

Universidad de Valparaíso  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Civil



“Propuesta de delineamiento de Unidades de  
Respuesta Hidrológica (HRU) para modelación  
hidrológica y su utilización en software de análisis de  
crecidas”

Por

José Ignacio Martínez Retamal

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

Profesor Guía: David Poblete López

Enero, 2021

## Agradecimientos

*En primer lugar, agradezco a mis padres, Perla y Oscar, por todo el cariño y el apoyo entregado durante este tiempo, a pesar de las múltiples dificultades que tuvimos que sortear. Agradecer también a mi pareja, Anllel, por su amor y sus consejos.*

*Por supuesto agradecer a mi profesor guía, David Poblete, por su buena disposición, su paciencia, y los incontables consejos durante el desarrollo de esta memoria de título.*

*También agradezco a los amigos y compañeros de universidad: Catalina, Ignacio, Julio, Misael, Matías, entre otros, quienes de uno u otro modo aportaron para lograr escribir esta memoria de título.*

*Finalmente, quisiera terminar con una frase de Luis Alberto Spinetta, que, en cierto modo, condensa el esfuerzo realizado, no sólo durante el desarrollo de esta memoria, sino durante toda la carrera:*

*“Aunque me fuercen yo nunca voy a decir que todo tiempo por pasado fue mejor, mañana es mejor”*

# ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS .....	7
ÍNDICE DE TABLAS .....	12
CAPÍTULO I .....	13
1. Descripción del trabajo.....	13
1.1. Planteamiento del problema .....	13
1.2. Objetivos .....	14
1.2.1. Objetivo general .....	14
1.2.2. Objetivos específicos .....	14
1.3. Organización del documento .....	14
1.4. Alcances del trabajo.....	14
CAPÍTULO II .....	16
2. Revisión bibliográfica .....	16
2.1. Modelación Hidrológica.....	16
2.1.2. Objetivos de la modelación hidrológica .....	17
2.1.3. Estructura y variables de un modelo hidrológico .....	17
2.1.4. Construcción del modelo hidrológico .....	19
2.1.5. Representación de los procesos.....	20
2.1.6. Discretización del espacio.....	20
2.2. Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU) .....	21
2.2.1. Metodologías de delineamiento de HRU .....	21
2.3. Análisis de Componentes Principales (PCA).....	23
2.4. Acerca del Software HEC-HMS .....	25
2.4.1. Métodos asociados de escorrentía .....	26
2.4.2. Métodos asociados de tránsito de crecidas.....	28
2.4.3. Receso del flujo basal .....	33
2.5. Acerca del Balance Hídrico Nacional.....	34
2.5.1. Ciclo hidrológico y balance hídrico.....	34
2.5.2. Balance Hídrico Nacional.....	35
2.5.3. Fuentes de información del Balance Hídrico Nacional .....	35
2.5.4. Sobre la información disponible .....	37
2.6. Acerca del procesamiento de datos y el Lenguaje R.....	37
2.6.1. RStudio.....	37
2.6.2. Sobre el formato NetCDF y su gestión en RStudio .....	38
CAPÍTULO III .....	40
3. Metodología de desarrollo.....	40

3.1. Definición métodos de escorrentía y tránsito de crecidas .....	40
3.2. Obtención de parámetros de interés.....	41
3.2.1. Parámetros asociados a modelo de escorrentía .....	41
3.2.2. Parámetros asociados a modelo de tránsito de crecidas .....	45
3.3. Tratamiento de variables meteorológicas .....	46
3.4. Criterio de delineamiento de HRU .....	47
3.4.1. Definición por medio de PCA .....	48
3.4.2. Cantidad óptima de HRU .....	49
3.5. Representación de HRU en modelo hidrológico.....	50
CAPÍTULO IV .....	53
4. Recopilación de datos.....	53
4.1. Caracterización del área de estudio N°1 .....	53
4.1.1. Ubicación.....	53
4.1.2. Características morfológicas.....	54
4.1.3. Características climáticas .....	56
4.1.4. Características de tipo de suelo.....	57
4.1.5. Características de cobertura vegetal .....	58
4.2. Procesamiento de la información disponible .....	59
4.2.1. Información geográfica y topográfica.....	59
4.2.2. Cálculo de Parámetros.....	60
4.2.3. Información meteorológica.....	63
4.3. Fenómenos meteorológicos de interés.....	67
4.3.1. Fenómeno de Mayo de 2012 .....	67
4.3.2. Fenómeno de Abril de 2017.....	68
4.3.3. Gestión de la información meteorológica a nivel local, evento de Mayo de 2012.....	68
4.3.4. Gestión de la información meteorológica a nivel local, evento de Abril de 2017 .....	72
4.4. Caracterización del área de estudio N°2 .....	75
4.4.1. Ubicación.....	75
4.4.2. Características morfológicas.....	76
4.4.3. Características climáticas .....	78
4.4.4. Características de tipo de suelo.....	79
4.4.5. Características de cobertura vegetal .....	80
4.5. Procesamiento de la información disponible .....	81
4.5.1. Información geográfica y topográfica.....	81
4.5.2. Cálculo de Parámetros.....	82
4.5.3. Información meteorológica.....	85

