directamente con la pendiente y propiedades del suelo.
2. La capacidad de almacenamiento de agua en la zona de raíces (*S_w*), que está inversamente relacionada con la pendiente. Aumentando en terrenos planos y cercanos a cursos de agua y disminuyendo en laderas.
3. El factor de resistencia a la escorrentía (*RRF*), está inversamente relacionado con el tipo de pendiente y directamente relacionado con la cobertura vegetal presente del sector. Este valor crece a medida que la cobertura vegetal se vuelve más densa y la pendiente es más suave.
4. La conductividad hidráulica en la zona de raíces (*K_s*), que está inversamente relacionada con la pendiente. Y relacionada directamente con la cobertura vegetal y el tipo de suelo.

De esta forma, para obtener cada uno de los parámetros hidrológicos se emplearon las siguientes configuraciones numéricas a la ecuación (20), como se muestra a continuación en la Tabla 5.3:

Tabla 5.3 Constantes numéricas de ajuste A, B, C y D para cada parámetro hidrológico correspondiente.

Parámetro Hidrológico				
Constante numérica	<i>f</i>	<i>S_w</i>	<i>RRF</i>	<i>K_s</i>
A	0.011	18.71	1.59	288.2
B	0.021	30.71	0.028	605.4
C	0.026	40.54	0.057	577.7
D	-0.043	591.8	0.041	8163.1

$$f = (0.011 \cdot iP + 0.021 \cdot iV + 0.026 \cdot iS) - 0.043 \quad (22)$$

$$S_w = 591.8 - (18.71 \cdot iP + 30.71 \cdot iV + 40.54 \cdot iS) \quad (23)$$

$$RRF = 1.59 - (0.028 \cdot iP + 0.057 \cdot iV + 0.041 \cdot iS) \quad (24)$$

$$K_s = 8163.1 - (288.2 \cdot iP + 605.4 \cdot iV + 577.7 \cdot iS) \quad (25)$$

Conocidas las clases fisiográficas (iP, iV e iS) y las ecuaciones correspondientes a cada parámetro hidrológico el siguiente paso es la generación de los mapas ráster asociados.

Para ello, se utilizó la herramienta “**calculadora ráster**” del software QGIS. Esta herramienta permite crear y ejecutar una expresión algebraica de mapas que genera como salida un archivo ráster. El primer paso es formular la expresión de cada ecuación (de los parámetros hidrológicos) en la casilla “**Expresión de la calculadora ráster**” como se indica en el recuadro 1°. Es importante aclarar que la herramienta calculadora ráster solo permite generar un archivo ráster por expresión ingresada, el proceso deberá repetirse para cada parámetro por separado. Como segundo paso se debe ingresar los datasets (correspondientes a las clases fisiográficas iP, iV e iS que se encuentran en formato ráster) seleccionándolos de la casilla “**Bandas ráster**” como se indica en el recuadro 2°, ya que serán las variables para usar en cada expresión formulada en 1°. Finalmente, una vez construida la sintaxis correspondiente a cada parámetro hidrológico, en la casilla “**Capa de resultado**” en el recuadro 3°, se deberá especificar la extensión y resolución deseada para cada archivo ráster de salida. Para el presente caso, se utilizó una resolución aproximada de 250x250 [m] para cada parámetro generado, la extensión es la correspondiente a la zona geográfica que cubre la parte alta de las cuencas de Ligua-Petorca y un SRC de salida EPSG:4326 – WGS 84 como se muestra en la Figura 5.9.

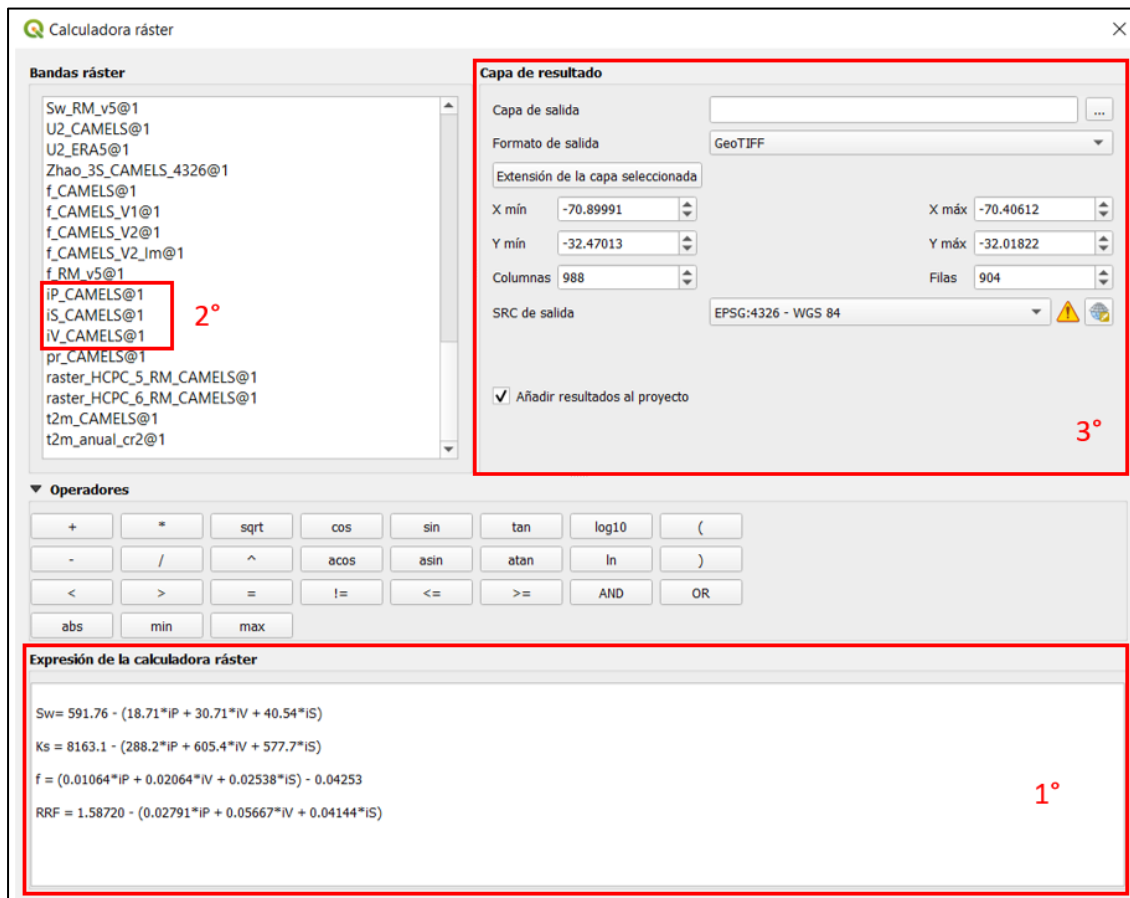


Figura 5.9 - Interfaz principal de la herramienta calculadora ráster en QGIS.

De esta forma, siguiendo los tres pasos detallados con anterioridad y repitiéndolos para cada parámetro en específico se obtuvo los cuatro mapas ráster asociados a los parámetros hidrológicos del sector alto de las cuencas de Ligua-Petorca, como se muestra en las Figuras 5.10, 5.11, 5.12 y 5.13.

Dirección Preferencial del Flujo [-]

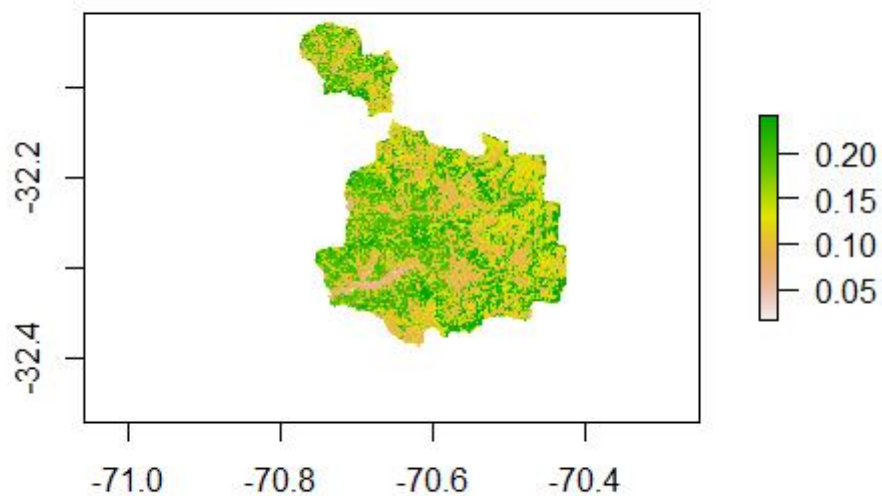


Figura 5.10 - Mapa en formato ráster correspondiente a la Dirección preferencial del flujo (f) para el sector alto de las cuencas de Ligua-Petorca.

Capacidad de Almacenamiento de Agua [mm]

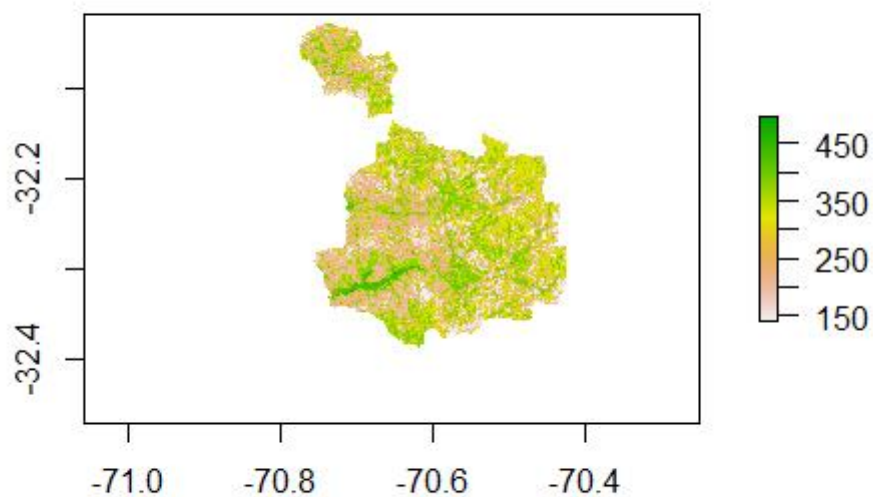


Figura 5.11 - Mapa en formato ráster correspondiente a la Capacidad de almacenamiento de agua en la zona de raíces (Sw) para el sector alto de las cuencas de Ligua-Petorca.

Conductividad Hidráulica [mm/mes]

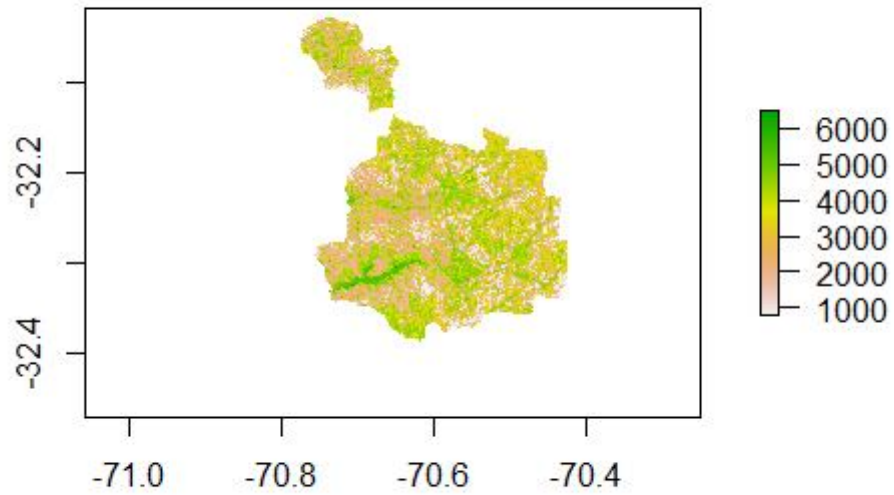


Figura 5.12 - Mapa en formato ráster correspondiente a la Conductividad hidráulica en la zona de raíces (Ks) para el sector alto de las cuencas de Ligua-Petorca.

Factor de Resistencia a la Escorrentía [-]

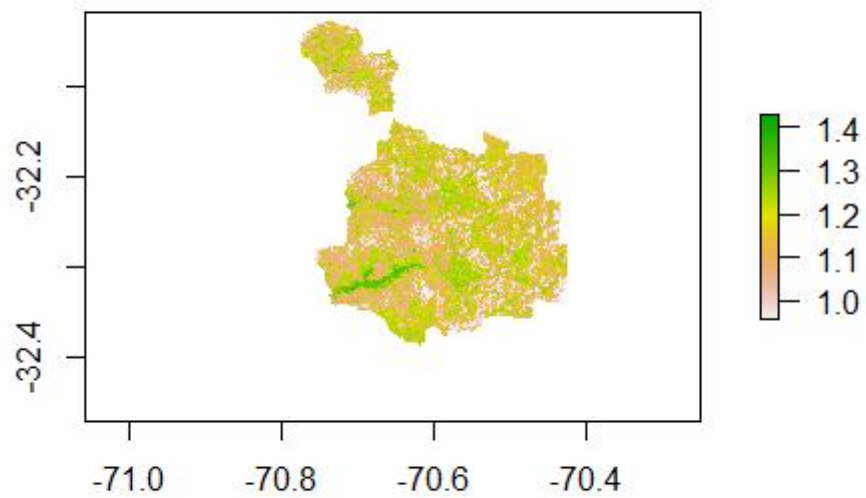


Figura 5.13 - Mapa en formato ráster correspondiente al Factor de resistencia a la escorrentía (RRF) para el sector alto de las cuencas de Ligua-Petorca.

5.1.2. Composición de las URH sobre las cuencas

Obtenida toda la información en formato ráster de los parámetros hidrológicos y las variables meteorológicas de la zona de estudio, es posible continuar con la creación y delimitación de las URH correspondientes. Este proceso se llevará a cabo mediante el PCA/HPCPC siguiendo los pasos que se detallarán en las siguientes secciones y mediante la Figura 5.14.

5.1.2.1. Aplicación del PCA sobre las cuencas

Se realiza el análisis de las componentes principales (PCA) sobre el conjunto de variables (ráster) hidrológicas (f , K_s , S_w y RRF) y meteorológicas (precipitación, temperatura, velocidad del viento, albedo, humedad relativa y evaporación), asignando a todas estas variables igual peso a la hora de la aplicación.

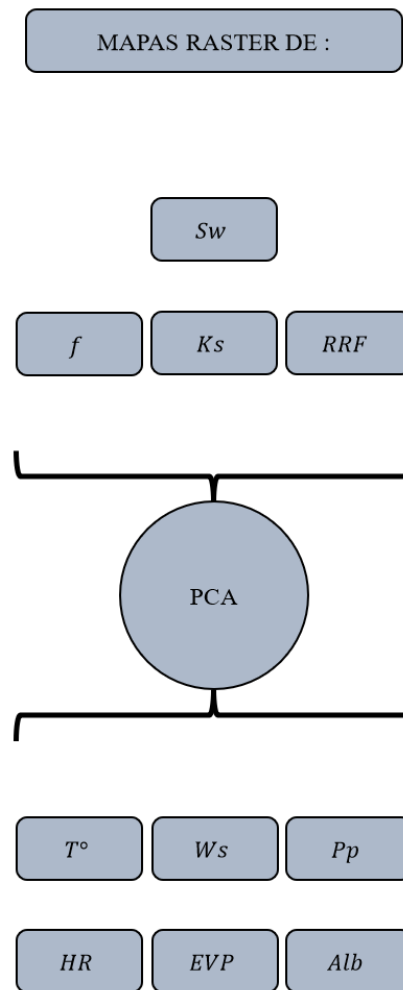


Figura 5.14 - Conjunto de variables en formato ráster utilizadas para el PCA.

Una vez realizado el PCA sobre las variables de interés se observa que en las primeras dos dimensiones se concentra aproximadamente un 83.3% de la varianza total del conjunto de datos y al agregar las dimensiones 3,4 y 5, representan el 93.3%, 97.5% y 98.4%. La Tabla 5.4 detalla el porcentaje de varianza correspondiente al conjunto de datos por cada dimensión, y la contribución de cada variable a su dimensión correspondiente.

Tabla 5.4 Resumen de las contribuciones por dimensión y variable de cada componente principal.

	Dim.1	Dim.2	Dim.3	Dim.4	Dim.5
Varianza [%]	45.81	39.63	7.99	3.27	1.7
Variable	Contribución a cada dimensión [%]				
Albedo	20.376	0.022	1.442	1.978	9.747
Temperatura	20.113	0.091	0.017	0.234	2.496
EVP	18.843	0.042	6.599	2.987	25.950
Ws	15.098	0.058	7.903	72.510	1.429
HR	14.073	0.007	28.789	22.206	28.813
Precipitación	11.018	0.001	55.214	0.041	31.530
Sw	0.228	24.820	0.005	0.003	0.014
f	0.185	24.927	0.002	0.000	0.015
RRF	0.043	24.839	0.027	0.034	0.004
Ks	0.023	25.194	0.003	0.007	0.002

La primera dimensión, la cual contiene un 45.81% de la varianza total está compuesta por los aportes de las variables meteorológicas de manera muy marcada. Por otra parte, la segunda dimensión (con un 39.63% de la varianza total) está compuesta principalmente en parte por los aportes de los parámetros hidrológicos como Sw, Ks, f y RRF, y recibiendo aportes insignificantes por parte de las variables meteorológicas. Un comportamiento importante para destacar es que los mayores aportes de las variables meteorológicas en especial la precipitación y humedad relativa se acentúan en las dimensiones con menor aporte a la varianza total, es decir, en las dimensiones 3, 4 y 5 respectivamente.

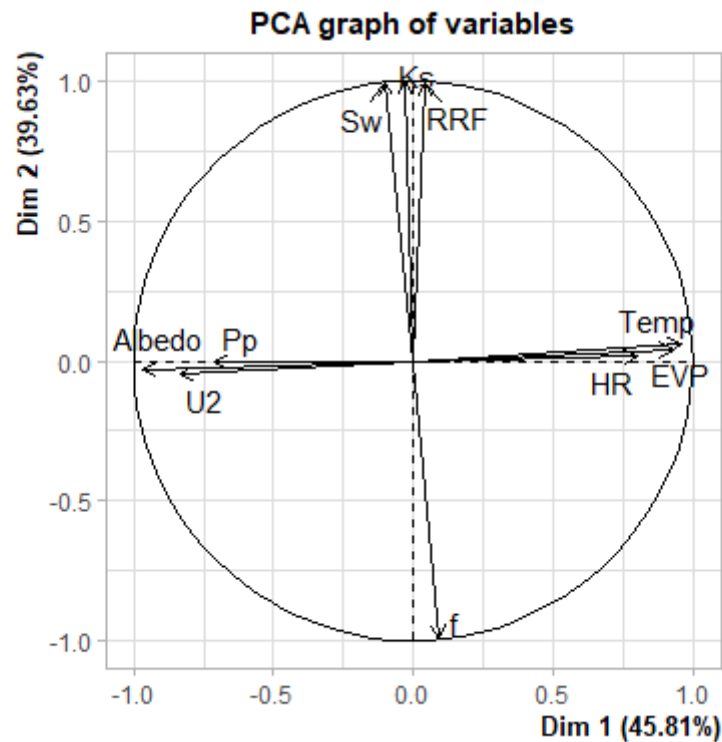


Figura 5.15 - Gráfico de variables por dimensión para el análisis de las componentes principales. Se muestra las dos primeras dimensiones que cargan con el mayor aporte a la varianza total.

En la Figura 5.15 se muestra de manera gráfica la proyección de todas las variables sobre las primeras dos dimensiones (las con mayor aporte a la varianza total). Un aspecto importante que muestra esta gráfica se basa en el detalle de como cada variable contribuye a cada dimensión en términos de dirección y magnitud. Se puede ver que la gráfica con tan solo dos dimensiones proyectadas en el plano representa un 85.44% de la varianza total, resultando en un porcentaje extremadamente representativo.

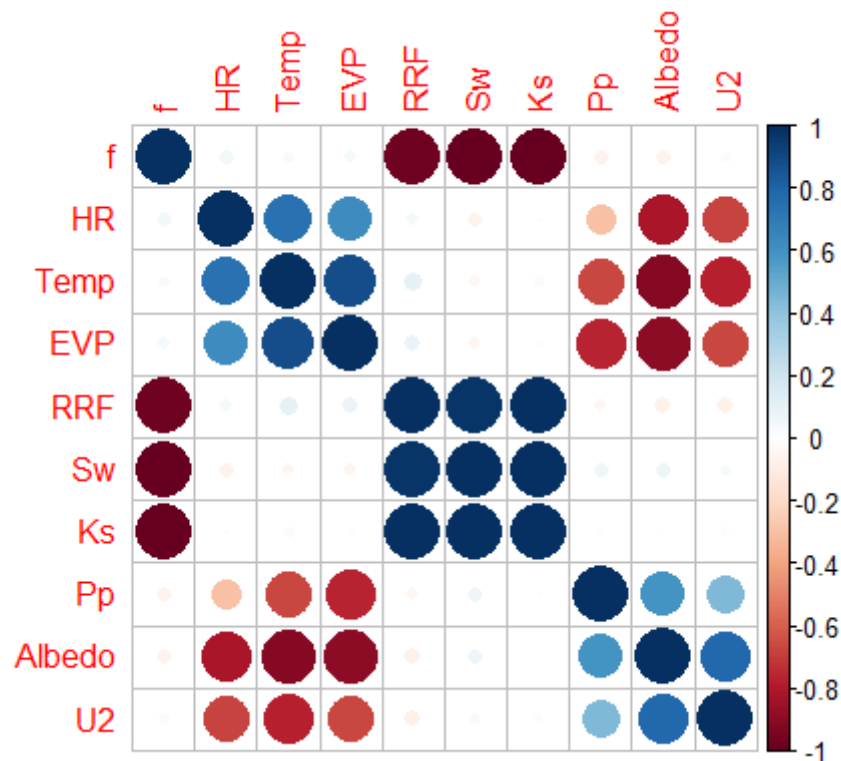


Figura 5.16 - Gráfico de correlación de las variables. Los círculos más grandes indican una correlación más alta, positiva si este es azul y negativa si está en color rojo.

Al inspeccionar las Figuras 5.15 y 5.16 se observa que la precipitación y la temperatura realizan considerables aportes a la varianza en la primera dimensión, y se correlacionan negativamente (expresándose en direcciones opuestas en el plano). Esto principalmente se debe a que las precipitaciones aumentan en zonas de mayor altitud, inversamente las temperaturas a mayor altitud disminuyen, explicando dicho comportamiento. Esto se puede contrastar inspeccionando las Figuras 4.7 y 4.8.

Continuando con la inspección visual de ambas Figuras 5.15 y 5.16 se puede observar un comportamiento muy particular respecto a la correlación entre los parámetros hidrológicos. Se aprecia que entre los parámetros Sw, RRF y Ks existe una alta correlación positiva respecto a la misma dimensión, muy por el contrario, la correlación respecto a f es altamente negativa en relación con Sw, RRF y Ks. Esto indicaría que tal vez no sería estrictamente necesario modelar o efectuar un análisis en las componentes principales con los cuatro parámetros, sino que bastaría realizar el PCA tan solo con uno que represente al resto de parámetros, como, por ejemplo, f o Ks, f o Sw inclusive f o RRF.

Esta correlación cruzada entre variables apoya la idea de utilizar herramientas como el PCA para extraer la información más representativa (dejando el ruido de lado) sin perder mucha variabilidad a la hora de construir las distintas URH para el modelado hidrológico.

Realizado el PCA el siguiente paso es determinar el número óptimo de clúster o URH para la modelación hidrológica. La figura 5.17 muestra la proporción de la varianza interna en relación con la varianza total, donde la mayor disminución de la varianza ocurre para una delimitación con cinco clúster, luego aumenta mínimamente para seis clúster para luego disminuir sutilmente hasta los diez clúster. Una disminución en la varianza interna significa que la homogeneidad de los valores dentro de cada grupo aumenta al igual que lo hace la heterogeneidad entre los grupos. En otras palabras, una disminución en la varianza interna es reflejo de que los valores que componen un clúster son más parecidos entre sí y distintos a los valores de otros clúster, es decir, se esperaría que el comportamiento hidrológico entre las distintas URH sea más heterogéneo y simultáneamente más homogéneo dentro de cada URH.

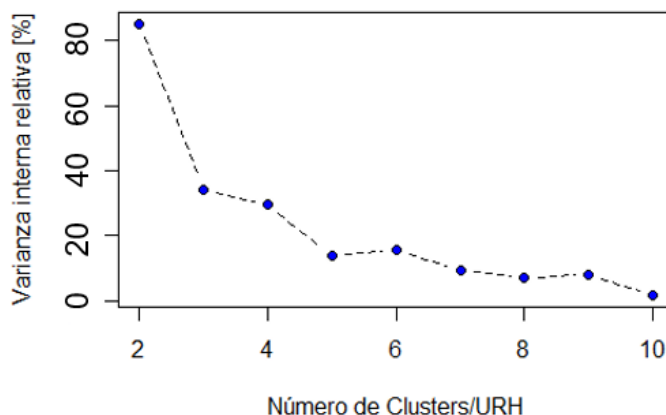


Figura 5.17 - Varianza relativa interna para cada número de clúster o URH.

5.1.2.2. Aplicación del HCPC dentro de las cuencas

Establecida la cantidad óptima de URH dentro de las cuencas, el siguiente paso consiste en la delimitación de los clúster correspondientes en base a la metodología descrita en la Sección 3.3. Es importante mencionar que se probará la metodología en tres casos distintos, es decir, para tres, cinco y seis clúster respectivamente. Los resultados de las tres delimitaciones se muestran a continuación en las Figuras 5.18, 5.19 y 5.20.

Delimitación por PCA/HCPC para 3 Cluster

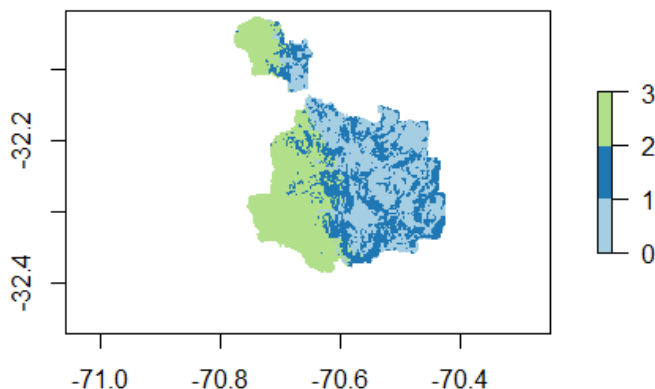


Figura 5.18 - Representación de las URH de la parte alta de las cuencas de Ligua-Petorca. Delimitación por 3 clúster.

Delimitación por PCA/HCPC para 5 Cluster

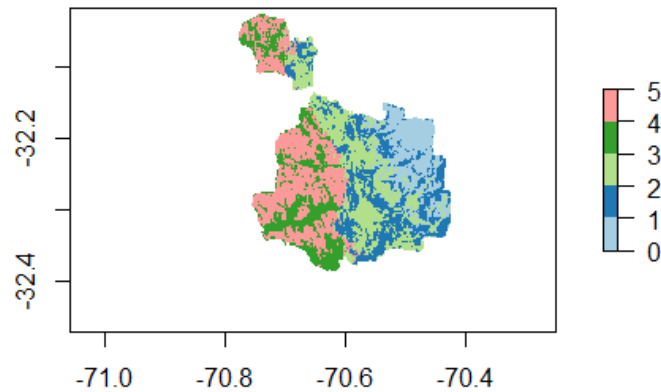


Figura 5.19 - Representación de las URH de la parte alta de las cuencas de Ligua-Petorca. Delimitación por 5 clúster.

Delimitación por PCA/HCPC para 6 Cluster

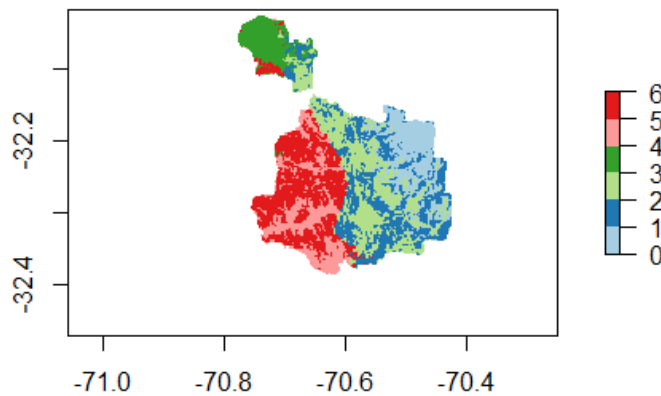


Figura 5.20 - Representación de las URH de la parte alta de las cuencas de Ligua-Petorca. Delimitación por 6 clúster.

Inspeccionando las tres figuras se logra ver claramente las distintas regiones de delimitación (URH) generadas en cada caso. Las delimitaciones están claramente definidas por la distribución de las temperaturas en la zona. Esto se puede contrastar revisando la Figura 5.20, que diferencia claramente una zona de valles (clúster 4, color verde oscuro) de una zona de laderas (clúster 1 y 2, celeste y azul) donde las temperaturas medias registradas en dichas zonas (ver Figura 4.8) son significativamente menores. O directamente se pueden comparar las Figuras 5.19 y 4.8 donde claramente se observa que las tres áreas generadas (en la Figura 5.19) siguen claramente la misma distribución de temperaturas que la Figura 4.8.

Cabe mencionar que, si bien las delimitaciones se encuentran influenciadas en mayor parte por las temperaturas, no es indicativo que el resto de las variables no sean consideradas a la hora de delimitar, muy por el contrario, todas las variables contribuyen al proceso de delimitación a diferencia del método de delimitación clásica donde solo se utilizan bandas de elevación para definir las distintas URH actuantes dentro de la modelación hidrológica. Esto eleva la actual metodología por sobre la clásica a la hora de delimitar, ya que el concepto de delimitación queda ligado directamente a una combinación de factores que dan como resultado URH homogéneas internamente y heterogéneas entre ellas.

5.1.3. Construcción del modelo hidrológico

Los datos de SIG y los datos climatológicos obtenidos deben ser procesados antes de ser incorporados en WEAP. Por ejemplo, un DEM es esencial para alimentar el modelo, pero debe ser analizado para obtener los datos de área de los distintos “catchments”. De igual manera, los datos climatológicos deben ser analizados respecto a la cobertura de la zona y convertidos al paso de tiempo seleccionado para el modelo [34].

Las indicaciones presentadas con anterioridad son válidas para la construcción de un modelo clásico. En estos modelos se suele utilizar como base para su delimitación las distintas bandas de elevación para asignar los catchments. Estos catchments son los que constituyen las unidades hidrológicas sobre las cuales WEAP aplica ciertas rutinas que van desde el cálculo de la evapotranspiración, hasta la escorrentía superficial y flujo base. Los catchments además en una delimitación clásica pueden ser subdivididos dependiendo de su cobertura vegetal para lograr una mejor representación de los procesos hidrológicos en diferentes tipos de cultivo y suelos. Una vez obtenidos los catchments, sus áreas y su distribución de cobertura vegetal, se puede generar el esquema dentro de WEAP.

Para el presente estudio, la delimitación de los distintos elementos catchment es descrita por medio de las URH obtenidas en la sección 5.1.2.2 por medio del PCA/HCPC. No obstante, el procesamiento de los datos climatológicos se realizará siguiendo las indicaciones presentadas al principio de la sección.

Usando el software QGIS se logra hacer la delimitación de las distintas áreas de interés donde son asignados los distintos elementos tipo catchment y la discretización del área por subcuenca de las distintas URH. Las conceptualizaciones del modelo WEAP para tres, cinco y seis URH son presentadas en las Figuras 5.21, 5.22 y 5.23:

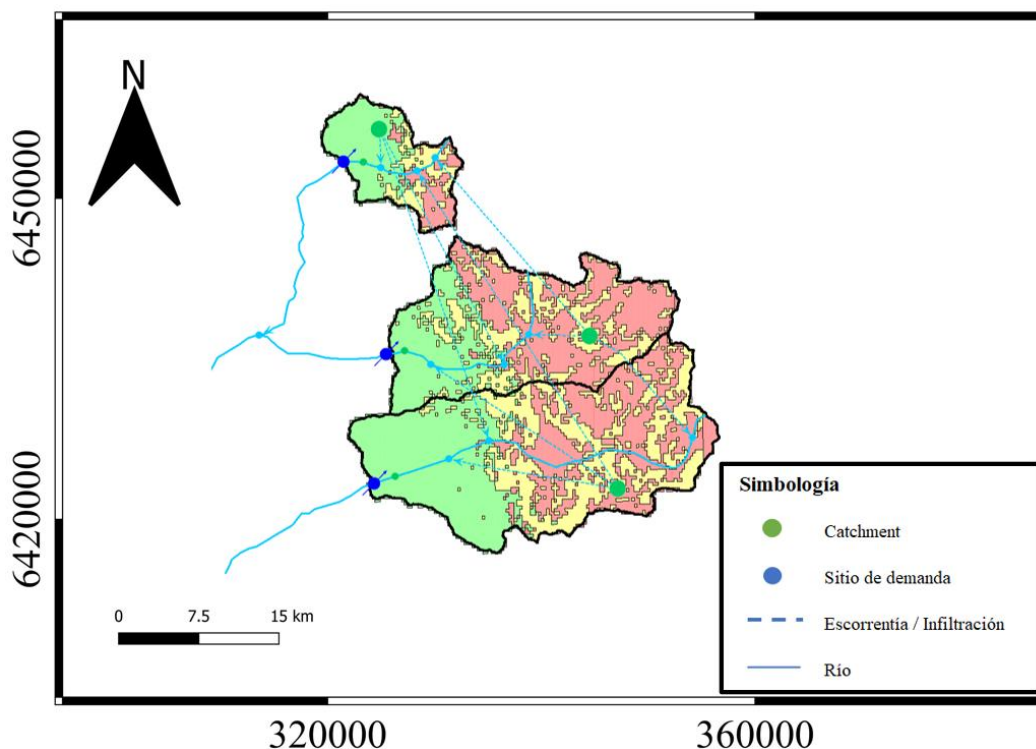


Figura 5.21 - Conceptualización de las tres subcuencas altas de Ligua-Petorca en WEAP. Para una delimitación con 3 URH.

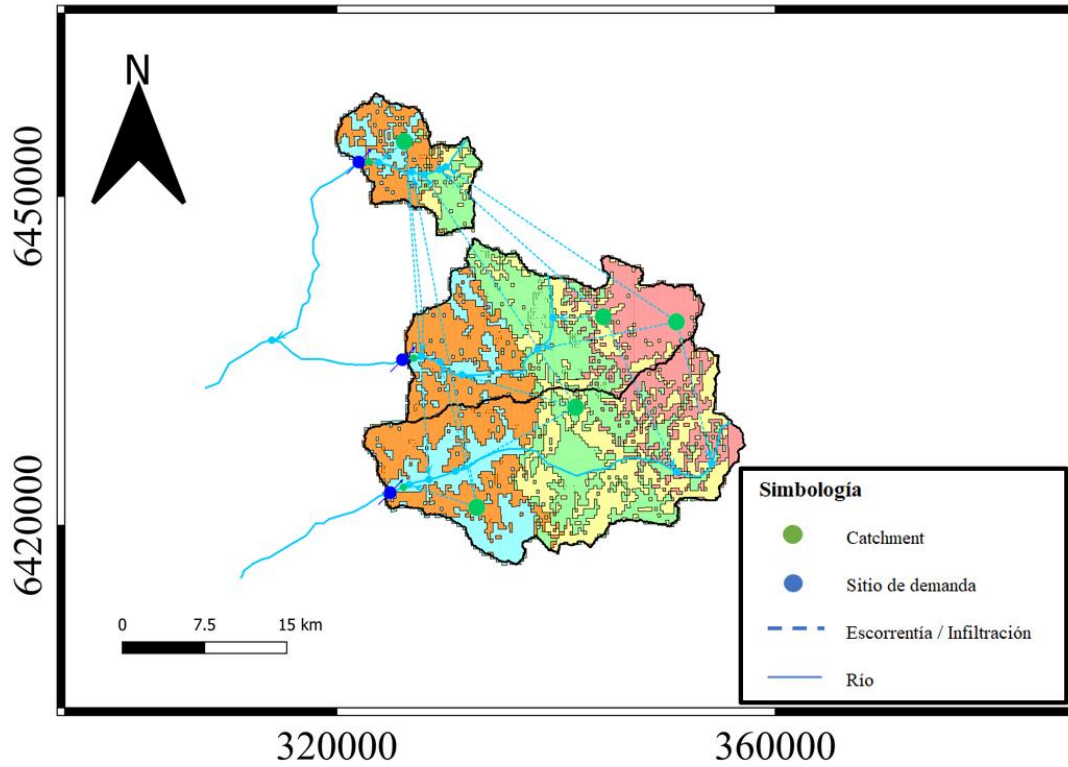


Figura 5.22 - Conceptualización de las tres subcuencas altas de Ligua-Petorca en WEAP. Para una delimitación con 5 URH.

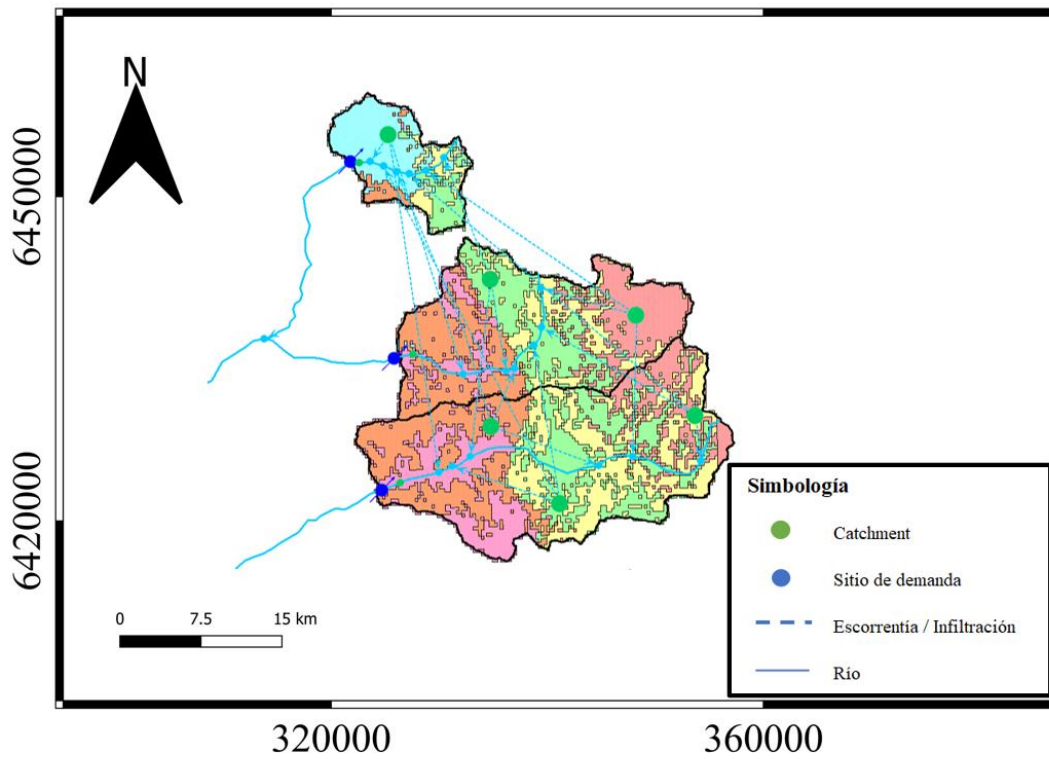


Figura 5.23 - Conceptualización de las tres subcuencas altas de Ligua-Petorca en WEAP. Para una delimitación con 6 URH.