4.6. Fenómenos meteorológicos de interés .....	88
4.6.1. Fenómeno de Mayo de 2019 .....	88
4.6.2. Fenómeno de Abril de 2018.....	88
4.6.3. Gestión de la información meteorológica a nivel local, evento de Mayo de 2019.....	89
4.6.4. Gestión de la información meteorológica a nivel local, evento de Abril de 2018 .....	91
4.7. Consideraciones adicionales para el análisis .....	92
CAPÍTULO V .....	95
5. Modelación hidrológica .....	95
5.1. Construcción del modelo principal (Pocuro) .....	95
5.1.2. Análisis de PCA sobre la cuenca .....	96
5.1.3. Composición de las HRU en la cuenca .....	98
5.1.4. Descripción de los elementos dentro del modelo hidrológico.....	99
5.2. Modelos comparativos (Pocuro) .....	100
5.2.1. Modelo integrado.....	100
5.2.2. Modelos semi distribuidos .....	100
5.3. Construcción del modelo principal (Purén) .....	103
5.3.2. Análisis de PCA sobre la cuenca .....	104
5.3.3. Composición de las HRU en la cuenca .....	106
5.3.4. Descripción de los elementos dentro del modelo hidrológico.....	107
5.4. Modelos comparativos (Purén) .....	107
5.4.1. Modelo integrado.....	107
5.4.2. Modelo semi-distribuido .....	108
5.5. Calibración y validación del conjunto de modelos .....	109
5.5.1. Parámetros de calibración .....	110
5.5.2. Calibración y validación de los modelos .....	110
5.5.3. Resultados de la calibración, Estero Pocuro .....	110
5.5.4. Resultados de la validación, Estero Pocuro. ....	113
5.5.5. Resultados de la calibración, Río Purén.....	114
5.5.6. Resultados de la validación, Río Purén .....	116
CAPÍTULO VI .....	118
6. Análisis de resultados .....	118
6.1. Análisis crítico .....	118
6.1.1. Comportamiento de los HRU sobre las crecidas, cuenca del Estero Pocuro .....	118
6.1.2. Comportamiento de los HRU sobre las crecidas, cuenca del Río Purén .....	123
6.1.3. Análisis sobre el Índice de Silueta .....	125
6.2. Análisis de sensibilidad .....	127

6.2.1. Sensibilidad sobre el Análisis de Componentes Principales (PCA, Purén).....	127
6.2.2. Sensibilidad con respecto al tiempo de concentración (Purén).....	129
6.2.3. Sensibilidad con respecto al valor de Curva Número (CN, Purén).....	134
6.2.4. Escenario especial: Variaciones sobre CN y tiempo de concentración (Purén) .....	139
CAPITULO VII .....	141
7. Conclusiones.....	141
7.1. Sobre los modelos, métodos y resultados .....	141
7.2. Comentarios finales .....	141
CAPÍTULO VIII .....	143
8. Referencias .....	143

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Escalas espacio-temporales de diversos procesos hidrológicos. ....	16
Figura 2.2. Estructura típica y variables de un modelo hidrológico. ....	18
Figura 2.3. Ilustración del error de simulación para dos variables de salida. ....	19
Figura 2.4. Metodología de delineamiento de HRU propuesta por Young <i>et al.</i> [14] .....	22
Figura 2.5. Delineamiento de HRU propuesta por Savvidou <i>et al.</i> [7] .....	23
Figura 2.6. Representación de la proyección de Variables sobre un plano de PCA. ....	25
Figura 2.7. Hidrograma Unitario de Snyder. ....	26
Figura 2.8. Almacenamiento dentro del canal. ....	30
Figura 2.9. Dominio de los parámetros X y K. ....	31
Figura 2.10. Esquema del ciclo hidrológico. ....	34
Figura 2.11. Distribución de humedad relativa para una cuenca, obtenida por medio de herramientas NetCDF. ....	39
Figura 3.1. Metodología de determinación del parámetro CN según Savvidou <i>et al.</i> [7]. ....	42
Figura 3.2. Descomposición de red de canales dentro de una cuenca. ....	45
Figura 3.3. Distribución de la precipitación sobre una cuenca por medio de gestión de datos NetCDF. ....	47
Figura 3.4. Metodología de delineamiento de Unidades de Respuesta Hidrológica. ....	48
Figura 3.5. Conjunto de variables proyectadas sobre dos dimensiones del PCA realizado a dicho conjunto. ....	49
Figura 3.6. Dendrograma de agrupamiento jerárquico. ....	50
Figura 3.7. Esquema de modelo hidrológico de HEC-HMS. ....	51
Figura 3.8. Descomposición de cuenca en 3 Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU), y su diagrama de implementación en un modelo hidrológico. ....	52
Figura 4.1. Cuenca del Estero Pocuro. ....	53
Figura 4.2. Imagen satelital, cuenca del Estero Pocuro. ....	54
Figura 4.3. Curva hipsométrica de la cuenca. ....	55
Figura 4.4. Morfología de la cuenca. ....	55
Figura 4.5. Climograma representativo Estero Pocuro. ....	56
Figura 4.6. Curva de régimen y precipitaciones medias mensuales, Estero Pocuro. ....	57
Figura 4.7. Distribución de categorías geológicas. ....	58
Figura 4.8. Distribución de coberturas vegetales. ....	59
Figura 4.9. Distribución de longitudes de cauce. ....	60
Figura 4.10. Distribución de tiempos de concentración. ....	61
Figura 4.11. Distribución de pendientes en cuenca. ....	62
Figura 4.12. Distribución espacial del parámetro Curva Número (CN). ....	63
Figura 4.13. Distribución de precipitación media anual. ....	64