En las Tablas 5.5, 5.6 y 5.7 se detallan el área por subcuenta y clúster para cada delimitación. Dicho proceso se llevó a cabo mediante el set de “herramientas de geoprocso” del software QGIS.

Tabla 5.5 Área total y su porcentaje correspondiente por subcuenta y unidad hidrológica. Caso de tres URH.

Área [km ²]				
Unidad hidrológica	Pedernal	Sobrante	Alicahue	Total
1	17.5	107.5	83.5	208.6
	8%	52%	40%	100%
2	18.6	67.8	144.7	231.1
	8%	29%	63%	100%
3	45.2	74.1	121.8	241.1
	19%	31%	51%	100%

Tabla 5.6 Área total y su porcentaje correspondiente por subcuenta y unidad hidrológica. Caso de cinco URH.

Área [km ²]				
Unidad hidrológica	Pedernal	Sobrante	Alicahue	Total
1	0.0	56.3	45.9	102.2
	0%	55%	45%	100%
2	9.9	38.5	93.4	141.7
	7%	27%	66%	100%
3	18.8	62.2	74.6	155.6
	12%	40%	48%	100%
4	20.2	25.3	59.2	104.7
	19%	24%	57%	100%
5	32.6	64.9	77.8	175.4
	19%	37%	44%	100%

Tabla 5.7 Área total y su porcentaje correspondiente por subcuenta y unidad hidrológica. Caso de seis URH.

Área [km ²]				
Unidad hidrológica	Pedernal	Sobrante	Alicahue	Total
1	0.0	55.5	40.3	95.8
	0%	58%	42%	100%
2	10.9	38.2	93.5	142.6
	8%	27%	66%	100%
3	14.4	58.1	75.9	148.5
	10%	39%	51%	100%
4	49.5	4.5	0.8	54.8
	90%	8%	1%	100%
5	0.5	25.9	59.5	85.9
	1%	30%	69%	100%
6	6.0	65.2	80.0	151.2
	4%	43%	53%	100%

Conocido el aporte de área por cada unidad hidrológica (para los tres casos) se prosigue con el procesamiento de los datos climáticos. El primer paso es establecer la extensión en años y cantidad de datos con que se desea realizar el modelamiento. Para el presente estudio, la extensión va desde 1979 hasta 2019 para los datos climáticos. Y desde 1979 hasta 2018 para los datos fluviométricos. Por lo general, se utilizan estaciones pluviométricas y climatológicas para la obtención de los datos de entrada, para el presente caso estos datos fueron extraídos directamente de los archivos en formato NetCDF procesados en la sección 4.2. De esta forma, estableciendo la extensión de los datos se puede determinar el periodo de modelación para la calibración, el cual debe ser establecido sobre los años en que los datos de precipitación, temperatura y caudales coinciden [34], es decir, desde 1979 hasta 2018.

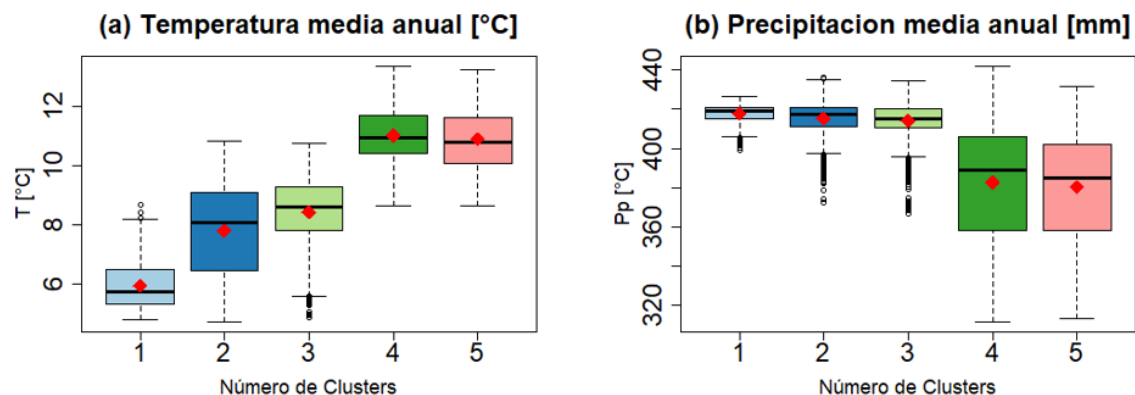
El siguiente paso es procesar los datos de modo que estén en el paso de tiempo del modelo. El presente trabajo efectuará su modelación en un paso de tiempo mensual, no obstante, los datos que fueron ingresados al modelo están en un paso diario, por lo que debieron ser convertidos a paso de tiempo mensual. WEAP permite transformar los datos al paso de tiempo que se desee, por lo cual, al ingresar los datos con un paso de tiempo diario, internamente WEAP permite un cambio a nivel semanal, mensual e incluso anual.

En un modelo clásico se debe realizar un análisis de uso de suelo por cada banda de elevación por subcuenca, analizando el número de categorías de la cobertura original y reducirlo, si es necesario, para disminuir el esfuerzo en el desarrollo y la calibración del modelo. Posteriormente, la cobertura de vegetación reducida es interceptada con cada banda de elevación por subcuenca, para finalmente obtener la distribución espacial de coberturas en la cuenca [34].

La actual metodología, muy por el contrario, no depende de las bandas de elevación ni de las coberturas presentes en cada una de ellas. Internamente, cada uno de los mapas de parámetros hidrológicos generados contiene dicha información de manera implícita. Para la generación de cada mapa se utilizó la combinación lineal de los tres indicadores o clases fisiográficas de la zona, iP, iV e iS. Donde cada indicador depende de la cobertura vegetal, el tipo de suelo y la pendiente de la cuenca (sección 5.1.1).

5.1.4. Descripción de los elementos dentro del modelo hidrológico

La Figura 5.24 muestra el diagrama de caja para los valores de las variables seleccionadas por cada URH (clúster) con el objetivo resaltar las diferencias entre ellas. Por ejemplo, el clúster 1 posee las temperaturas más bajas y a la vez posee una de las tasas de precipitación más altas. Por su parte el clúster 4 es el más cálido de todos y posee la segunda mayor tasa de sequedad, sumado a esto posee el mayor índice de capacidad de almacenamiento, esto principalmente puede deberse a que corresponde a una zona de valles, donde los suelos tienden a ser más permeables (según el mapa de clase de permeabilidad iP, dicha zona posee la mayor permeabilidad, ver Figura 5.4), profundos y tienen un mayor factor de resistencia a la escorrentía y conductividad hidráulica.



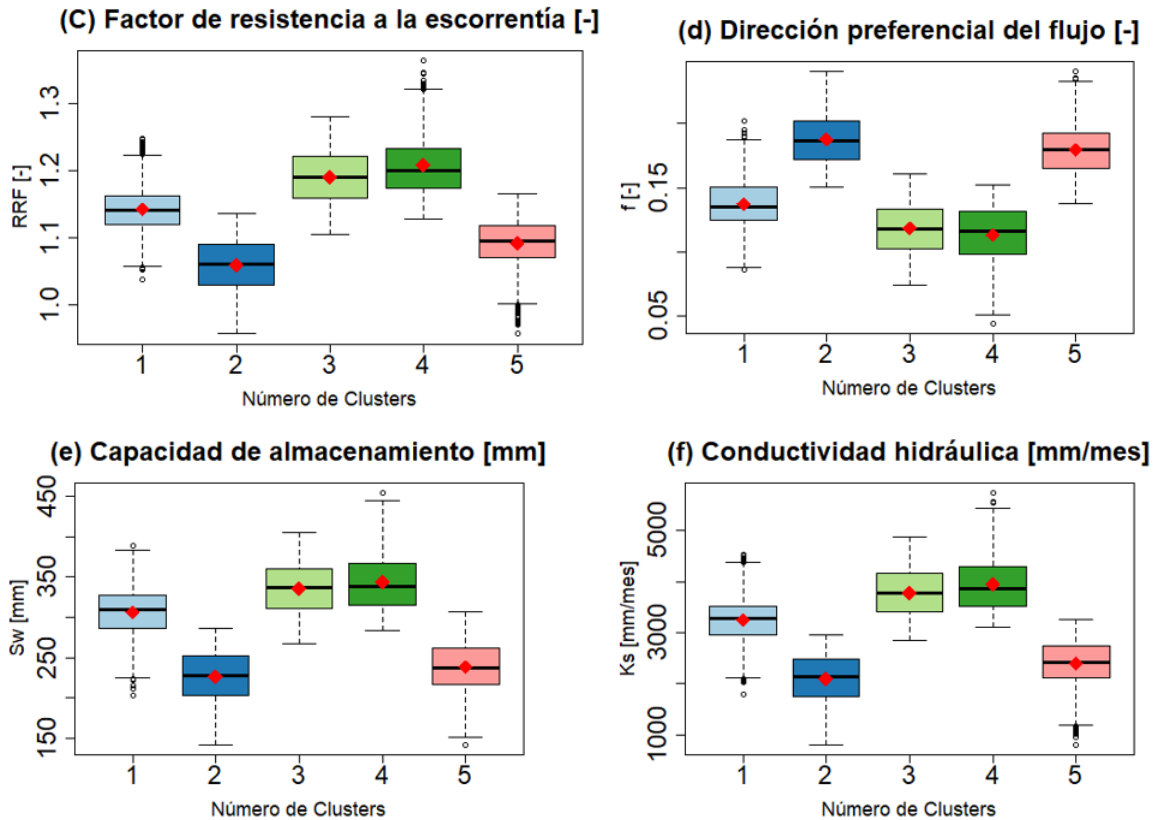


Figura 5.24 - Diagramas de caja por variable una delimitación con 5 clúster.

El clúster 2 es el segundo más frío y con mayor tasa de precipitaciones. En él se alcanzan los mayores valores de dirección preferencial del flujo a la vez que los menores valores de capacidad almacenamiento y conductividad hidráulica, esto puede deberse principalmente a que se trata de una zona de laderas con altas pendientes y tasas de drenaje.

5.1.5. Configuración del modelo hidrológico WEAP

Para correr el modelo y probar los mapas generados se obtuvo un set de datos aplicando un promedio a los parámetros hidrológicos que conformaban cada celda de una URH correspondiente generada mediante el HCPC. Posteriormente, cada uno de los valores promedio fue ingresado al modelo hidrológico por medio de “key assumptions”³.

Los valores promedio por URH para cada parámetro hidrológico son los que se presentan en las Tablas 5.8, 5.9 y 5.10:

³ Las key assumptions constituyen una de las herramientas básicas en WEAP. Estas pueden ser usadas con diferentes propósitos dentro de la construcción del modelo. Por ejemplo, en las key assumptions se pueden incorporar los parámetros de uso de suelo utilizados en la calibración del modelo. Las key assumptions también pueden ser empleadas para la creación de funciones para obtener series de tiempo de precipitación y temperatura en todos los catchments del modelo a partir de las estaciones base [34].

Tabla 5.8 Set de datos asociados a los parámetros hidrológicos para una delimitación con 3 URH.

HRU	Sw [mm]	RRF [-]	Ks [mm/mes]	f [-]
1	329.97	1.18	3664.80	0.12
2	226.99	1.06	2123.82	0.19
3	287.95	1.15	3144.90	0.15

Tabla 5.9 Set de datos asociados a los parámetros hidrológicos para una delimitación con 5 URH.

HRU	Sw [mm]	RRF [-]	Ks [mm/mes]	f [-]
1	306.28	1.14	3253.63	0.14
2	226.27	1.06	2097.01	0.19
3	335.49	1.19	3781.26	0.12
4	343.43	1.21	3951.94	0.11
5	237.94	1.09	2400.97	0.18

Tabla 5.10 Set de datos asociados a los parámetros hidrológicos para una delimitación con 6 URH.

HRU	Sw [mm]	RRF [-]	Ks [mm/mes]	f [-]
1	303.91	1.14	3216.29	0.14
2	226.49	1.06	2102.20	0.19
3	337.92	1.19	3817.51	0.12
4	289.53	1.15	3157.79	0.15
5	347.31	1.21	4002.26	0.11
6	235.15	1.09	2359.04	0.18

Es importante destacar que el set de parámetros anterior solo corresponde a los parámetros del balde superior del método de humedad del suelo. Este, al ser un modelo simplificado que busca la optimización y representatividad al costo de un menor uso de información únicamente utilizó valores constantes para el balde inferior, punto de fusión y congelamiento. En el caso del coeficiente de cultivo se usaron valores estándar FAO [25] mensuales amplificados. El detalle de los valores utilizados en cada caso se presenta a continuación en la Tabla 5.11 y Figura 5.25:

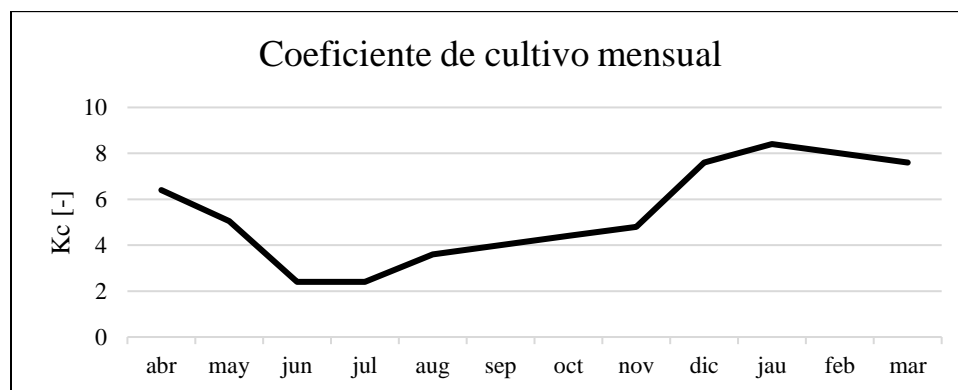


Figura 5.25 - Coeficiente de cultivo mensual utilizado en la modelación.

Tabla 5.11 Set de variables y parámetros de calibración utilizados para los tres casos de delimitación.

Variable /Parámetro	URH [1-6]
Dw [mm]	1500
Kd [mm/mes]	2000
Z1 [%]	30
Z2 [%]	30
Punto de fusión [°C]	9.1
Punto de congelación [°C]	2.1

Finalmente, una vez establecido el set de parámetros que se utilizará se prosigue a correr el modelo WEAP para obtener las respuestas simuladas en cada estación fluviométrica en el rango de aplicación correspondiente, es decir, a escala mensual, para un período comprendido entre 1979 al 2018.

A continuación, en las Figuras 5.26 a la 5.34 se presentan las comparaciones entre los caudales simulados y observados en las estaciones fluviométricas presentes en la zona de estudio.

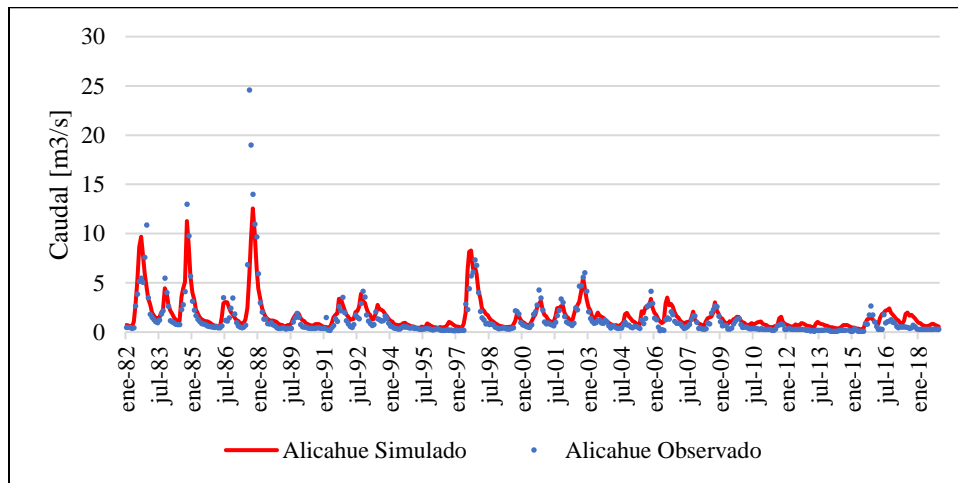


Figura 5.26 - Comparativa entre caudales para la estación fluviométrica en Alicahue, para 3 URH.

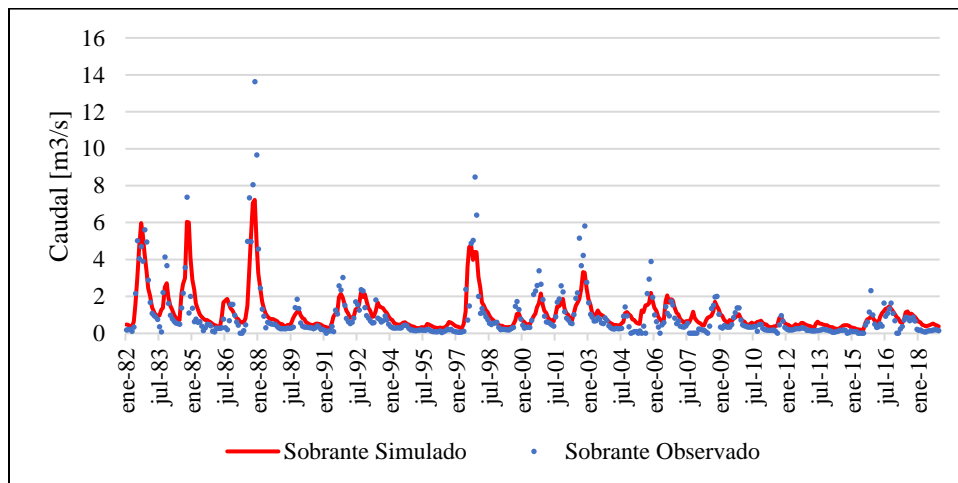


Figura 5.27 - Comparativa entre caudales para la estación fluviométrica en Sobrante, para 3 URH.

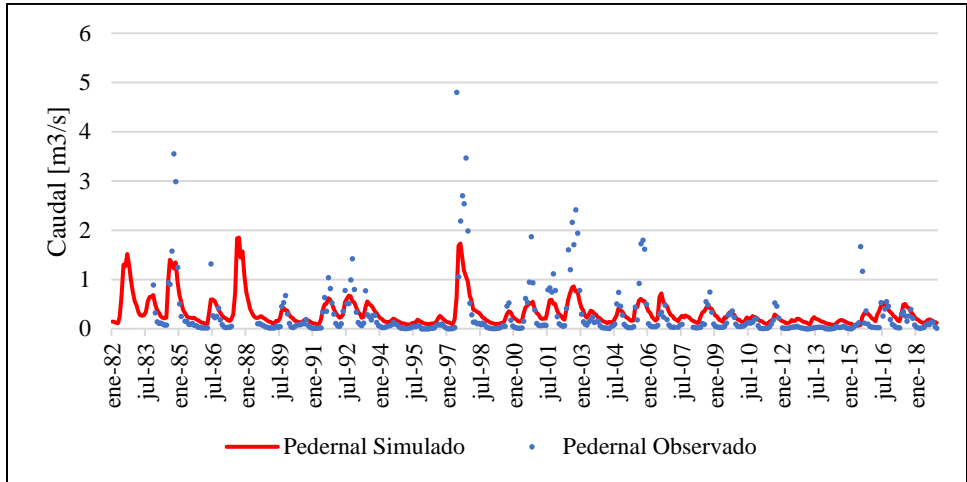


Figura 5.28 - Comparativa entre caudales para la estación fluviométrica en Pedernal, para 3 URH.

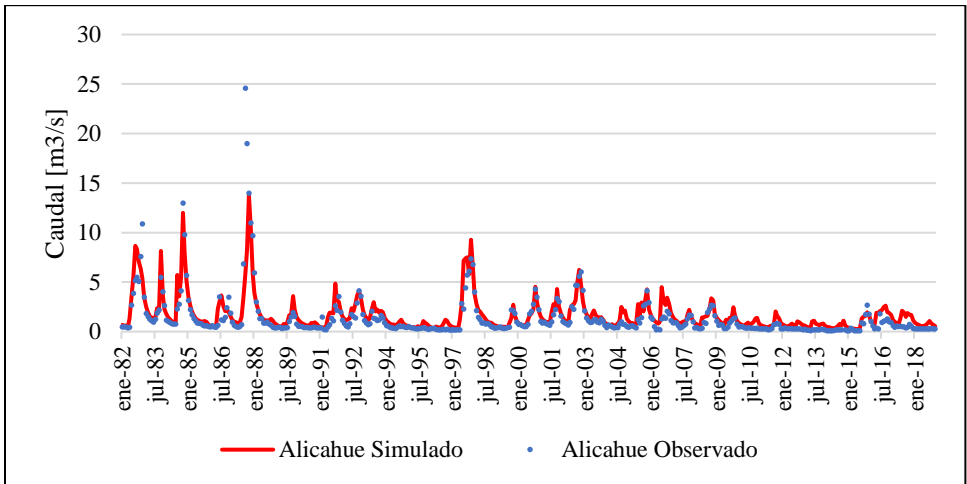


Figura 5.29 - Comparativa entre caudales para la estación fluviométrica en Alicahue, para 5 URH.

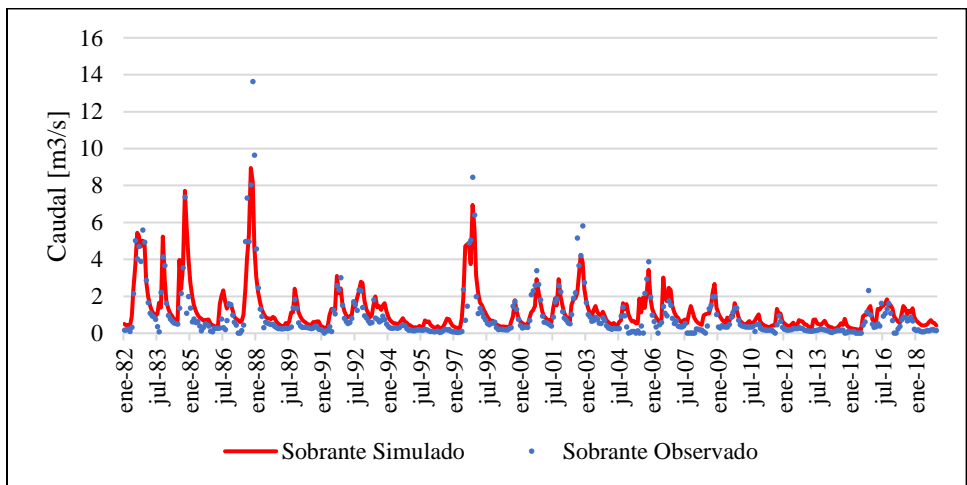


Figura 5.30 - Comparativa entre caudales para la estación fluviométrica en Sobrante, para 5 URH.

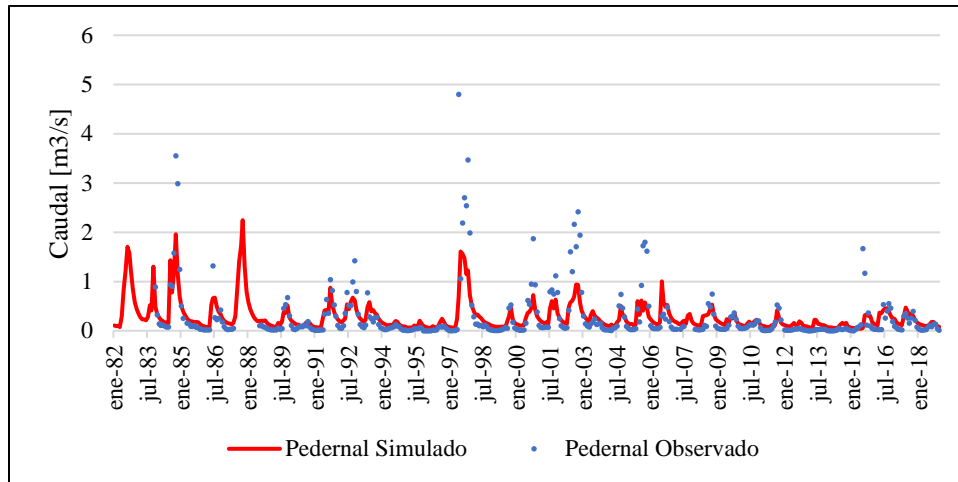


Figura 5.31 - Comparativa entre caudales para la estación fluviométrica en Pedernal, para 5 URH.

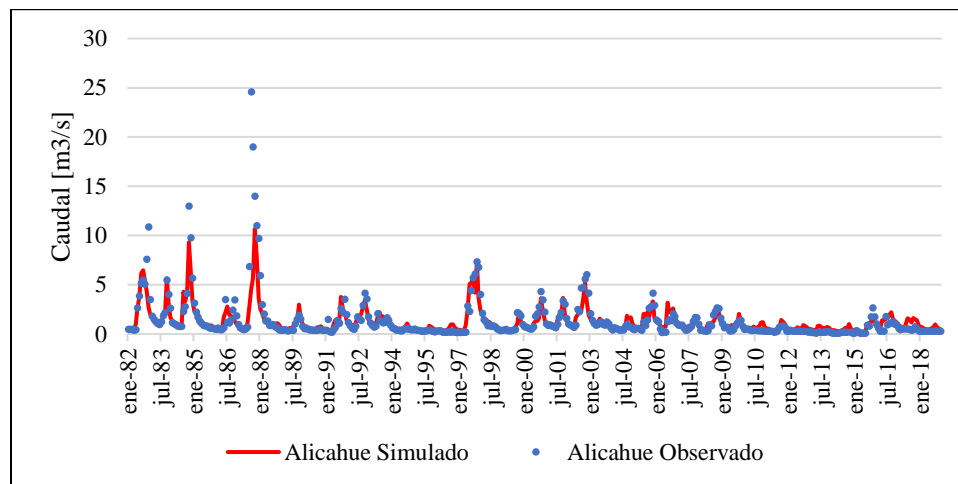


Figura 5.32 - Comparativa entre caudales para la estación fluviométrica en Alicahue, para 6 URH.

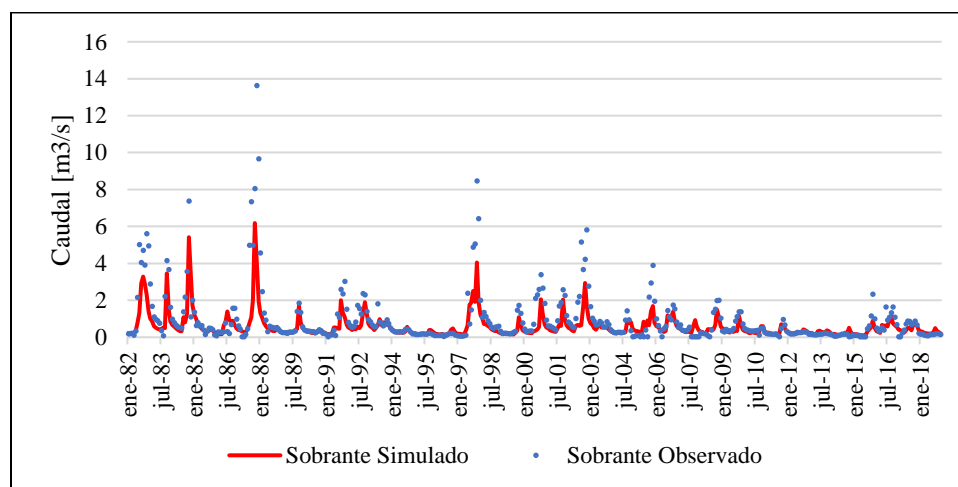


Figura 5.33 - Comparativa entre caudales para la estación fluviométrica en Sobrante, para 6 URH.

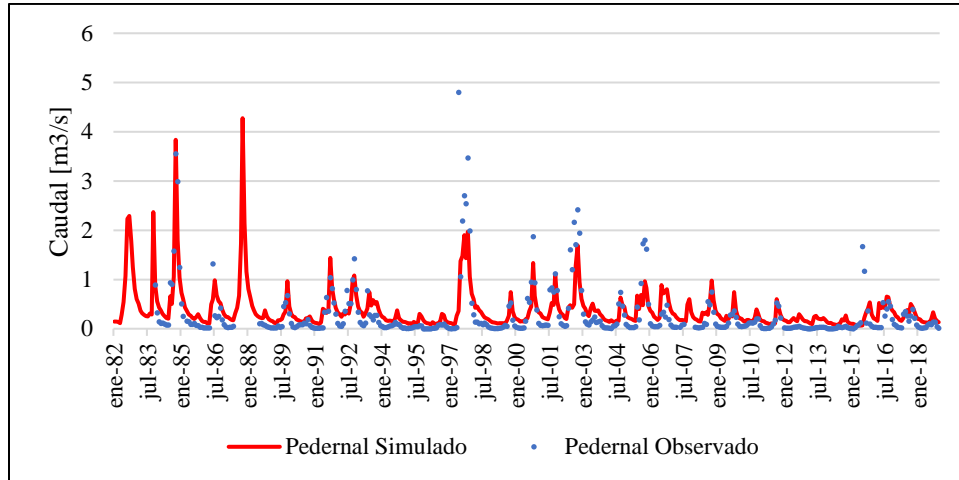


Figura 5.34 - Comparativa entre caudales para la estación fluviométrica en Pedernal, para 6 URH.

5.2. Análisis mediante indicadores de eficiencia y tiempos de simulación

Una vez obtenidas las respuestas para cada caso, se realiza la comparación de los caudales modelados con los registros históricos pertenecientes a las estaciones fluviométricas de la zona de estudio. Para poder establecer el grado de correspondencia que existe entre los valores de cada estación y los valores que se modeló se emplearon tres índices o métricas para ajustar modelos hidrológicos: eficiencia de Nash-Sutcliffe normal y logarítmica, coeficiente de determinación y criterio de Kling-Gupta.

Los distintos valores de ajustes para cada caso se presentan a continuación en las Tablas 5.12, 5.13 y 5.14:

Tabla 5.12 Rendimiento del modelo WEAP evaluado mediante tres indicadores de eficiencia, para una delimitación en base a 3 URH.

3 URH		
Alicahue	Sobrante	Pedernal
NS = 0.60	NS = 0.66	NS = 0.62
R ² = 0.68	R ² = 0.70	R ² = 0.62
KGE = 0.61	KGE = 0.63	KGE = 0.53
NSLog=0.28	NSLog=0.15	NSLog=0.10

Tabla 5.13 Rendimiento del modelo WEAP evaluado mediante tres indicadores de eficiencia, para una delimitación en base a 5 URH.

5 URH		
Alicahue	Sobrante	Pedernal
NS = 0.67	NS = 0.73	NS = 0.55
R ² = 0.69	R ² = 0.75	R ² = 0.66
KGE = 0.66	KGE = 0.70	KGE = 0.46
NSLog=0.52	NSLog=0.25	NSLog=0.17

Tabla 5.14 Rendimiento del modelo WEAP evaluado mediante tres indicadores de eficiencia, para una delimitación en base a 6 URH.

6 URH		
Alicahue	Sobrante	Pedernal
NS = 0.62	NS = 0.63	NS = 0.62
R ² = 0.66	R ² = 0.65	R ² = 0.65
KGE = 0.61	KGE = 0.61	KGE = 0.60
NSLog=0.50	NSLog=0.25	NSLog=0.13

Al revisar cada uno de los valores, es posible observar que los indicadores obtenidos por parte de las respuestas hidrológicas simuladas presentan valores aceptables y relativamente apropiados en relación con los criterios detallados en la sección 2.3.

La Tabla 5.12 muestra los valores obtenidos para una delimitación con base en 3 URH. Se aprecia que en las tres subcuencas los caudales se ajustaron de buena manera. Cabe destacar que se obtuvo valores relativamente similares, exceptuando Pedernal, específicamente por parte del índice KGE con un valor de 0.53. Posiblemente dicho comportamiento se deba a que la representación de los caudales en ciertos tramos no sigue la tendencia de la respuesta observada, esto principalmente por la falta de datos en la serie de tiempo (observada).

Al verificar los valores obtenidos en la Tabla 5.13 se observa que para una delimitación con 5 URH el caso más deficiente se obtuvo por parte de la respuesta hidrológica simulada en la subcuenca del río Pedernal, con un NS de 0.55 en relación con el caudal observado. Con una gran mejoría le sigue la subcuenca perteneciente al estero Alicahue, con un NS de 0.67 lo cual se traduce en una buena respuesta hidrológica simulada. Finalmente, la mejor representación de la respuesta simulada fue obtenida en la subcuenca del río Sobrante, con un NS de 0.73, considerada como una respuesta muy buena. Por el contrario, al igual que como ocurrió para una delimitación con 3 URH el índice KGE entregó el peor de los resultados, principalmente a la falta de datos observados en dicha estación.

La Tabla 5.14 a diferencia de los dos casos anteriores, representa de buena manera la respuesta hidrológica simulada en las tres estaciones, obteniendo valores relativamente similares para cada evaluación realizada.

Un aspecto importante que destacar corresponde a los valores obtenidos al evaluar la respuesta hidrológica simulada mediante escalas logarítmicas, es decir, por medio de NSLog. Se puede observar en los tres casos que para tal indicador los valores resultantes se encuentran bajo la media en comparación al resto (NS, R² y KGE), esto se debe principalmente, ya que, a la hora de generar los mapas de parámetros hidrológicos, las iteraciones empleadas no fueron hechas tomando en consideración caudal en escalas logarítmicas, simplemente se iteró y ajustó la generación de mapas considerando los caudales en escala convencional. Se observa también que para delimitaciones con mayor número de URH el comportamiento en escalas logarítmicas mejora sustancialmente, principalmente entre 3 y 5 URH, siendo en esta última delimitación donde se obtuvo los mejores ajustes entre la respuesta hidrológica simulada y observada.

Los tiempos de simulación para los tres casos resultaron ser satisfactorios. El software WEAP no superó los 10 segundos en computar resultados, lo cual vuelve al modelo cómodo y eficiente a la hora de manipularlo.

CAPÍTULO VI

6. Análisis de resultados

En este capítulo se da conocer los resultados de calibración y validación del modelo hidrológico delimitado mediante 5 URH. Se revisará los distintos sets de parámetros de calibración utilizados y su respectivo ajuste con la respuesta hidrológica observada. Para ello se realizará un análisis de sensibilidad de los principales parámetros hidrológicos, observando el efecto que estos provocan sobre la respuesta simulada. Posteriormente, se adoptará una estrategia de mejoramiento, la cual será medida comparando la respuesta total observada y simulada. Finalmente, son entregadas algunas consideraciones de mejoramiento y se comparará la eficiencia computacional del modelo final. En la Figura 6.1 se muestra un diagrama de flujo de los principales puntos del capítulo.

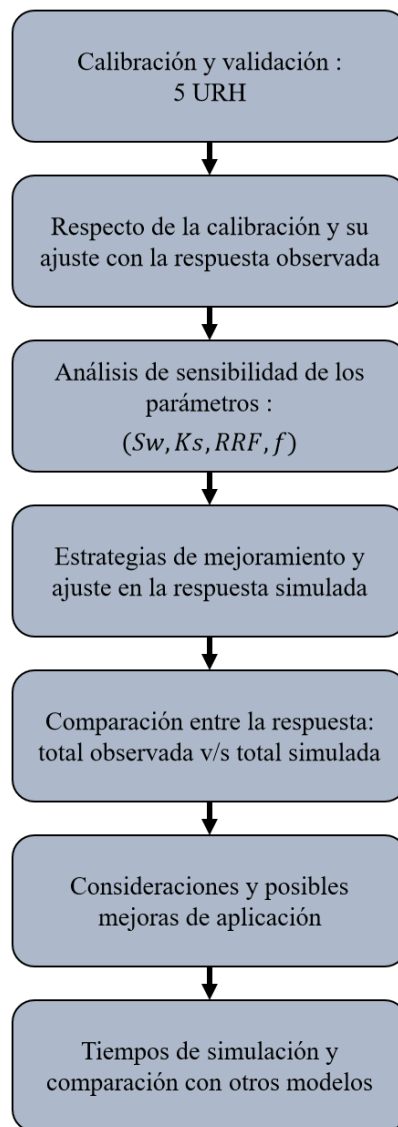


Figura 6.1 - Diagrama de flujo con los principales puntos de análisis del presente capítulo.

6.1. Calibración y validación del modelo

Para el proceso de calibración se toma como condición inicial el set de parámetros generados mediante la metodología PCA/HPCPC y detallado en la sección 5.1.5. Es de acuerdo a este conjunto de datos es que se comienza a iterar de manera manual mediante el concepto de prueba y error hasta lograr el mejor ajuste posible entre la información observada y simulada en la estación fluviométrica correspondiente.

6.1.1. Estrategia de mejoramiento en la respuesta hidrológica simulada

Al inspeccionar con detenimiento el comportamiento en la respuesta hidrológica simulada mediante el set de parámetros inicial detallado en la Tabla 5.9 y representado en las Figuras 5.29 a 5.31 se pueden concluir dos puntos importantes. El primero a destacar viene asociado a la buena interpretación por parte del método para representar la respuesta hidrológica simulada en periodos de mayor tasa de caudales (años más húmedos). Tal como se muestra en la Figura 6.2, al realizar una inspección visual se puede ver como las tendencias descritas por ambas series (simulada y observada) resultan ser muy similares en periodos donde se alcanzan caudales de hasta 10 [m³/s]. Se logra apreciar que la serie simulada representa de manera acertada el comportamiento de los caudales pico, intermedios e incluso los bases.

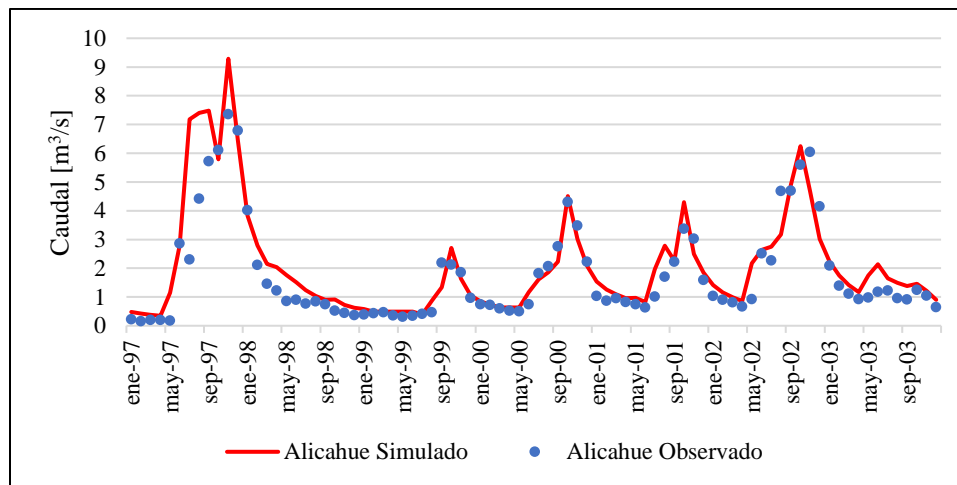


Figura 6.2 - Comparativa entre caudales para la estación fluviométrica del estero Alicahue entre enero de 1997 y diciembre del 2003, para una delimitación en base a 5 URH.