Figura 4.14. Distribución corregida de precipitación media anual. ....	65
Figura 4.15. Distribución de temperatura media anual. ....	65
Figura 4.16. Distribución corregida de temperatura media anual. ....	66
Figura 4.17. Hidrograma de crecida en estación “Estero Pocuro en El Sifón”, evento de Mayo 2012. ....	67
Figura 4.18. Hidrograma de crecida en estación “Estero Pocuro en El Sifón”, evento de Mayo 2012. ....	68
Figura 4.19. Ubicación de estaciones meteorológicas de Agromet y DGA. ....	69
Figura 4.20. Distribución de precipitación a nivel horario, estaciones Agromet, evento de Mayo 2012. ....	70
Figura 4.21. Distribución de temperatura a nivel horario, estaciones Agromet, evento de Mayo de 2012. ....	70
Figura 4.22. Distribución de precipitación y temperaturas medias diarias, Estación “Estero Pocuro en El Sifón”. ....	71
Figura 4.23. Hietograma de Precipitación, estación “Estero Pocuro en El Sifón”, evento de Mayo de 2012. ....	72
Figura 4.24. Distribución de precipitación a nivel horario, estaciones Agromet, evento de Abril de 2017. ....	73
Figura 4.25. Distribución de temperatura a nivel horario, estaciones Agromet, evento de Abril de 2017. ....	73
Figura 4.26. Hietograma de Precipitación, estación “Estero Pocuro en El Sifón”, evento de Abril de 2017. ....	74
Figura 4.27. Cuenca del Río Purén. ....	75
Figura 4.28. Imagen satelital, cuenca del Río Purén. ....	76
Figura 4.29. Morfología de la cuenca. ....	77
Figura 4.30. Curva hipsométrica de la cuenca. ....	77
Figura 4.31. Climograma representativo Río Purén. ....	78
Figura 4.32. Curva de régimen y precipitaciones medias mensuales, Río Purén. ....	78
Figura 4.33. Distribución de categorías geológicas. ....	80
Figura 4.34. Distribución de coberturas vegetales. ....	81
Figura 4.35. Distribución de longitudes de cauce. ....	82
Figura 4.36. Distribución de tiempos de concentración. ....	83
Figura 4.37. Distribución de pendientes en cuenca. ....	84
Figura 4.38. Distribución espacial del parámetro Curva Número (CN). ....	85
Figura 4.39. Distribución de precipitación media anual. ....	86
Figura 4.40. Distribución corregida de precipitación media anual. ....	86
Figura 4.41. Distribución de temperatura media anual. ....	87
Figura 4.42. Distribución corregida de temperatura media anual. ....	87