En la Figura 6.3 se observa un comportamiento totalmente opuesto por parte de la respuesta hidrológica simulada. Es por ello por lo que, para demostrar el mal comportamiento del método en la simulación de caudales en periodos de escasez hídrica, se escogió el periodo de tiempo comprendido entre enero de 2010 hasta diciembre de 2016, período que dio lugar a la “Mega sequía de Chile del 2010” [54]. Se logra distinguir el comportamiento deficiente que simula el método a bajas tasas de caudal, sobredimensionando la respuesta hidrológica a lo largo de todo el período de análisis. Se observa también que en ningún paso de tiempo la respuesta simulada logra asemejarse a la observada, presentando picos ficticios en periodos de tiempo donde la respuesta observada se encuentra sin alzas en los caudales, como se observa en noviembre del 2010.

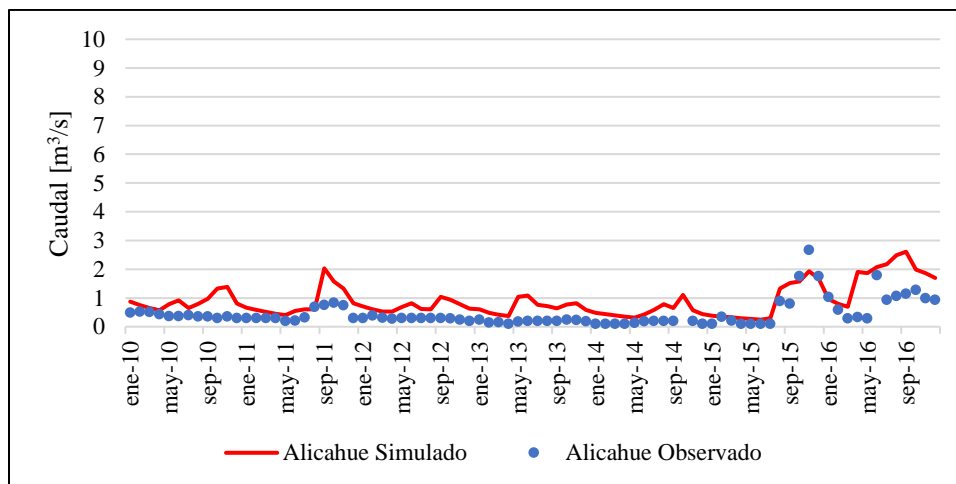


Figura 6.3 - Comparativa entre caudales para la estación fluviométrica del estero Alichue entre enero de 2010 y diciembre del 2016, para una delimitación en base a 5 URH.

Para demostrar lo anteriormente descrito, en la Tabla 6.1 se presenta la diferencia porcentual entre ambos comportamientos. Se puede observar que para el período comprendido entre ene-97 a dic-03 la diferencia porcentual entre la media simulada y observada es de un 15%, lo cual demuestra que la metodología simula de forma certera el comportamiento en períodos de abundancia hídrica. A pesar de que la respuesta esté sobredimensionada, lo hace a una tasa muy baja (15%), conservando la representación de los caudales a lo largo del período comprendido. Muy por el contrario, en escenarios de escasez hídrica, como el ocurrido entre ene-10 a dic-16, la diferencia porcentual entre el promedio de la respuesta simulada y observada es de un 50%. Esto se puede interpretar en que la metodología en períodos de escasez hídrica sobredimensiona el doble la respuesta hidrológica simulada, entregando un comportamiento deficiente bajo escenarios de escasez.

Tabla 6.1 Caudal medio simulado, observado y diferencia porcentual en el período de análisis definido.

Comparación entre respuestas hidrológicas			
Período de análisis	Simulada [m³/s]	Observada [m³/s]	Diferencia
ene-97 a dic-03	2.10	1.80	15%
ene-10 a dic-16	0.90	0.45	50%

De acuerdo con todo lo anterior expuesto, se adoptó una estrategia de mejoramiento que es implementada a la par con el proceso de calibración que se realizó (ya que dicho comportamiento fue demostrado utilizando las respuestas hidrológicas simuladas con el set datos crudos entregados por la metodología PCA/HPCPC). Esta metodología tiene como objetivo principal suplir la falencia del método a la hora de representar los caudales en períodos de baja tasa. Para ello, dentro del software de modelación WEAP se ocupará una serie de sentencias condicionales “IF” usadas principalmente para evaluar una operación lógica. La mencionada sentencia condicional se usará en los parámetros hidrológicos que representen de mejor manera la respuesta hidrológica simulada, es decir aquellos parámetros que al variarlos modifiquen la respuesta hidrológica de mayor manera. Esta decisión se vio influenciada por una razón en particular, la tal razón se basa principalmente en que los parámetros hidrológicos no son constantes a lo largo de todo el año, muy por el contrario, estos presentan variaciones estacionales, dependiendo de las características del entorno, y las forzantes hidrometeorológicas a las que sean sometidos. Es por ello, que para los períodos donde el método presenta mayores dificultades al representar las respuestas hidrológicas se aplicara la sentencia IF, con el objetivo de establecer una variación de los parámetros en zonas de escasez hídrica. ¿Pero precisamente que criterio se deben considerar para poder establecer que una zona presenta mayor o menor escasez hídrica? Principalmente, se analizaron las tasas de humedad en el balde superior del método de la humedad del suelo, ya que serán dichos parámetros los que se utilizan para la modelación y a la vez estos mismos serán los que se condicionaran.

La Figura 6.4 muestra el porcentaje de la humedad del suelo del balde 1 para los distintos tipos de URH. En base a esta información serán establecidas las sentencias condicionales IF, es decir, en períodos donde la humedad del suelo no supera el 15%. Tal porcentaje se estimó mediante pruebas iterativas, se probó con umbrales del 5, 10, 15 y 20%, siendo un 15% el umbral que ajustaba la respuesta en caudales bajos de mejor forma. Será entonces en zonas inferiores al umbral seleccionado donde se hará variar aquellos parámetros hidrológicos que puedan ajustar la respuesta de la mejor manera posible.

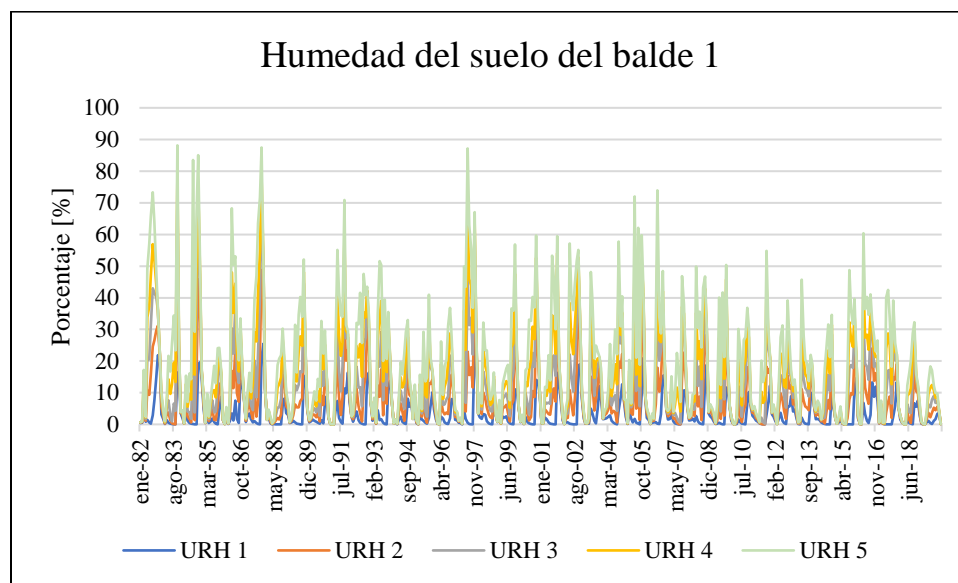


Figura 6.4 - Humedad del suelo del balde 1 en porcentaje para las distintas URH.

¿Qué parámetros hidrológicos deben ser condicionados? Para poder responder esta pregunta se debe realizar un análisis de sensibilidad en la respuesta hidrológica al variar cada uno de estos parámetros, estableciendo cuál o cuáles son los actores que influyen de mayor manera dentro la respuesta hidrológica simulada en períodos de caudales bajos.

6.1.2. Análisis de sensibilidad en los parámetros hidrológicos del balde superior del método humedad del suelo

Realizar un análisis de sensibilidad permitirá determinar la relación de los distintos componentes del balance hídrico del balde superior del modelo WEAP con respecto a los parámetros de calibración, permitiendo así tener un mejor conocimiento del modelo y de la respuesta hidrológica simulada.

El proceso utilizado para llevar a cabo este análisis de sensibilidad principalmente se basó en la modificación de las magnitudes de cada parámetro de calibración correspondiente a los parámetros hidrológicos del balde superior (S_w , K_s , RRF y f) como se mencionó con anterioridad. Para ello, se fue variando cada uno de los parámetros dentro de un rango admisible (contrastados en la Tabla 2.6) a la vez que se fijaba el resto con la intención de verificar que tan sensible era la respuesta hidrológica simulada respecto al parámetro modificado (en su URH correspondiente). Finalmente, una vez comprobada la sensibilidad en la respuesta simulada al variar cada uno de los cuatro parámetros, se concluyó que aquellos que poseían una mayor influencia correspondían ser: el factor de resistencia a la escorrentía RRF y la conductividad hidráulica en la zona de raíces K_s [mm/mes]. Respecto a la dirección preferencial del flujo, f y la capacidad de almacenamiento del suelo, S_w [mm], si bien, influían directamente en la respuesta hidrológica, llegado un punto de la calibración su influencia se volvía de segundo orden y despreciable respecto a los dos parámetros anteriormente señalados.

Una vez identificados los parámetros más influyentes dentro de la respuesta hidrológica, se retoma el punto abordado en la sección 6.1.1 (estrategias de mejoramiento) donde principalmente se indicó que aquellos parámetros que tuvieran una mayor influencia dentro de la respuesta hidrológica serían condicionados lógicamente mediante de una sentencia “IF” con el objetivo de mejorar el comportamiento de la respuesta en período de caudales bajos y manteniendo el comportamiento en períodos de caudales medios altos.

Para implementar esta mejora dentro del software WEAP se modificaron ciertos parámetros de la interfaz de datos. Al seleccionar el ramal “Demand Sites and Catchments” se despliega a la derecha una interfaz con 8 subpestañas de las cuales se deberá seleccionar “Land Use”. Posteriormente, se desplegarán una serie de casillas que detallan las características del uso de suelo del área de estudio, de las cuales se tendrán que seleccionar las asociadas a los parámetros que se modificarán, es decir, “Runoff Resistance Factor” y “Root Zone Conductivity”. Finalmente, dentro del recuadro que se despliega al seleccionar una o la otra se deben modificar los códigos en cada ramal correspondiente, como se muestra en la Figura 6.5 y 6.6.

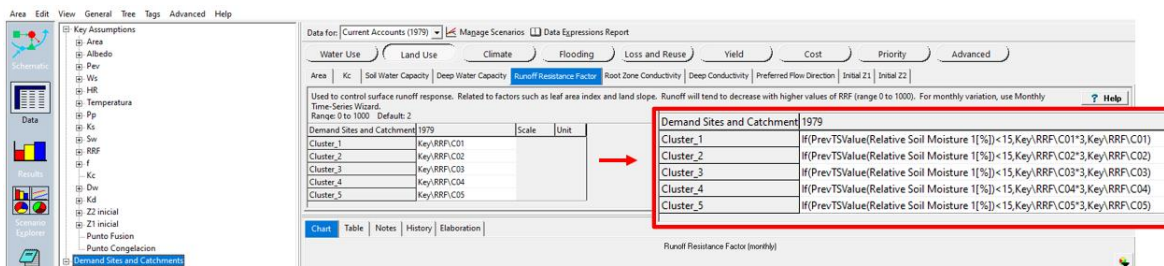


Figura 6.5 - Interfaz de datos del software de modelación WEAP. El recuadro de color rojo detalla la modificación efectuada para condicionar el parámetro asociado al factor de resistencia a la escorrentía RRF mediante una sentencia IF.

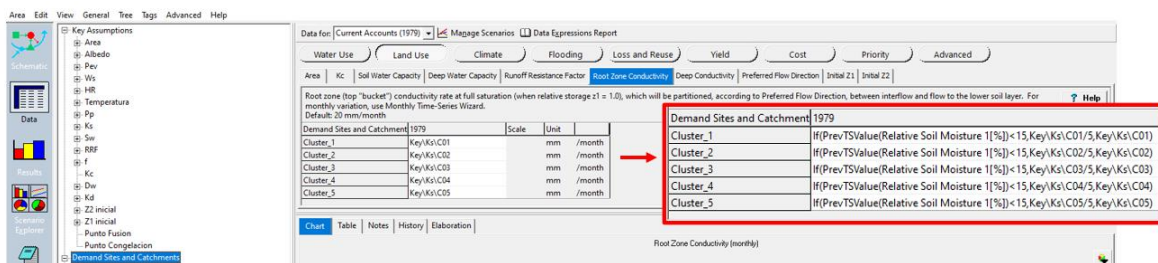


Figura 6.6 - Interfaz de datos del software de modelación WEAP. El recuadro de color rojo detalla la modificación efectuada para condicionar el parámetro asociado a la conductividad hidráulica en la zona de raíces Ks mediante una sentencia IF.

En la Figura 6.5 se puede observar la modificación efectuada al parámetro RRF mediante la sentencia condicional IF. El cambio realizado se basa principalmente en amplificar tres veces la magnitud del parámetro RRF cuando la tasa de humedad en el balde superior (Figura 6.4) no sobrepasaba el 15%. De igual forma, en la Figura 6.6 para tasas de humedad inferiores al 20% Ks se disminuyó cinco veces respecto a su valor original (en tasas de humedad superiores al 15%). De esta forma lo que se intenta ajustar es la respuesta en los caudales pico. Para ello se debe ajustar la escorrentía superficial, la cual es directamente afectada por el RRF y Ks, los cuales afectan la reactividad de los catchments [34].

El RRF se puede describir como la capacidad que tiene la cobertura del suelo para evitar que el flujo superficial se desplace libremente. En otras palabras, un RRF alto se esperaría encontrar en lugares donde la cobertura vegetal tiende a ser muy densa, como por ejemplo en bosques primarios, suelos cubiertos de hojas o con extensos follajes que impidan una transición del flujo superficial de manera deliberada. Este impedimento del flujo superficial da como resultado un achatamiento en los caudales pico de la respuesta hidrológica simulada, comportamiento que contrarrestaría la errática interpretación por parte de la metodología al generar picos ficticios en periodos secos como se presentó en la Figura 6.3.

En complemento, una reducción del parámetro Ks se interpreta como la reducción o impedimento en que el agua circule entre los distintos baldes. Es decir, para valores de Ks menores, el flujo base disminuirá, aumentando el inter-flujo, permitiendo a su vez que los caudales pico bajen. De esta forma, para probar la efectividad de la estrategia de mejoramiento se realizó nuevamente la modelación con base en los valores detallados en la Tabla 5.9 y respetando el período de análisis considerado, el resultado obtenido fue el siguiente:

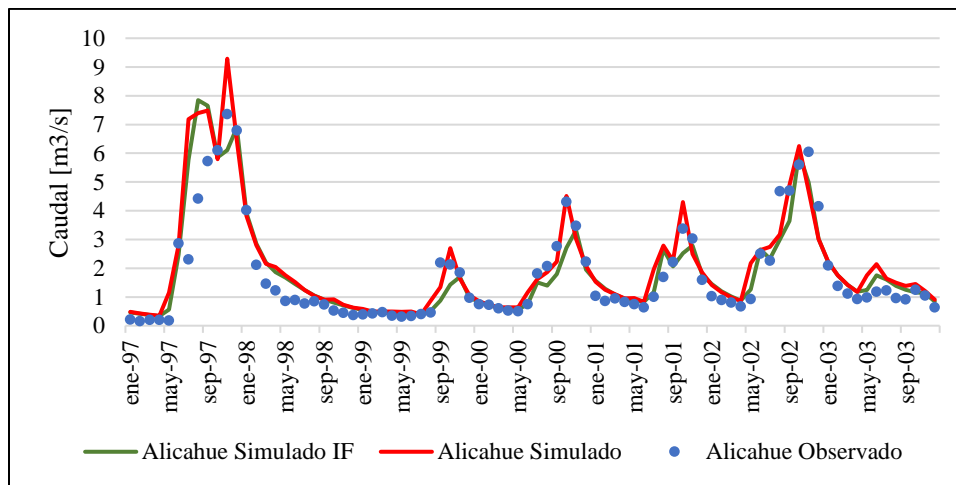


Figura 6.7 - Comparativa entre caudales para la estación fluviométrica del estero Alicahue entre enero de 1997 y diciembre del 2003, para una delimitación en base a 5 URH. En rojo la tendencia original de la respuesta hidrológica simulada, en verde la tendencia de la respuesta hidrológica mejorada (IF) y en azul la respuesta observada.

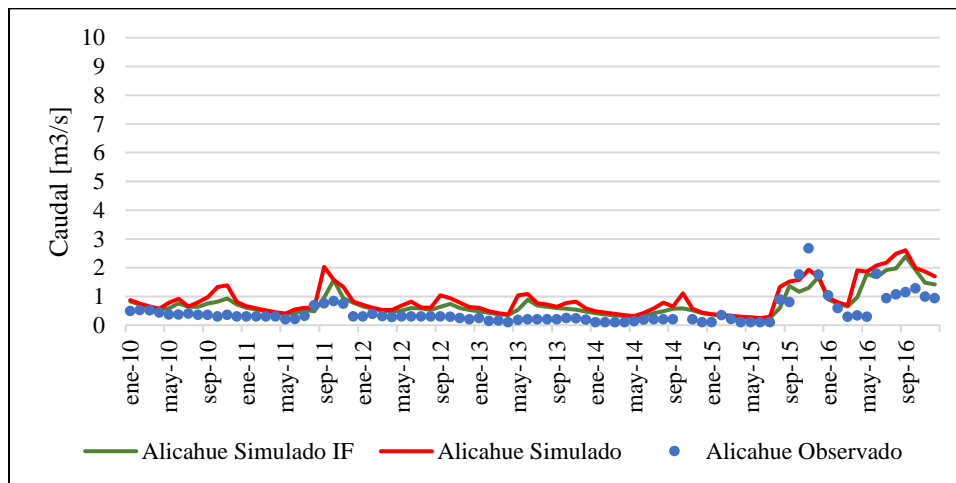


Figura 6.8 - Comparativa entre caudales para la estación fluviométrica del estero Alicahue entre enero de 2010 y diciembre del 2016, para una delimitación en base a 5 URH. En rojo la tendencia original de la respuesta hidrológica simulada, en verde la tendencia de la respuesta hidrológica mejorada (IF) y en azul la respuesta observada.

Al realizar una inspección visual de la Figura 6.8 se logra observar que la nueva tendencia generada en base a la estrategia de mejoramiento (verde) logra adaptarse de mejor manera que la antigua tendencia (rojo) respecto a la respuesta observada (azul). En relación con lo anterior, la nueva respuesta hidrológica logra asemejarse de mejor forma a la respuesta real del sistema, posicionándose por debajo de la antigua respuesta simulada y mejorando los problemas de sobreestimación en los caudales simulados. También se logra ver claramente como han desaparecido algunos de los picos ficticios generados, achantando su forma y asemejándose más a la realidad.

En la Tabla 6.2 se detalla la diferencia porcentual entre las respuestas simuladas y observada antes y después de haber aplicado la estrategia de mejoramiento. Se logra ver que, para períodos de caudales altos, donde la metodología representaba de buena forma la respuesta simulada, la diferencia porcentual mejoró, disminuyendo en un 9% su dispersión, es decir de 15% bajo a un 6% la diferencia entre la respuesta simulada y observada. Por otra parte, el caso de interés donde no se representaba de buena forma la respuesta simulada, es decir, correspondiente a períodos de escasas hídrica se logró mejorar en un 12% la similitud entre ambas respuestas.