Figura 4.43. Hidrograma de crecida, estación “Río Purén en Tranaman”, evento de Mayo de 2019. .....	88
Figura 4.44. Hidrograma de crecida, estación “Río Purén en Tranaman”, evento de Abril de 2018. .....	89
Figura 4.45. Ubicación de estaciones meteorológicas de Agromet y DGA. ....	90
Figura 4.46. Hietograma de Precipitación, estación “La Isla – Agromet”, evento de Mayo de 2019. .....	90
Figura 4.47. Hietograma de Precipitación, estación “La Isla – Agromet”, evento de Abril de 2018.	91
Figura 4.48. Distribución de Precipitación Media a nivel Trimestral, Estero Pocuro. ....	92
Figura 4.49. Distribución de Precipitación Media a nivel Trimestral, Río Purén. ....	93
Figura 4.50. Distribución de Temperatura Media a nivel Trimestral, Estero Pocuro. ....	93
Figura 4.51. Distribución de Temperatura Media a nivel Trimestral, Río Purén. ....	94
Figura 5.1. Mapa de parámetros cubriendo la cuenca del Estero Pocuro. ....	95
Figura 5.2. Gráfico de correlación entre variables. ....	96
Figura 5.3. Variables utilizadas para realizar el Análisis de Componentes Principales, graficados sobre las primeras dos dimensiones. ....	97
Figura 5.4. Número de clusters en función del índice de silueta. ....	98
Figura 5.5. Representación de Unidades de Respuesta Hidrológica de la cuenca del Estero Pocuro. .....	98
Figura 5.6. Descripción de HRU por medio de Gráficos de caja. ....	99
Figura 5.7. Representación de la cuenca del Estero Pocuro por medio de: A) 2 HRU; B) 4 HRU.	100
Figura 5.8. Descripción de modelo de 2 HRU por medio de gráficos de caja. ....	101
Figura 5.9. Descripción de modelo de 4 HRU por medio de gráficos de caja. ....	102
Figura 5.10. Mapa de parámetros cubriendo la cuenca del Río Purén. ....	103
Figura 5.11. Gráfico de correlación entre variables. ....	104
Figura 5.12. Variables utilizadas para realizar el Análisis de Componentes Principales, graficados sobre las primeras dos dimensiones. ....	105
Figura 5.13. Número de clusters en función del índice de silueta. ....	106
Figura 5.14. Representación de Unidades de Respuesta Hidrológica de la cuenca del Río Purén. .....	107
Figura 5.15. Descripción de HRU por medio de Gráficos de caja. ....	107
Figura 5.16. Representación de la cuenca del Río Purén por medio de 3 HRU. ....	108
Figura 5.17. Descripción de modelo de 3 HRU por medio de gráficos de caja. ....	109
Figura 5.18. Resultados de proceso de calibración (Pocuro), hidrogramas de crecida, evento de Abril de 2017. ....	111
Figura 5.19. Resultados de proceso de calibración (Pocuro), correlaciones entre modelos y observaciones, evento de Abril de 2017. ....	112
Figura 5.20. Resultados de proceso de validación (Pocuro), hidrogramas de crecida, evento de Mayo de 2012. ....	113

Figura 5.21. Resultados de proceso de validación (Pocuro), correlaciones entre modelos y observaciones, evento de Mayo de 2012. ....	114
Figura 5.22. Resultados de proceso de calibración (Purén), hidrogramas de crecida, evento de Mayo de 2019. ....	115
Figura 5.23. Resultados del proceso de calibración (Purén), correlaciones entre modelos y observaciones, evento de Mayo de 2019. ....	115
Figura 5.24. Resultados de proceso de validación (Purén), hidrogramas de crecida, evento de Abril de 2018. ....	116
Figura 5.25. Resultados del proceso de calibración (Purén), correlaciones entre modelos y observaciones, evento de Abril de 2018. ....	117
Figura 6.1. Comparación entre caudales observados y modelados, Modelo de 3 HRU, Cuenca del Estero Pocuro, Evento de Abril de 2017. ....	119
Figura 6.2. Caudales aportados por cada HRU, Modelo de 3 HRU, Cuenca del Estero Pocuro, Evento de Abril de 2017. ....	119
Figura 6.3. Comparación entre caudales observados y modelados, Modelo de 3 HRU, Cuenca del Estero Pocuro, Evento de Mayo de 2012. ....	120
Figura 6.4. Caudales aportados por cada HRU, Modelo de 3 HRU, Cuenca del Estero Pocuro, Evento de Mayo de 2012. ....	120
Figura 6.5. Caudales aportados por cada HRU, Modelo de 2 HRU, Cuenca del Estero Pocuro, Evento de Abril de 2017. ....	121
Figura 6.6. Caudales aportados por cada HRU, Modelo de 2 HRU, Cuenca del Estero Pocuro, Evento de Mayo de 2012. ....	121
Figura 6.7. Caudales aportados por cada HRU, Modelo de 4 HRU, cuenca del Estero Pocuro, Evento de Abril de 2017. ....	122
Figura 6.8. Caudales aportados por cada HRU, Modelo de 4 HRU, cuenca del Estero Pocuro, Evento de Mayo de 2012. ....	122
Figura 6.9. Comparación entre caudales observados y modelados, Modelo de 2 HRU, Cuenca del Río Purén, Evento de Mayo de 2019. ....	123
Figura 6.10. Caudales aportados por cada HRU, Modelo de 2 HRU, cuenca del Río Purén, Evento de Mayo de 2019. ....	124
Figura 6.11. Comparación entre caudales observados y modelados, Modelo de 2 HRU, cuenca del Río Purén, Evento de Abril de 2018. ....	124
Figura 6.12. Caudales aportados por cada HRU, Modelo de 2 HRU, cuenca del Río Purén, Evento de Abril de 2018. ....	125
Figura 6.13. Distribución de siete HRU sobre la cuenca del Río Purén. ....	126
Figura 6.14. Descripción de los HRU en términos de sus parámetros, Cuenca del Río Purén, caso de siete unidades. ....	126
Figura 6.15. Gráfico de correlaciones para conjunto expandido de variables (Purén). ....	128
Figura 6.16. Variables utilizadas para realizar el Análisis de Componentes Principales, graficados sobre las primeras dos dimensiones. ....	129
Figura 6.17. Rangos de valores de tiempos de concentración. ....	130

Figura 6.18. Correlación entre valores de tiempos de concentración con respecto a fórmula de Kirpich. ....	131
Figura 6.19. Distribución del tiempo de concentración para cada fórmula, sobre la cuenca del Río Purén. ....	131
Figura 6.20. Variación en la distribución de los HRU sobre la cuenca del Río Purén debido a cambios en la fórmula de tiempo de concentración. ....	132
Figura 6.21. Descripción de los HRU para escenarios A) Original; B) Modificado, por medio de la distribución del parámetro CN. ....	132
Figura 6.22. Descripción de los HRU para escenarios A) Original; B) Modificado, por medio de la distribución del tiempo de concentración. ....	133
Figura 6.23. Descripción de los HRU para escenarios A) Original; B) Modificado, por medio de la distribución de Precipitación. ....	133
Figura 6.24. Descripción de los HRU para escenarios A) Original; B) Modificado, por medio de la distribución de Temperatura. ....	134
Figura 6.25. Distribución de matorrales sobre la cuenca del Río Purén. ....	135
Figura 6.26. Variaciones sobre la distribución del parámetro CN sobre la cuenca del Río Purén debido a cambios en la cobertura vegetal. ....	135
Figura 6.27. Variación sobre la distribución de los HRU sobre la cuenca del Río Purén debido a cambios en la cobertura vegetal. ....	136
Figura 6.28. Descripción de los HRU para escenarios A) Original; B) Modificado, por medio de la distribución del parámetro CN. ....	136
Figura 6.29. Descripción de los HRU para escenarios A) Original; B) Modificado, por medio de la distribución del tiempo de concentración. ....	137
Figura 6.30. Descripción de los HRU para escenarios A) Original; B) Modificado, por medio de la distribución de Precipitación. ....	137
Figura 6.31. Descripción de los HRU para escenarios A) Original; B) Modificado, por medio de la distribución de Temperatura. ....	137
Figura 6.32. Distribución de cantidad óptima de HRU sobre la cuenca del Río Purén para escenario de variación de coberturas vegetales. ....	138
Figura 6.33. Descripción de cantidad óptima de HRU para escenario de cambio de coberturas vegetales, en términos de sus parámetros. ....	139
Figura 6.34. Distribución de los HRU sobre la cuenca del Río Purén debido a cambios de los parámetros de CN y tiempo de concentración. ....	140
Figura 6.35. Descripción de cantidad óptima de HRU para escenario especial, en términos de sus parámetros. ....	140

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Parámetros de funcionamiento de (46).....	33
Tabla 2.2. Productos climáticos evaluados para el Balance Hídrico Nacional.....	37
Tabla 3.1. Valores aproximados de permeabilidad local, según Gleeson et al. [29] en base a las categorías litológicas de Dürr et al. [28].....	43
Tabla 3.2. Clasificación de coberturas vegetales según Di Gregorio [32]. .....	43
Tabla 3.3. Clasificación del parámetro $i_v$ en base a las categorías de cobertura vegetal. ....	44
Tabla 3.4. Valores de coeficiente de Manning de acuerdo a clasificación de tipo de suelo.....	46
Tabla 3.5. Lista de parámetros de análisis de PCA.....	48
Tabla 4.1. Descripción de categorías geológicas, cuenca Estero Pocuro.....	57
Tabla 4.2. Descripción de coberturas vegetales.....	58
Tabla 4.3. Valores meteorológicos diarios, estaciones DGA, evento de Mayo de 2012.....	70
Tabla 4.4. Valores de precipitación y temperaturas medias diarias, Estación “Estero Pocuro en El Sifón”.....	71
Tabla 4.5. Valores meteorológicos diarios, estaciones DGA, evento de Abril de 2017. ....	74
Tabla 4.6. Descripción de categorías geológicas, cuenca Río Purén. ....	79
Tabla 4.7. Descripción de coberturas vegetales.....	80
Tabla 4.8. Valores de precipitación a nivel diario, estaciones DGA, evento de Mayo de 2019. ....	91
Tabla 4.9. Valores de precipitación a nivel diario, estaciones DGA, evento de Abril de 2018. ....	92
Tabla 5.1. Resumen de datos del Análisis de Componentes Principales para todo el conjunto de dimensiones y variables.....	97
Tabla 5.2. Parámetros de Modelo Integrado. ....	100
Tabla 5.3. Resumen de datos del Análisis de Componentes Principales para todo el conjunto de dimensiones y variables.....	104
Tabla 5.4. Parámetros de Modelo Integrado. ....	108
Tabla 5.5. Eventos de crecidas asociados a procesos de calibración y validación. ....	110
Tabla 5.6. Valores de parámetros calibrados, cuenca Estero Pocuro.....	111
Tabla 5.7. Indicadores de eficiencia para modelos calibrados (Pocuro). ....	112
Tabla 5.8. Indicadores de eficiencia para modelos validados (Pocuro). ....	113
Tabla 5.9. Valores de parámetros calibrados, cuenca Río Purén. ....	115
Tabla 5.10. Indicadores de eficiencia para modelos calibrados (Purén). ....	116
Tabla 5.11. Indicadores de eficiencia para modelos validados (Purén). ....	116
Tabla 6.1. Resumen de datos del Análisis de Componentes Principales para el conjunto expandido de variables, primeras 5 dimensiones (Purén). ....	128
Tabla 6.2. Fórmulas para el tiempo de concentración.....	129