Tabla 6.2 Caudal medio observado, simulado y diferencia porcentual entre los dos métodos de modelación.

Comparación entre las respuestas hidrológicas					
Período de análisis	Simulado [m3/s]	Simulado IF [m3/s]	Observado [m3/s]	Diferencia	Diferencia IF
ene-97 a dic-03	2.08	1.87	1.76	15%	6%
ene-10 a dic-16	0.90	0.73	0.45	50%	38%

De esta forma se verifica que la estrategia de mejoramiento es viable para ser utilizada en el modelo calibrado y modelado que será presentado a continuación.

Es importante destacar que esta estrategia de mejoramiento no es una mejora del método aplicado en este estudio, más bien representa un complemento a la hora de la modelación, mejorando la respuesta generada, por lo que no modifica en lo absoluto la metodología empleada.

6.1.3. Respuesta hidrológica mejorada

Como fue mencionado en la sección 3.5, en la etapa de calibración se busca lograr un set de parámetros hidrológicos y operaciones que permitan obtener una buena representación de los caudales simulados, en donde se asemeje de la mejor forma posible con los datos observados en las estaciones fluviométricas que comprenden el área de aplicación. Tal como se indicó al principio de este capítulo, dicho set de parámetros se obtuvo mediante el concepto de prueba y error, que consiste en una iteración manual de los parámetros con el objetivo de lograr la mayor semejanza entre caudales observados y simulados. Para lograr una mayor similitud en la respuesta simulada se implementó en el modelo la estrategia de mejoramiento planteada y probada en la sección anterior.

Para la calibración se utilizó el período comprendido entre ene-1982 a dic-2018, precisamente en las estaciones fluviométricas de los ríos Pedernal en Tejada, Sobrante en Piñadero y estero Alicahue en Colliguay. El set de parámetros con que se obtuvieron las mejores representaciones de la respuesta hidrológica simulada se presenta a continuación en las Tablas 6.3 a 6.5.

Tabla 6.3 Parámetros de calibración correspondientes a la subcuenca del estero Alicahue en Colliguay.

HRU	Sw [mm]	RRF [-]	Ks [mm/mes]	f [-]
1	10	0.45	3200	0.08
2	1000	1.7	2500	0.01
3	100	0.4	4500	0.3
4	350	1	6500	0.1
5	200	0.45	2000	0.02

Tabla 6.4 Parámetros de calibración correspondientes a la subcuenca del río Sobrante en Piñadero.

HRU	Sw [mm]	RRF [-]	Ks [mm/mes]	f [-]
1	5	1	4800	0.5
2	200	1.45	2500	0.15
3	50	2	3500	0.15
4	50	0.8	3500	0.35
5	10	1.35	2500	0.01

Tabla 6.5 Parámetros de calibración correspondientes a la subcuenca del río Pedernal en Tejada.

HRU	Sw [mm]	RRF [-]	Ks [mm/mes]	f [-]
1	306.28	1.14	3253.63	0.14
2	226.27	1.06	2097.01	0.19
3	335.49	1.19	3781.26	0.12
4	343.43	1.21	3951.94	0.11
5	237.94	1.09	2400.97	0.18

A continuación, en las Figuras 6.9 a 6.11 se presentan los resultados asociados al proceso de calibración, para cada una de las estaciones fluviométricas de la zona de estudio. En la Tabla 6.6 se muestran los resultados de los indicadores de eficiencia del proceso de calibración para cada uno de los análisis.

Es importante mencionar que si bien las series de tiempo comprendidas comienza sus registros en 1979 los tres primeros años se toman como periodos de calentamiento del modelo, es por ello por lo que los resultados presentados sólo se extienden desde 1982 hasta 2018.

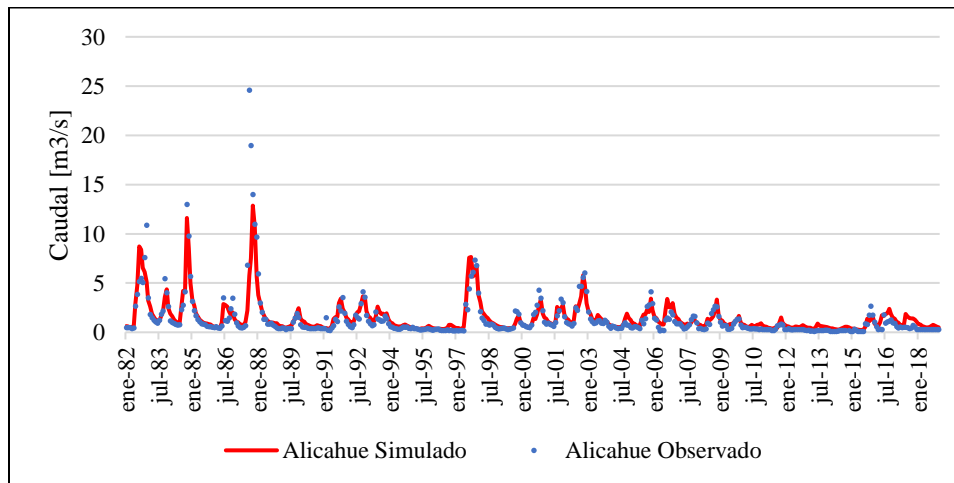


Figura 6.9 - Hidrograma del caudal observado y modelado en la estación fluviométrica “río Alichue en Colliguay” para una simulación con 5 URH.

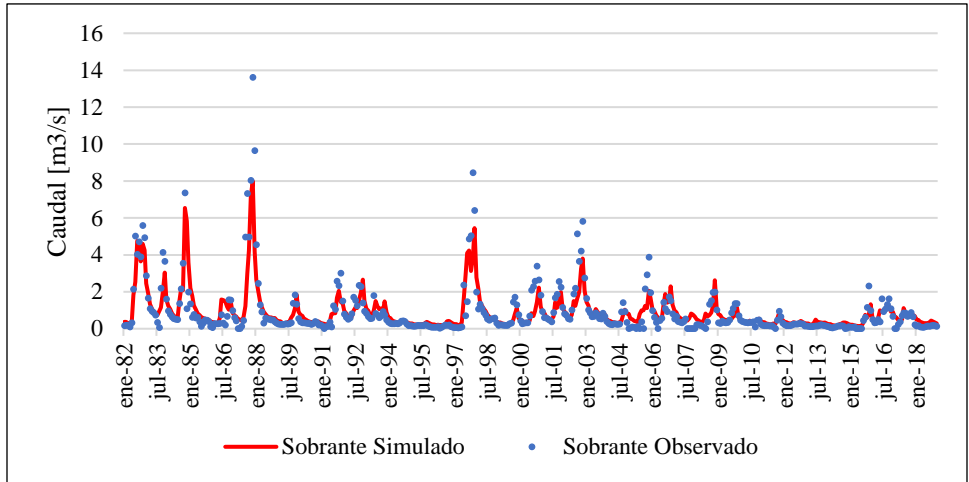


Figura 6.10 - Hidrograma del caudal observado y modelado para la estación fluviométrica “río Sobrante en Piñadero” para una simulación con 5 URH.

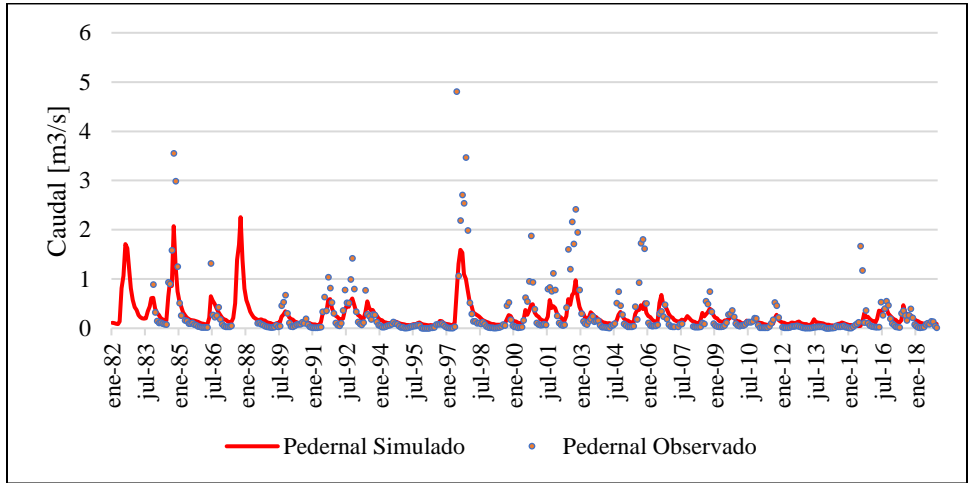


Figura 6.11 - Hidrograma del caudal observado y modelado para la estación fluviométrica “río Pedernal en Tejada” para una simulación con 5 URH.

Tabla 6.6 Rendimiento del modelo WEAP bajo un escenario de 5 URH.

Eficiencia de la respuesta hidrológica calibrada		
5 URH		
Alicahue	Sobrante	Pedernal
NS = 0.74	NS = 0.77	NS = 0.63
NSLog = 0.63	NSLog = 0.40	NSLog = 0.41
R2 = 0.74	R2 = 0.75	R2 = 0.65
KGE = 0.67	KGE = 0.76	KGE = 0.60
PBIAS = 15 %	PBIAS = 7.5 %	PBIAS = 27%

Es posible observar en la Tabla 6.6 que los indicadores obtenidos del proceso de calibración presentan valores muy satisfactorios y representativos en las tres subcuencas, en especial para Alicahue y Sobrante. Se observa que las principales dificultades del método están asociadas a la caracterización de la respuesta simulada en periodos de escasez hídrica. Esto puede ser verificado observando los valores obtenidos al evaluar la representatividad de la respuesta simulada bajo el criterio de NSLog, siendo estos valores los menos representativos. En contraste, la representatividad de la respuesta simulada en periodos de altas tasas de caudal sigue siendo muy representativa.

Esta representación de la respuesta hidrológica simulada fue obtenida con base en la metodología PCA/HCPC y reforzada en la modelación mediante la estrategia de mejoramiento planteada a lo largo de esta sección.

6.2. Comportamiento en las URH

6.2.1. Características y diferencias entre las distintas URH

La principal ventaja de la metodología de modelación implementada en este estudio se caracteriza por representar los diversos procesos hidrológicos dentro del área de aplicación, para ello se generan URH estableciendo como base la homogeneidad de los parámetros hidrológicos y meteorológicos del área de estudio. Posteriormente, cada una de las URH creadas se caracteriza por tener una variabilidad interna mínima en sus propiedades hidrometeorológicas y una variabilidad externa máxima respecto al resto de URH y la respuesta hidrológica simulada.

La Tabla 6.7 presenta las diferencias entre las distintas URH en términos de sus variables de entrada y sus respuestas hidrológicas, con el objetivo de representar la heterogeneidad entre las distintas URH.

Tabla 6.7 Detalle de las principales variables medias anuales pertenecientes a cada URH utilizada en modelación hidrológica. Cada valor está comprendido en la escala temporal de análisis, ene-1892 a dic-2018.

	URH 1	URH 2	URH 3	URH 4	URH 5
Área [km²]	102.2	141.7	155.6	104.7	175.4
% del área total	15.0%	20.9%	22.9%	15.4%	25.8%
Elevación [m.s.n.m]	3171.3	2759.0	2525.9	1969.4	2173.7
Temperatura [°C]	5.9	7.8	8.4	11.0	10.9
Precipitación [mm]	417.7	415.4	414.3	382.6	380.1
Evapotranspiración [mm]	308.7	300.3	276.2	245.4	262.0
Descarga promedio [m³/s]	0.09	0.04	0.01	0.05	0.04
% de la descarga promedio total	39.4%	16.8%	5.3%	20.8%	17.7%

La URH 1 es la más pequeña en términos de superficie, constituyendo un 15% del área total, no obstante, en proporción al aporte de la descarga promedio total contribuye aproximadamente en un 40%. Se caracteriza por ser la más fría, de mayor elevación y con tasas de precipitación y evapotranspiración superiores al resto. Muy por el contrario, la URH 3 poseyendo una de las mayores porciones de área a la vez que posee una de las mayores tasas de precipitación, es la que contribuye en menor medida a la descarga promedio total, solo en un 5.3%. La URH 4, que a pesar de ser la segunda más pequeña (superando únicamente en un 0.4% a la URH 1) y la segunda con menores tasas de precipitación, presenta el segundo mayor aporte a la descarga promedio total, aproximadamente con un 21%.

Es de principal interés comparar y revisar el comportamiento de las URH 1 y 5. La URH 1 al estar ubicada en mayor parte en altitudes por sobre los 3100 [m.s.n.m] y siendo la más cercana a la Cordillera de Los Andes, agrupa la mayor cantidad de celdas frías, a diferencia de la URH 5. Esta característica se ve reflejada en el comportamiento de su respuesta. La nieve al derretirse al final de la temporada provoca que su masa de agua se sienta concentrada entre los meses de octubre a enero, poseyendo su pico en el mes de noviembre. Muy por el

contrario, la URH 5 al ser una subcuenca mayormente baja y con un régimen con proporciones mayormente pluviales, concentra sus aportes a la descarga promedio total en los meses de junio a septiembre, presentando su pico en agosto, muy similar a la URH 4.

Puede ser normal esperar que aquellas URH donde se concentren las mayores cantidades de precipitaciones, estrictamente también deberían ser las que mayor aporte fluvial generen, pero se observa claramente que no es el caso (URH 3). Quizás, sea posible que las URH 2 y 3 se puedan fusionar en una sola, esto en base a las cualidades en común, sin embargo, en diferentes proporciones que comparten. Esto se plantea, ya que, ambas alcanzan su pico en la respuesta al mismo tiempo, en octubre.

De manera concluyente, la Figura 6.12 muestra la descarga media mensual por cada una de las URH. Se puede observar los diferentes comportamientos de cada grupo, principalmente en términos de la respuesta total y los picos observados en cada caso. Esto refuerza la tesis de la metodología, que centra sus esfuerzos en minimizar la variabilidad interna entre cada URH a la vez que maximiza la variabilidad entre ellas.

La URH 1 es el principal aportante a la descarga anual, tratándose de un régimen estrictamente nival con picos de descarga en noviembre, y a la vez coincidiendo con el pico de derretimiento de nieve. Las URH 4 y 5 presentan comportamientos muy similares, presentando sus picos en agosto, desfasados en dos meses respecto a sus picos pluviales ocurridos en junio (Figura 4.4). Esto posiblemente se deba al comportamiento que posee el inter-flujo, el cual actúa de manera más lenta que el flujo superficial, dando como resultado dicho comportamiento en la respuesta. La URH 3 presenta características más estables al igual que 4, esto posiblemente se deba a la gran retención de agua que posee cada uno de estos grupos, permitiendo que el almacenamiento de agua sea mucho mayor en mencionadas unidades. Se observa también, que la URH 1 al poseer la mayor altitud respecto al resto de unidades hidrológicas presenta una respuesta un poco más retrasada al resto de unidades, esto principalmente se ve influenciado por el derretimiento de la nieve tardío que posee. Al observar las Figuras 6.12 y 6.13 se puede verificar que las URH 1,2 y 3 poseen un régimen estrictamente nival, ya que sus picos de descarga coinciden con los picos de derretimiento.

De esta forma se puede comprobar como la metodología empleada para la modelación es capaz de aglomerar la información más predominante y a la vez representativa de un área de estudio dentro de una cantidad predefinida de grupos, y a la vez diferenciando los unos de los otros en términos de sus variables, parámetros y respuestas hidrológicas. Esta delimitación si bien se escapa de ser una delimitación clásica por bandas de elevación, resulta ser una estrategia muy provechosa, que permite considerar no solo elevaciones y usos de suelo para una delimitación, sino más bien una cantidad aún mayor de variables meteorológicas, geomorfológicas y parámetros hidrológicos para representar una respuesta mucho más dinámica y precisa a la hora de delimitar unidades hidrológicas.

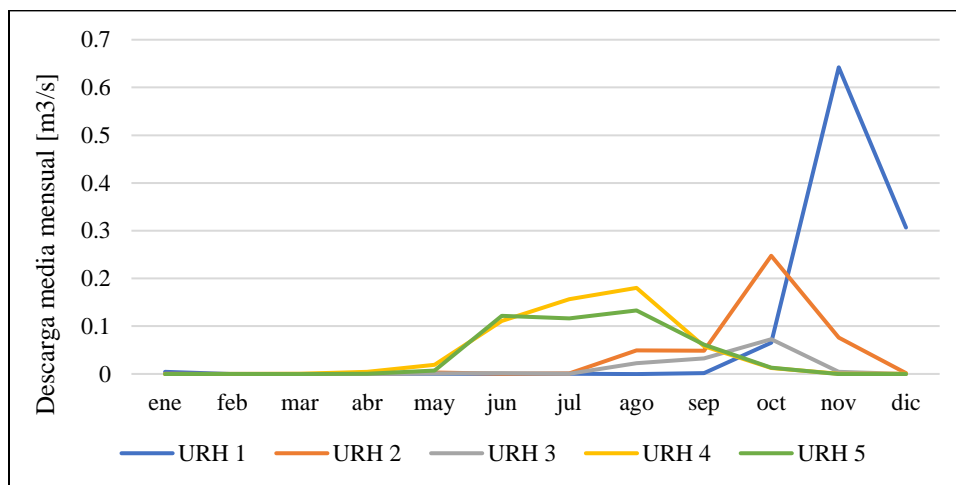


Figura 6.12 - Descarga media mensual por URH, para una delimitación con base en 5 URH.

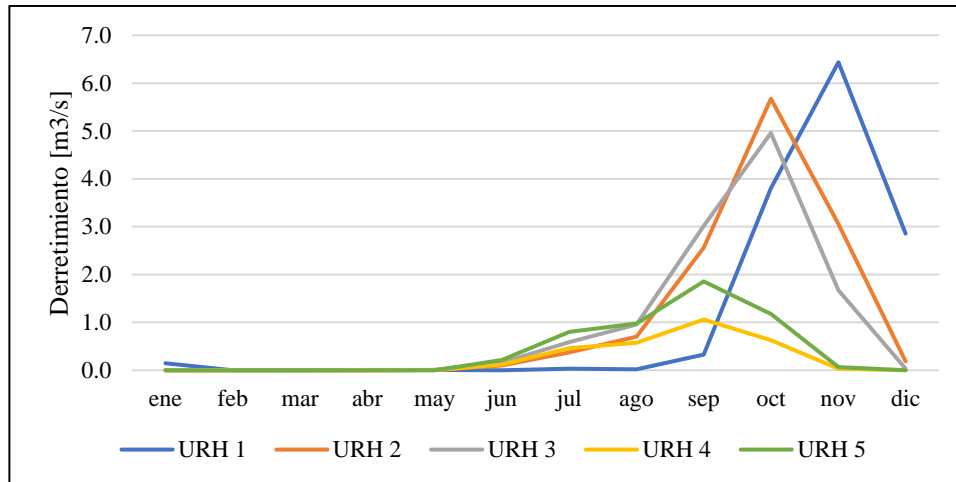


Figura 6.13 - Disminución de la nieve (derretimiento) por URH.

6.3. Eficiencia y tiempos de respuesta en la simulación

La metodología de generación de unidades de respuesta hidrológica PCA/HCPC se caracteriza por utilizar una cantidad reducida, pero no menos representativa, de información a la hora de modelar hidrológicamente un área de estudio. Es por ello por lo que, para demostrar, destacar y diferenciar las principales características de la metodología, se presentarán dos modelos hidrológicos. Uno de ellos, correspondiente al modelo final generado para este estudio, con base en el PCA/HCPC, el cual será comparado con un modelo diseñado bajo una modelación clásica, es decir, considerando bandas de elevación y usos de suelo. En ambos casos se enumerará la cantidad de “elementos catchment” que posee cada modelo, se evaluará la cantidad de recursos computacionales empleados en cada caso y los tiempos de corrida que tarda cada simulación.