# CAPÍTULO I

## 1. Descripción del trabajo

### 1.1. Planteamiento del problema

En parte del ejercicio de la Ingeniería Civil, asociado al ámbito de la Ingeniería Hidráulica, se requiere el uso de simulaciones de distintos fenómenos hidrológicos de interés, con el objeto de proveer y desarrollar herramientas para resolver problemas concretos asociados a la estimación de recursos hídricos, así como la evaluación de riesgos hidrológicos.

Para desarrollar estas simulaciones, se requieren modelos hidrológicos asociados a la cuenca. Hingray, Musy y Picouet [1] definen a un modelo hidrológico como la representación matemática de una cuenca, por medio de ciertos parámetros asociados y ciertas ecuaciones características. Por medio de estos modelos se pueden simular una parte o todos los fenómenos hidrológicos que ocurren dentro de ella.

Al momento de desarrollar un modelo hidrológico sobre una cuenca, ésta puede ser analizada de dos formas: la primera considera a la cuenca como una sola entidad homogénea, mientras que la segunda considera descomponer la cuenca en subsecciones geográficamente adyacentes (subcuencas), con características más específicas. El primer caso puede considerarse una aproximación aceptable, cuando la superficie de la cuenca a estudiar es relativamente pequeña, por ejemplo, 5 [km<sup>2</sup>] o menos. Por otra parte, al aumentar la superficie de la cuenca de modo considerable, conviene descomponer la cuenca en subcuencas, y conectándolas a una red de canales, incorporando al análisis los fenómenos de tránsito de crecidas que ocurren dentro de la red [2], [3].

En cualquiera de los casos anteriormente mencionados, parte del proceso de modelación recurre a simplificar los parámetros de interés, reduciendo la heterogeneidad de la cuenca, y, en consecuencia, aumentando la incertidumbre de los resultados del proceso de modelación. Debido a que la naturaleza propia de la cuenca es más compleja que los modelos de simulación [4], una simplificación excesiva, ya sea porque los parámetros se estiman erróneamente, o porque las ecuaciones asociadas al modelo en cuestión son muy simples, puede conllevar a que los procesos hidrológicos en estudio no puedan ser representados correctamente.

A partir de esta situación, durante las últimas décadas los esfuerzos se han dedicado a desarrollar metodologías que puedan incorporar la heterogeneidad de las cuencas como parte importante en la modelación hidrológica. Autores como Leavesley *et al.* [5] y Flügel [6], incorporan el concepto de Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU) como una aproximación para modelos hidrológicos semi-distribuidos. Flügel [6] define una HRU como una región homogénea con características similares, y, en consecuencia, una respuesta hidrológica similar, en base a cierto fenómeno. En base a esto, se tiene que la variación dinámica de los procesos hidrológicos sea pequeña dentro de una HRU sea pequeña en comparación con las variaciones y respuestas dentro de otras HRU. Autores como Savvidou *et al.* [7] asumen que las HRU no representan necesariamente áreas geográficamente contiguas, por lo que su topología se desprecia; y además, la descarga total de la cuenca se puede determinar como la suma de las descargas de cada HRU.

Implementar este concepto dentro de un modelo hidrológico conlleva a varias interrogantes: ¿Cómo se delinean las HRU? ¿Qué factores o parámetros inciden en su delineamiento? ¿Cuántas HRU son necesarias para tener una representación correcta de la cuenca en el modelo hidrológico? Para contestar estas preguntas, este trabajo de título busca aplicar y proponer mejoras sobre una metodología de delineamiento de HRU, de modo de implementarlas en un software de modelación de crecidas.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo general**

El objetivo principal de esta Memoria de Título es usar la metodología de delineamiento de HRU PCA/HPCPC [8, 9, 10], de modo de implementarlas en el software de modelación hidrológica de crecidas HEC-HMS.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

- Realizar una revisión bibliográfica que sirva como referencia para identificar investigaciones sobre implementación de modelos de HRU.
- Definir un modelo hidrológico: fórmulas, variables, parámetros de interés.
- Delimitar las HRU por medio de la metodología de Análisis de Componentes Principales, y calibrar el modelo hidrológico sobre dichas HRU construidas.
- Comparar los resultados de la modelación hidrológica tradicional con los resultados obtenidos por medio de la metodología propuesta.

## **1.3. Organización del documento**

Además del presente, el informe se compone de otros 6 capítulos, que se resumen a continuación:

En el capítulo 2 se presenta una revisión bibliográfica de los principales tópicos que se utilizaron en el desarrollo de este trabajo. Se hará una reseña sobre los conceptos de Modelación Hidrológica, Unidades de Respuesta Hidrológica y Análisis de Componentes Principales, y se darán a conocer las bases de funcionamiento del software HEC-HMS, más los métodos de escorrentía y tránsito de crecidas asociados al mismo. También se realizará un breve resumen sobre el Balance Hídrico Nacional [11].

En el capítulo 3, se define la metodología de delineamiento de las HRU PCA/HPCPC: se definen los parámetros de interés en base a los métodos de escorrentía y tránsito de crecidas; se exponen los criterios de delineamiento de las HRU (cantidad óptima de HRU y composición de las mismas), y la representación de las mismas en el modelo hidrológico.

La información disponible para la modelación de la cuenca, datos morfológicos, meteorológicos, entre otros, se presentan en el capítulo 4.

En el capítulo 5 se realiza la construcción del modelo hidrológico, su ejecución en HEC-HMS, y se detallan los resultados obtenidos en la calibración del mismo.

En el capítulo 6, se analizan los comportamientos de cada HRU con respecto al caudal de salida para cada modelo realizado. Asimismo, se realiza un análisis de sensibilidad sobre el conjunto de parámetros que pueda implicar un alto grado de incertidumbre.

Finalmente, en el capítulo 7, se detallan conclusiones y comentarios derivados de este trabajo, considerando los objetivos previamente planteados y los resultados obtenidos.

## **1.4. Alcances del trabajo**

- El estudio se realizará en las cuencas del Estero Pocuro y Río Purén
- Para el punto de salida de cada cuenca, se utilizarán las estaciones fluviométrica “Estero Pocuro en El Sifón” y “Río Purén en Tranaman”, respectivamente.
- Para realizar la modelación hidrológica se utilizará el programa HEC-HMS en su versión 4.3.

- Los datos observados de precipitaciones, temperatura y caudales, son aquellos provenientes de las estaciones de la Dirección General de Aguas (DGA), de la Red Agroclimática Nacional del INIA, y de la información disponible del Balance Hídrico Nacional.
- Se modelará a escala temporal horaria.
- La información geográfica (elevaciones) se obtendrá por medio de ASTER v3 [12].
- La información disponible de cobertura vegetal se obtendrá desde el Mapa de Cobertura de Suelos de Chile 2014 [13].
- La manipulación de estos datos se realizará por medio del programa RStudio.

## CAPÍTULO II

### 2. Revisión bibliográfica

#### 2.1. Modelación Hidrológica

De acuerdo a lo estipulado por Hingray, Musy y Picouet [1], un modelo hidrológico consiste en la representación matemática de un sistema hidrológico y su dinámica, de modo de simular una parte o todo su comportamiento. El objetivo de la modelación hidrológica es, en rigor, desarrollar y/o evaluar las diversas variables hidrológicas requeridas para cierta aplicación, estudio, o proyecto; así como para reconstruir y/o verificar datos, o como complementos en investigaciones asociadas a la hidrología.

Esta representación (simplificada) se lleva a cabo a través de un conjunto de variables de interés y ecuaciones que expresan los conceptos o comportamientos necesarios para describir apropiadamente el comportamiento del sistema a analizar.

Sin embargo, en palabras de Musy y Higy, el comportamiento de un sistema hidrológico es extremadamente complejo [4]. Esto se debe a la complejidad y heterogeneidad de las características propias de la cuenca (características geomorfológicas de la cuenca, propiedades y uso de suelos, características de la red de canales interna de la cuenca). Este hecho explica la variedad de procesos hidrológicos que suceden dentro de una cuenca, los que, a su vez, funcionan a diferentes escalas espacio-temporales.