En la Figura 6.14 y Tabla 6.8 se presenta y detalla el esquema clásico de modelación en WEAP considerando bandas de elevación y usos de suelo. Mediante un DEM, el contorno del área de estudio y procesos internos en QGIS, se logran crear las bandas de elevación para el rango que se estime conveniente, para el presente caso, se generaron bandas de elevación cada 300 [m.s.n.m]. Posteriormente utilizando un mapa de coberturas vegetal (ej. Land Cover Chile, Zhao *et al.* (2016) [14]) y superponiendo las elevaciones generadas anteriormente, se puede diferenciar los distintos tipos de cobertura vegetal por área de elevación. Finalmente, cada banda de elevación es caracterizada en el esquema de WEAP como un elemento catchment, en los cuales irán contenidos los distintos usos de suelo identificados, como se muestra en la Figura 6.14 y 6.15.

Tabla 6.8 Detalle del número de coberturas vegetales presentes por cada banda de elevación.

Bandas de elevación [m.s.n.m]	Nº de coberturas vegetales
850 - 1150	6
1150 - 1450	6
1450 - 1750	6
1750 - 2050	7
2050 - 2350	6
2350 - 2650	6
2650 - 2950	6
2950 - 3250	7
3250 - 3550	7
3550 - 3850	5

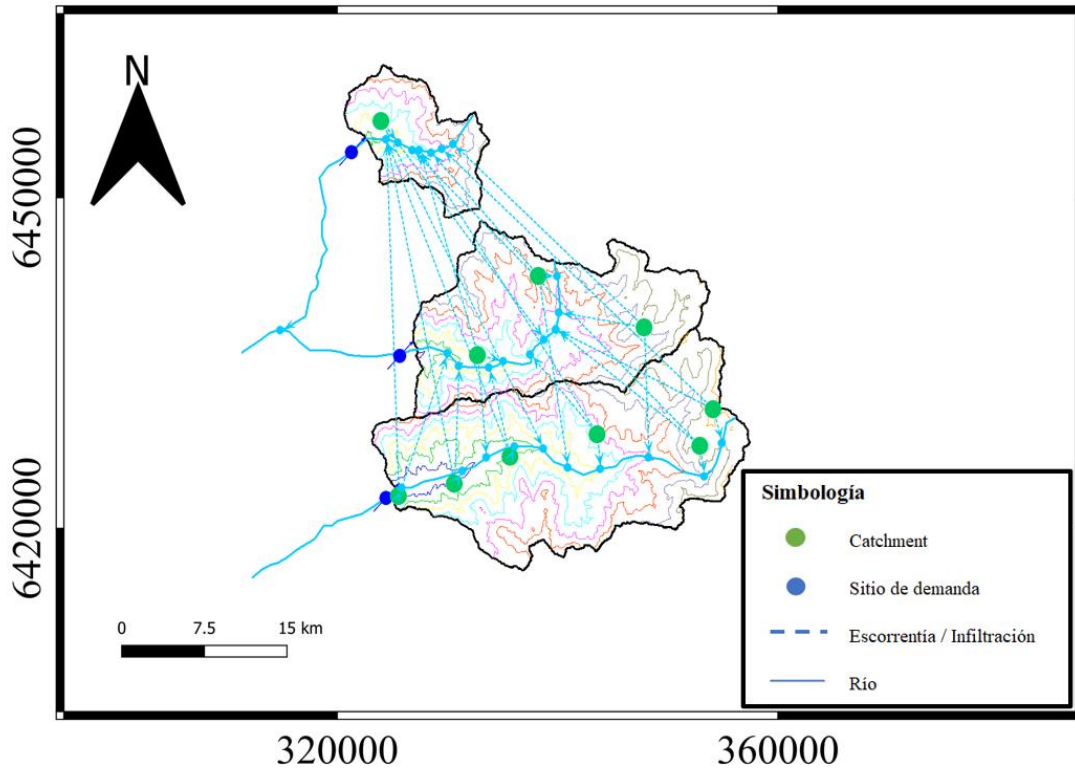


Figura 6.14 - Esquematización del modelo WEAP considerando bandas de elevación.

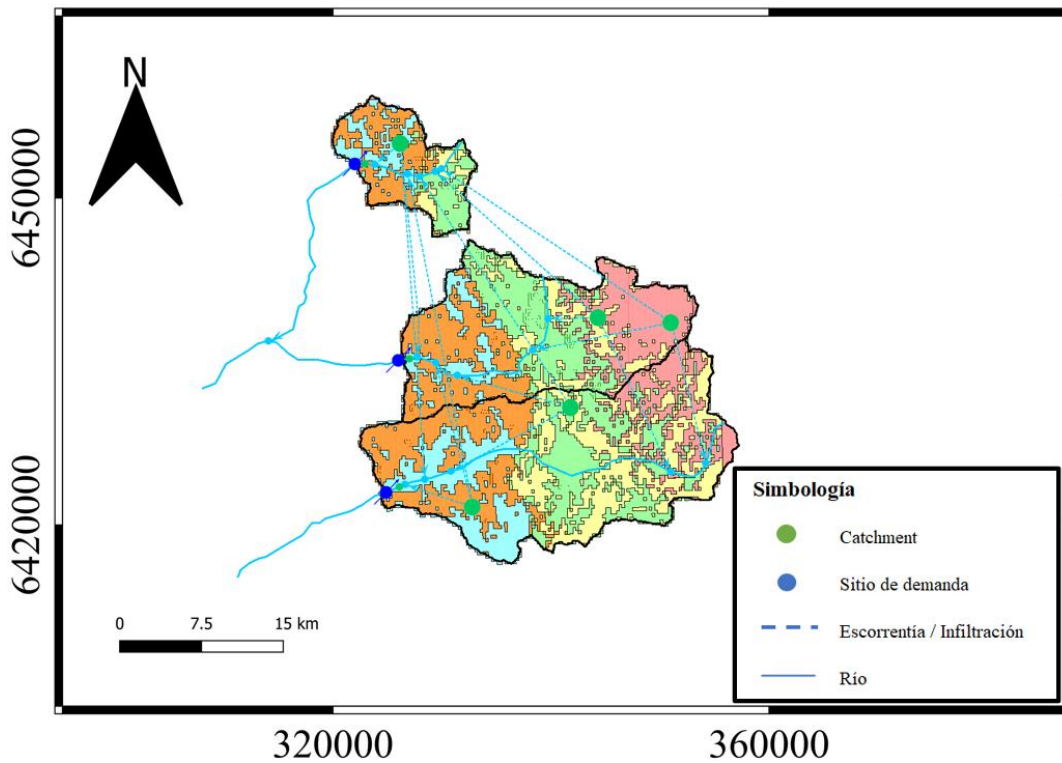


Figura 6.15 - Esquematización del modelo WEAP con base en la metodología PCA/HCPC.

A simple vista no se destacan grandes diferencias en las esquematizaciones presentadas. La modelación clásica posee un total de 10 elementos catchments (cada una asociada a una banda de elevación), en cambio, mediante el PCA/HCPC solo se modelaron 5 unidades hidrológicas (cada una asociada a una URH). Si bien esta diferenciación es mínima, los grandes cambios ocurren de manera interna dentro de cada una de estas unidades hidrológicas definidas en cada modelo. Por su parte, la modelación clásica dentro de cada unidad hidrológica desagrega la información para los distintos usos de suelo. Cada uso de suelo posee características propias tales como: áreas, coeficiente de cultivo, capacidad de almacenamiento superficial y subterráneo, factor de resistencia a la escorrentía, conductividad hidráulica en la zona de raíces y subterránea, dirección preferencial del flujo y porcentajes de capacidad de agua para ambos baldes. También deben ser consideradas forzantes climáticas mínimas para poner en marcha el modelo, como precipitaciones y temperaturas. De manera similar, para la modelación mediante el PCA/HCPC si bien se consideran los mismos parámetros y variables, la diferencia recae en que se hace de manera general, es decir utilizando valores promedio que representen los distintos tipos de parámetros y variables dentro de cada URH modelada. Es en este punto donde ambos métodos de modelación divergen, en la cantidad de clúster generado para el ingreso de información. A continuación, en la Tabla 6.9 se detalla la cantidad de elementos usados en cada caso.

Tabla 6.9 Detalle de los elementos considerados por tipo de modelación hidrológica en WEAP, mediante la metodología de la humedad del suelo.

Modelación	Bandas de elevación (Clásica)	PCA/HCPC
Bandas de elevación	10	0
N° de usos de suelo promedio por banda	≈ 6	0
Unidades hidrológicas	62	5
Áreas	Definidas para cada clúster	definida por URH
Uso de suelo	Definido por cada tipo de uso de suelo	Implícito
Tipo de suelo	Opcional	Implícito
Parámetros hidrológicos	Definido para cada uso de suelo	Definido para cada clúster
Variables meteorológicas	Sí	Sí

Basado en lo detallado en la Tabla 6.9, para una modelación clásica se requirió 62 unidades hidrológicas para caracterizar toda el área de estudio, y los elementos contenidos en ella. Por otra parte, para una modelación mediante el PCA/HCPC sólo se requirió de 5 unidades hidrológicas en total. También es importante señalar que, para una modelación clásica, el proceso de calibración debe ser realizado para una estación fluviométrica a la vez, volviendo el proceso largo y dificultoso a la hora de ser aplicado en áreas de estudio con diversas estaciones fluviométricas. Muy por el contrario, la modelación hecha mediante el PCA/HCPC fue capaz de generar un set de parámetros de calibración estándar que permitió modelar la respuesta hidrológica en tres puntos (estaciones fluviométricas) distintos a la vez, obteniendo respuestas satisfactorias y volviendo la modelación mucho más eficiente. Se puede concluir que una modelación clásica mediante bandas de elevación siempre es una buena opción, llegando a ser casi tan similar en cuanto a la información y los recursos computacionales utilizados en una modelación por PCA/HCPC. No obstante, para modelos con mayor envergadura, no existe comparativa respecto a los recursos computacionales usados por ambas metodologías, siendo la usada en el estudio actual muy superior a la clásica, ya que, los tiempos de cómputo pueden llegar a aumentar de manera exponencial a medida que se van integrando más elementos tipo catchment dentro del modelo.

En la Figura 6.16 se presenta la esquematización empleada en la modelación del PEGH en las cuencas de Ligua y Petorca [3]. Este modelo posee un total de 189 elementos catchment, dentro de los cuales existen en promedio 6 usos de suelo, resultando en un total de 1134 unidades hidrológicas que lo conforman. Según sus modeladores, en una computadora convencional tarda de seis a ocho horas en entregar resultados, volviendo el proceso de calibración tardío y dificultoso. Posiblemente, al aplicar la metodología de delimitación de URH (PCPA/HCPC), se podría llegar a reducir la cantidad de clúster en un 90-95%, volviéndolo mucho más eficiente en su manipulación, calibración y posterior entrega de resultados.

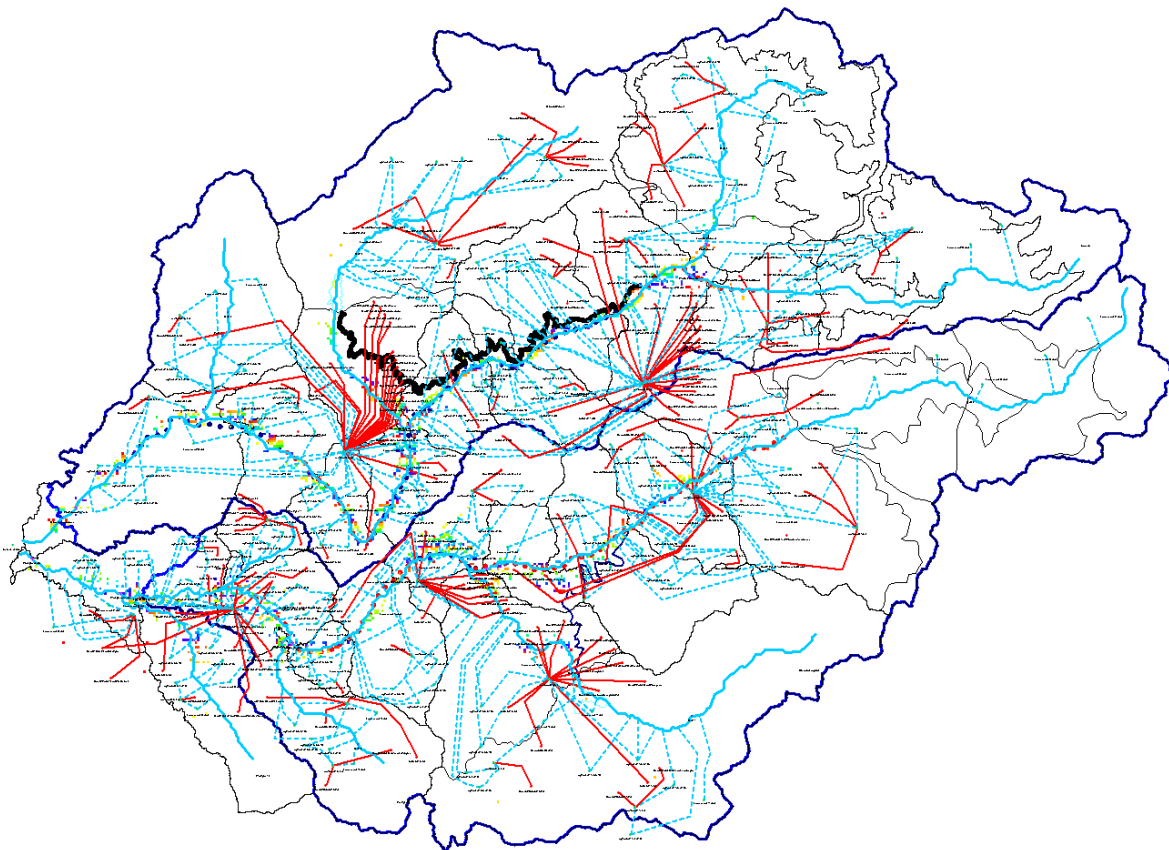


Figura 6.16 - Esquematización del modelo WEAP para las cuencas de La Ligua y Petorca.

Fuente: PEGH en las cuencas de Ligua, Petorca (DGA, 2019) [56].

CAPÍTULO VII

7. Conclusiones

La metodología PCA/HCPC, se utilizó como una alternativa para la delimitación de URH que posteriormente fueron utilizadas para modelar hidrológicamente a escala mensual en WEAP. Resultó ser un método representativo a la hora de interpretar los distintos comportamientos hidrológicos dentro del área de aplicación. Basada en parámetros hidrológicos (específicos del modelo WEAP) y meteorológicos de la zona, logró simular respuestas hidrológicas con un gran desempeño, destacando en la interpretación de caudales medios y pico, mientras que para caudales base su representación fue moderada. Se cree que tal comportamiento en los caudales base se debió a tres razones:

1. Como se mencionó en capítulos anteriores, generalmente se busca ajustar los caudales pico y caudales bases en la respuesta hidrológica simulada. Para ajustar los caudales pico, principalmente se configuraron los parámetros correspondientes al balde superior, en el presente caso espacializados mediante mapas, hasta obtener una respuesta simulada satisfactoria. De igual modo, para ajustar los caudales base, en rigor, debería modificarse los parámetros que afectan en mayor medida al balde inferior, es decir: K_d y D_w . En este estudio tales parámetros no fueron representados de manera espacializada, ni se usaron en el PCA/HCPC, sino más bien se utilizaron valores por defecto que no necesariamente representaban un real comportamiento de la zona, ni mucho menos la variabilidad espacial de estos mismos.
2. Durante el año, las distintas variaciones climáticas (ej. precipitaciones o temperaturas) modifican las características físicas y mecánicas del suelo. Directamente, estas modificaciones producen cambios en los parámetros que conforman cada uno de los baldes del método de humedad del suelo. Un ejemplo de ello es lo ocurrido con la conductividad hidráulica en la zona de raíces K_s . Cuando las precipitaciones aumentan y el suelo se satura, de igual forma lo hace K_s aumentando su magnitud en períodos húmedos (junio a octubre), y disminuyendo en períodos secos (noviembre a febrero) o de menor humedad. La metodología de generación de mapas no contempla esta variación temporal en los parámetros, solamente su variación espacial, lo cual limita el comportamiento y su variación estacional de momento.
3. El proceso que se llevó a cabo para calibrar los mapas de parámetros en ningún momento consideró evaluar la respuesta hidrológica ante valores logarítmicos (de ahí que se obtuviesen valores bajo la media en NSLog), más bien solo utilizó valores estándar en los caudales, a la vez que se ajustaba la respuesta en torno a criterios de eficiencia no logarítmicos, como, NS, KGE, PBIAS y R^2 .

Por su parte, el PCA/HCPC en comparación con metodologías comunes, mejoró sustancialmente la eficiencia computacional, a la vez que capturaba la homogeneidad y optimizaba las URH creadas y utilizadas para la modelación. Esta mejora en la eficiencia computacional se ve reflejada en la baja cantidad de recursos empleados para representar de buena forma los distintos procesos ocurridos en la zona. En el presente estudio se usaron 5 URH logrando desempeños en la respuesta simulada relativamente similares a los obtenidos por metodologías convencionales que tenderían a usar decenas de URH. Esta diferencia en los recursos computacionales empleados entre una metodología y otra, se relacionan estrechamente con el tiempo en que tarda cada una en entregar resultados, ya que, a mayor cantidad de URH el tiempo de manera proporcional irá en aumento.

Respecto a la modelación, se logró interpretar la respuesta hidrológica simulada en tres puntos distintos de la zona al mismo tiempo, donde cada punto representaba la estación fluviométrica correspondiente de cada subcuenca. Esto fue posible empleando un solo set de datos de entrada en el modelo, los cuales fueron extraídos directamente de los mapas de parámetros hidrológicos (K_s , Sw , RRF y f) generados mediante la metodología creada. Los valores obtenidos resultaron ser muy representativos en los tres puntos, llegando a tener desempeños

de NS= 0.73 (Sobrante), 0.67 (Alicahue) y 0.55 (Pedernal). En una modelación convencional, se requiere tantos sets de datos como estaciones fluviométricas y usos de suelo se tenga. Por ejemplo, si se buscara modelar las 3 subcuencas altas del estudio, y en promedio se tuviese 7 usos de suelo por subcuenca, se requeriría una cantidad mínima de 21 sets de datos para poner en marcha los 3 modelos distintos (asociados cada uno a una estación fluviométrica), volviendo al proceso de calibración laborioso y poco eficiente. La eficiencia computacional y el bajo coste de recursos computacionales es una cualidad incomparable en la metodología PCA/HCPC, lo cual se pudo demostrar modelando hidrológicamente en tres puntos distintos a la vez y bajo un solo modelo hidrológico.

Finalmente, el modelo hidrológico mejorado permitió suplir una de las limitaciones del método ligada a la baja representatividad en la respuesta simulada en períodos de caudales bajos. Esto fue posible gracias a la variación estacional en los parámetros meteorológicos. Este proceso se llevó a cabo condicionando los parámetros RRF y Ks (a los cuales la respuesta hidrológica simulada era más sensible) en períodos donde la humedad del suelo era baja (porcentaje de humedad en el balde superior menores al 15%). Es por ello por lo que amplificando tres veces RRF y disminuyendo cinco veces Ks, se logró ajustar la respuesta simulada en períodos críticos, permitiendo obtener una respuesta relativamente acertada a lo largo de toda la línea temporal en que fue aplicado el estudio. Si bien, esto fue un proceso netamente de modelación desvinculado con la metodología de creación de mapas, contribuyó en dilucidar las principales falencias de la metodología de creación de mapas ráster, para en un futuro ser mejoradas.

De esta forma se concluye que la metodología de generación de mapas ráster en conjunto con el PCA/HCPC se pueden resumir en tres conceptos: mejora de la eficiencia computacional, captura de la heterogeneidad de la cuenca, y optimización e identificación de las URH que la componen.

7.1. Comentarios finales

Este estudio tomó como base teórica para la modelación, una metodología nueva y experimental, la cual está en constante mejoramiento, el PCA/HCPC. Sumado a lo anterior, internamente se implementó una metodología completamente nueva para la generación de mapas ráster utilizados en la delimitación de URH. La metodología fue aplicada en tres subcuencas pequeñas con similar clima, cobertura vegetal, sin intervención antrópica y con estaciones fluviométricas muy parecidas respecto al comportamiento de sus registros históricos. Esto limitaría el estudio, de momento, a poder replicarse en cuencas que posean mayor tamaño, diversidad climática, vegetal y con intervención humana como en las grandes ciudades.

La función PCA usa ponderaciones para asignar grados de importancia relativa a las diferentes variables de análisis. Esto le permite al modelador establecer las variables más importantes dado el modelo o el problema a resolver. Originalmente, Poblete et al. (2020) aplicaron la metodología asignando un peso de 2 a variables meteorológicas como la precipitación y temperatura. En el estudio actual, el peso se equiparó, asignando un valor de 1 a variables meteorológicas e hidrológicas por igual. Si bien, indudablemente esta decisión modificó la base de la metodología, se debería esclarecer que tan distintas serían las representaciones de las URH que conforman la cuenca si el peso asignado varía de 1 a 2. Puede ser que estas mejoren, o quizás no. Puede ser quizás, que, al subir el peso a 2, el caso óptimo ya no sean 5 URH, sino 6 o 7, o incluso 3. Es un análisis de sensibilidad el cual deberá ser estudiado y analizado en detalle a futuro.

Posiblemente, la metodología PCA/HCPC podría mejorar aún más aumentando los datos de entrada al modelo. Un ejemplo de ello es lo ocurrido con la ausente representación espacial de los parámetros que conforman el balde inferior del método humedad del suelo y el coeficiente de cultivo Kc. Es altamente probable que la mejora fuese sustancialmente positiva en la simulación de los caudales base (y también en los medios y pico), al representar espacialmente los parámetros Dw y Kd mediante mapas. De igual forma con el coeficiente de cultivo, debido a su directa influencia en la representación de la respuesta simulada, ya que, al estar directamente relacionado con la evapotranspiración, es uno de los principales actores en mediar la sub o sobreestimación en los caudales simulados.

Otro aspecto importante por comentar es el bajo desempeño en la respuesta simulada al ser evaluada mediante criterios logarítmicos, como es el caso de NSLog. Se cree que este comportamiento se deba a dos principales razones, la primera fue explicada al principio de este capítulo, ligada principalmente a la generación de mapas considerando solo caudales estándares y no logarítmicos en el proceso de calibración de los mapas. Para poder

explicar la posible segunda razón, es necesario recordar la función que otorga modelar mediante el PCA/HCPC. Que, en palabras simples, se basa en entregar un set de datos de entrada al modelo hidrológico, que represente de la mejor manera el comportamiento de las distintas URH definidas. Este set de datos se podría considerar como una condición inicial para el proceso de calibración, ya que se comienza desde un desempeño relativamente bueno, volviendo este proceso más llevadero a diferencia de otras metodologías de calibración. Esto puede ser explicado en base a la Figura 7.1. Por ejemplo, en una modelación común, muy posiblemente se podría comenzar con un desempeño similar al obtenido por parte del Set 1. Por su parte la ventaja que otorga el PCA/HCPC, es equivalente a comenzar en el Set 4, ya que, se calibró los mapas para obtener condiciones iniciales de desempeño aceptables. Esta línea base que otorga el PCA/HCPC, resultaría ser tan beneficiosa como limitante, ya que podría fijar esta condición de datos iniciales en un punto donde la mejora en la calibración sea compleja. Si bien se podría lograr un desempeño “teóricamente” bueno utilizando el Set 5, no indica que necesariamente los datos de entrada al modelo sean los que realmente representan la respuesta en su mejor forma. Este fenómeno teórico es muy usual a la hora de calibrar modelos hidrológicos mediante el concepto de prueba y error, iterando sets hasta lograr desempeños relativamente buenos. Y es la principal idea de la cual se sustenta esta segunda razón del porqué los NSLog obtenidos fueron tan bajos, ya que se cree que el set de datos que se usó como condición inicial para la calibración del modelo, “teóricamente” era bueno, pero tal vez físicamente no era el que representara la respuesta de la mejor manera en todos sus frentes. Quizás otro set de datos de entrada hubiese permitido al modelo haber llegado al Set 6, el cual quizás hubiese representado de buena manera la respuesta hidrológica simulada bajo cualquier criterio de evaluación.

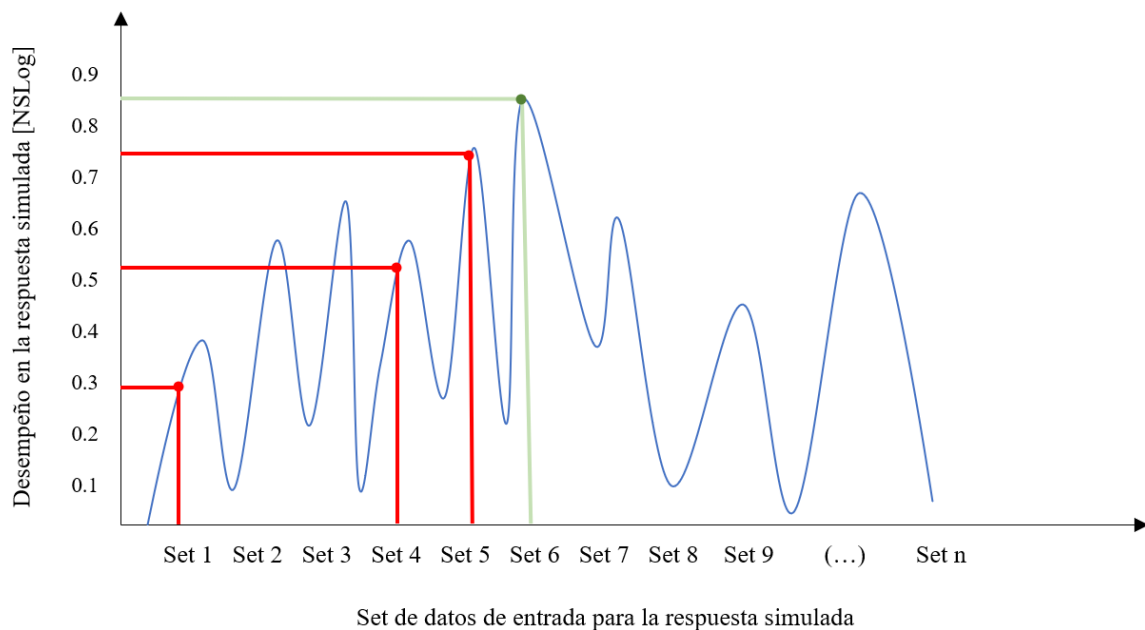


Figura 7.1 - Conceptualización gráfica del comportamiento en el desempeño de la respuesta simulada bajo distintos sets de datos de entrada al modelo.

7.2. Recomendaciones para trabajos futuros

Esta sección va dirigida especialmente para aquellos que quisieran adentrarse en la comprensión, aplicación y mejoramiento de la metodología de generación de mapas, como del PCA/HCPC:

Para la aplicación de ambas metodologías fue necesario contar con una computadora lo suficientemente potente en memoria RAM y procesador, para que permita realizar los procesos de manipulación y procesamiento de datos en R y QGIS sin sufrir inconvenientes. En el estudio actual, para llevar a cabo la aplicación del PCA/HCPC se debió reducir la resolución de los mapas ráster generados en 8 veces, ya que, aun siendo una computadora potente, la cantidad de datos es tan grande que resultó imposible poder manipularlos en altas resoluciones.

Si bien la metodología otorga rapidez y bajo costo computacional en la modelación, todo el proceso previo requiere de mucho preprocesamiento de datos y generación de otros. Es por ello por lo que antes de querer tomar la decisión de aplicar la metodología PCA/HCPC se debe verificar si se cuenta con la información mínima necesaria para generar los mapas ráster que requiere el método.

Como se comentó al principio de la sección, se requiere de un uso básico (o incluso medio en ciertos procesos) de las herramientas R y QGIS para manipular los distintos datos en sus formatos correspondientes. Si no se cuenta con los scripts necesarios para la transformación y manipulación de datos, se requerirá invertir un tiempo considerable en buscar alternativas que permitan extraer la información en el formato y unidades que requiera el estudio.

Las ecuaciones planteadas para la generación de mapas fueron calibradas especialmente para la zona de aplicación (sector alto de las cuencas de Ligua-Petorca). Es altamente probable, que al ser aplicadas en zonas distintas (climática como fisiográficamente) a las del estudio actual, no se logre una representación deseada de los parámetros hidrológicos que se desee generar en primera instancia. Esto no debe tomarse como un punto desalentador, muy por el contrario, es parte del proceso mismo de generación de mapas. Para ello, los mapas generados bajo las ecuaciones originales deberán irse calibrando, hasta obtener un desempeño en la respuesta simulada lo suficientemente bueno. Posteriormente, las nuevas ecuaciones empleadas para obtener los mapas que entregaron el mejor desempeño serán las que represente la nueva zona de aplicación.

Si bien, los mapas generados se obtuvieron por medio de una combinación lineal de las características fisiográficas de la zona, no es descabellado pensar que una representación no lineal ayudaría en mejorar la interpretación de estos mismos. Muy por el contrario, los parámetros hidrológicos tienen comportamientos no lineales en ciertas condiciones lo entregaría una mejor consistencia en la espacialización de los parámetros.

Referencias

- [1] Dirección General de Aguas (DGA), DGA noticias. Disponible en línea: <https://dga.mop.gob.cl/noticias/Paginas/DetalledeNoticias.aspx?item=714> (consultado el 1 de abril de 2021).
- [2] J. Sieber, Water Evaluation And Planning (WEAP) System, Software version: 2019.0, Stockholm Environment Institute, Somerville, MA, USA.
- [3] Dirección General de Aguas (DGA), «Plan Estratégico de Gestión Hídrica en las Cuencas de Ligua, Petorca y Quilimarí,» Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Santiago, Chile, 2019.
- [4] Dirección General de Aguas (DGA), «Plan estratégico de gestión hídrica en la Cuenca de Elqui,» Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Santiago, Chile, 2020. Disponible en línea: <http://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/123456789/32351> (consultado el 29 de noviembre de 2021).
- [5] DGA, «Plan estratégico de gestión hídrica en la Cuenca de Casablanca,» Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Santiago, Chile, 2021. (En revisión)
- [6] B. Hingray, C. Picouet y A. Musy, Hydrology: A science for engineers, Boca Raton, FL: CRC Press, 2015.
- [8] H. V. Gupta, H. Kling, K. K. Yilmaz y G. F. Martinez, «Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modeling, » Journal of Hydrology, vol. 377, n° 1, pp. 80-91, 2009.
- [9] W.-A. Flügel, «Delineating hydrological response units by geographical information system analyses for regional hydrological modelling using PRMS/MMS in the drainage basin of the River Bröl, Germany, » Hydrol. Process, vol. 9, n° 3-4, pp. 423-436, 1995.
- [10] K. Devito I. Creed, T. Gran, C. Mendoza, R. Petrone, U. Silins and B. Smerdon. «A framework for broad-scale classification of hydrologic response units on the Boreal Plain: is topography the last thing to consider? » Hydrological Processes, 26 April 2005.
- [11] D. Poblete, J. Arevalo, O. Nicollis y F. Figueroa, «Optimization of the Hydrologic Response Units (HRU) using gridded meteorological data and spatially varying parameters, » Earth and Space Science Open Archive, 2020.
- [12] Dirección General de Aguas (DGA), «Actualización del Balance Hídrico Nacional, SIT N° 417,» Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile, 2017.
- [13] U. A. S. Team, «ASTGM ASTER Global Digital Elevation Model v003,» [En línea]. Available:<https://lpdaac.usgs.gov/products/astgmtv003/>. [Último acceso: 2021 Julio].
- [14] Y. Zhao, D. Feng, L. Yu, X. Wang, Y. Chen, Y. Bai, H. Hernández, M. Galleguillos, C. Estados, G. Biging, J. Radke y P. Gong, «Detailed dynamic land cover mapping of Chile: Accuracy improvement by integrating multi-temporal data, » *Remote Sensing of Environment*, vol. 183, pp. 170-185, 2016.
- [16] J. Cabrera, «Modelos Hidrológicos,» Universidad Nacional de Ingeniería, Perú.
- [17] P. Krause, Quantifying the impact of land use changes on the water balance of large catchments using the J2000 model, *Physics and Chemistry of the Earth*, 27.
- [18] V. Chow, D. Maidment y L. Mays, Hidrología Aplicada, Bogotá: McGraw-Hill, 1993.
- [19] Y. Morales, «Evaluación Y Modelación De Información Hidrológica Para Propuesta de Mejoramiento En La Programación A Largo Plazo De Centrales Hidroeléctricas En Chile,» Universidad de Chile, Santiago, 2016. (Tesis de magister).
- [20] D.N Moriasi, J.G. Arnold, M. W. Van Liew, R. L. Bingner, R. D. Harmel, T. L. Veith, 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, Vol 50, 885-900.
- [21] D.A. Lind; W. G. Marchal; R.D. MASON, 2004. Estadística para Administración y Economía (11a edición). Colombia: Algaomega, p. 830.

- [22] R. S. Gupta, *Hydrology & Hydraulic Systems*, 4 ed., Long Grove, IL: Waveland Press, 2017.
- [24] Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile, Stockholm Environment Institute, 2009. Guía Metodológica – Modelación Hidrológica y de Recursos Hídricos con el Modelo WEAP.
- [25] R.G. Allen, L.S. Pereira, D. Raes y M. Smith. 2006. Crop evapotranspiration. Serie de Riego y Drenaje, FAO-56. Roma.
- [26] J. Cabrera, «Unidad de Respuesta Hidrológica (H.R.U),» Universidad Nacional de Ingeniería, Perú. (Tesis)
- [27] P. Sanzana, «Automatización Del Procesamiento De Unidades De Respuesta Hidrológica (URHs) Con Grass Para Un Modelo Hidrológico Distribuido,» Universidad de Chile, Santiago, 2011.
- [29] J. Amat, Análisis de Componentes Principales (Principal Component Analysis, PCA) y t-SNE. En Línea: [https://www.cienciadedatos.net/documentos/35_principal_component_analysis#Cálculo de las componentes principales](https://www.cienciadedatos.net/documentos/35_principal_component_analysis#Cálculo_de_las_componentes_principales).
- [30] M. Gallardo, «Análisis De Datos Multivariables,» Universidad de Granada, España. En Línea: <https://www.ugr.es/~gallardo/pdf/clúster-3.pdf>.
- [33] F. Husson, S. Lê y J. Pagès, *Análisis de Datos con R*, Escuela Colombiana de Ingeniería, 2013.
- [34] Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile, Stockholm Environment Institute, 2009. Guía Metodológica – Modelación Hidrológica y de Recursos Hídricos con el Modelo WEAP. Desarrollada con contribuciones del PACC (Proyecto de Adaptación al Cambio Climático a través de una efectiva gobernabilidad del agua en Ecuador), Ministerio del Ambiente de Ecuador, y PROMÁS (Programa para el Manejo del Agua y del Suelo) de la Universidad de Cuenca, Ecuador.
- [35] F. Figueroa, «Implementación y Uso del Modelo WEAP en el análisis de la disponibilidad del recurso hídrico en los Sistemas de Agua Potable Rural en la Cuenca del río Ligua,» Universidad de Valparaíso, 2017. (Trabajo de título).
- [36] G. Cortés, «Evaluación de un modelo hidrológico semi distribuido para la estimación de la escorrentía de deshielo en el Río Juncal,» Universidad de Chile, 2010. (Trabajo de título).
- [37] D. Chávez, «Análisis Comparativo de Modelos Hidrológicos en la Cuenca del Estero Upeo en Upeo, Región del Maule,» Universidad de Valparaíso, 2020. (Trabajo de título).
- [38] C. Reyes, «Proyección de variables hidrológicas diarias a largo plazo en la cuenca del Río Tinguiririca en Bajo Los Briones, bajo escenarios A1B y A2 de cambio climático,» Universidad de Chile, 2012. (Trabajo de título).
- [39] B. Salgado, «Disponibilidad y Demanda Futura Del Recurso Hídrico. Análisis del escenario A2 En Una Cuenca Agrícola De La VI Región,» Universidad de Chile, Santiago, 2011. (Trabajo de título).
- [40] T. Davie, *Fundamentals of Hydrology*, New York, NY: Routledge, 2008.
- [43] R.J. Hijmans, *Geosphere: Spherical Trigonometry; Version 1.5-7; R Package*. Available online: <https://CRAN.R-project.org/package=geosphere>
- [44] F. Husson, S. Lê y J. Pagès, Principal component methods – hierarchical clustering - partitional clustering: why would we need to choose for visualizing data? Technical Reports - Agrocampus, 2010.
- [46] E. Savvidou, A. Efstratiadis, A. D. Koussis, A. Koukouvis y D. Skarlatos, «The Curve Number Concept as a Driver for Delineating Hydrological Response Units, » *Water*, vol. 10, nº 2, 2018.
- [49] M. C. Peel et al. 2007, Updated world map of the Koppen-Geiger climate classification. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 11, pag. 1635, 2007
- [51] W.L. Walter, S.C. Alcazaga ((Oct-Dic 1992)) Mapa de asociaciones de grandes grupos de suelos de Chile [en línea]. Agricultura técnica. Disponible en: <https://biblioteca.inia.cl/handle/123456789/34650> (Consultado: 12 octubre 2021).
- [52] Copernicus Climate Change Service (C3S) (2017): ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate. Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS), date of access. <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home>

[53] D. Maidment, Handbook of Hydrology, New York, NY: McGraw-Hill, 1997.

Linkografía

Porcentaje PBIAS:

[7] <https://search.r-project.org/CRAN/refmans/hydroGOF/html/pbias.html>

Modelación Hidrológica:

[15] http://www.imefen.uni.edu.pe/Temás_interes/modhidro_1.pdf

Guía para el usuario de WEAP:

[23] <https://www.sei.org/projects-and-tools/tools/weap-evaluacion-y-planeacion-del-agua/>.

Definición de Dendograma:

[31] <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/multivariate/how-to/clúster-observations/interpret-the-results/all-statistics-and-graphs/dendrogram/>

Método de Ward:

[32] <https://www.ugr.es/~gallardo/pdf/clúster-3.pdf>

Noticias DGA:

[41] <https://dga.mop.gob.cl/noticias/Paginas/DetalledeNoticias.aspx?item=714#:~:text=El%20objetivo%20de%20esta%20iniciativa,las%20aguas%20subterráneas%20y%20superficiales%3B>

DEM A los Palsar, V Región:

[42] <http://www.geoportal.cl/geoportal/catalog/search/resource/resumen.page?uuid=%7B62F59BC4-4074-4DA9-8DC8-D75B7FED15B3%7D>

Capas vectoriales, masas de aguas y ríos:

[45] https://www.bcn.cl/siit/mapas_vectoriales

Recursos Naturales y Proyectos, Comuna de Petorca:

[47] https://www.sitrural.cl/wp-content/uploads/2020/03/Petorca_rec_nat_proy-1.pdf

Recursos Naturales, Comuna de La Ligua:

[48] https://www.sitrural.cl/wp-content/uploads/2020/03/LaLigua_rec_nat_1.pdf

Productos Grillados CR2:

[50] <https://www.cr2.cl/datos-productos-grillados/>

La Mega Sequía en Chile:

[54] <https://www.cr2.cl/informe-a-la-nacion-la-megasequia-2010-2015-una-leccion-para-el-futuro/>.