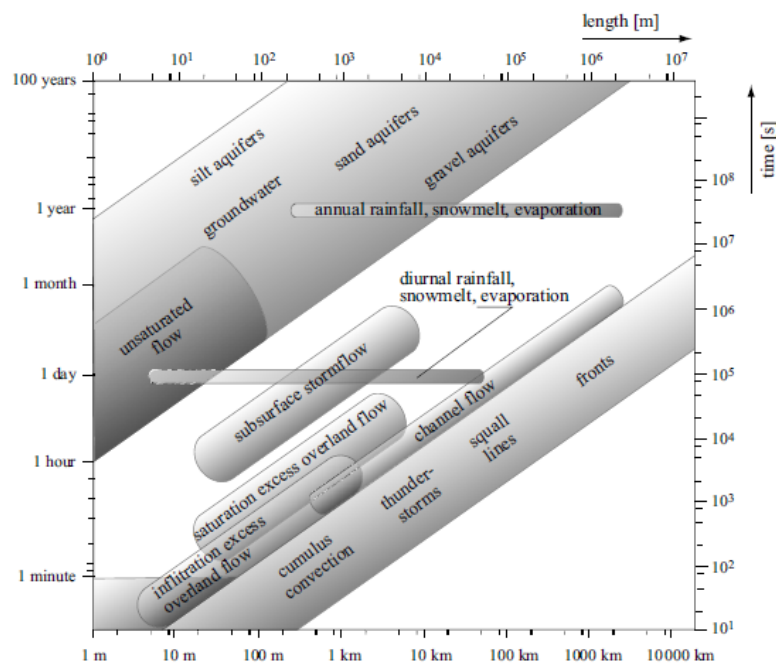


Figura 2.1. Escalas espacio-temporales de diversos procesos hidrológicos.<sup>1</sup>

En consecuencia, todos los modelos hidrológicos son una representación extremadamente simplificada de un sistema real y de su funcionamiento. Por conveniencia, los modelos se enfocan

<sup>1</sup> Fuente: [1]

en los procesos y las escalas que son críticas con respecto al fenómeno hidrológico en estudio. Por ejemplo, en un modelo de crecida-escorrentía (como es el objeto de este trabajo) ignora los procesos asociados a evaporación y recarga de acuíferos; por otra parte, en un modelo basado en la variabilidad estacional o anual de recursos hídricos, los procesos asociados a escorrentía se desprecian [1, 4]. Por lo tanto, un modelo hidrológico es altamente dependiente del objetivo final de la observación; y sin importar cual fuese el objetivo, existen diversas formas de simplificar la cuenca y los procesos hidrológicos asociados. Por este motivo, para cualquier sistema hidrológico, hay una variedad de posibilidades de modelación.

### 2.1.2. Objetivos de la modelación hidrológica

Según Hingray, Musy y Picouet [1], la modelación hidrológica puede tener diversos objetivos. Desde un punto de vista científico, el objetivo principal es mejorar la comprensión y el entendimiento que se tiene sobre el comportamiento de un sistema hidrológico, por medio de la simulación de los elementos y procesos que lo componen. Bajo ciertas condiciones de funcionamiento, la modelación hidrológica puede:

- Identificar procesos de importancia y cualquier tipo de no-linealidad en el comportamiento de un sistema hidrológico.
- Probar diversas hipótesis y marcos conceptuales.
- Identificar cualquier falta de información/conocimiento acerca del comportamiento de algún componente del sistema hidrológico.
- Simular el comportamiento del sistema, en casos probables donde no se cuenta con observaciones disponibles.

Las modelaciones pueden ser usadas para reconstruir eventos hidrológicos históricos previamente observados, pero no medidos, como lo son crecidas en cuencas sin información fluviométrica. También se pueden utilizar para pronósticos hidrológicos, siendo el objetivo la estimación de cambios futuros en las variables hidrológicas de interés, como en los escenarios requeridos para el manejo de recursos hídricos en el mediano y largo plazo.

### 2.1.3. Estructura y variables de un modelo hidrológico

La estructura típica de un modelo hidrológico y sus variables asociadas se resumen en la figura 2.2. El modelo, llamado  $G$ , puede ser definido por la expresión:

$$Z_{OBS}(t) = G[X(t), Y(t), CL(t), \theta] + \varepsilon_Z(t, \theta) \quad (1)$$

Donde  $Z_{OBS}(t)$  son los valores observados en el tiempo  $t$  para cada una de las variables de salida del modelo hidrológico,  $X(t)$ ,  $Y(t)$ , y  $CL(t)$  son los valores de las variables de entrada, variables de estado y condiciones de borde en el tiempo  $t$ , respectivamente. Además,  $\theta$  está asociado al conjunto de parámetros asociados al modelo, mientras que  $\varepsilon_Z$  está asociado a los errores del modelo en un tiempo  $t$ .

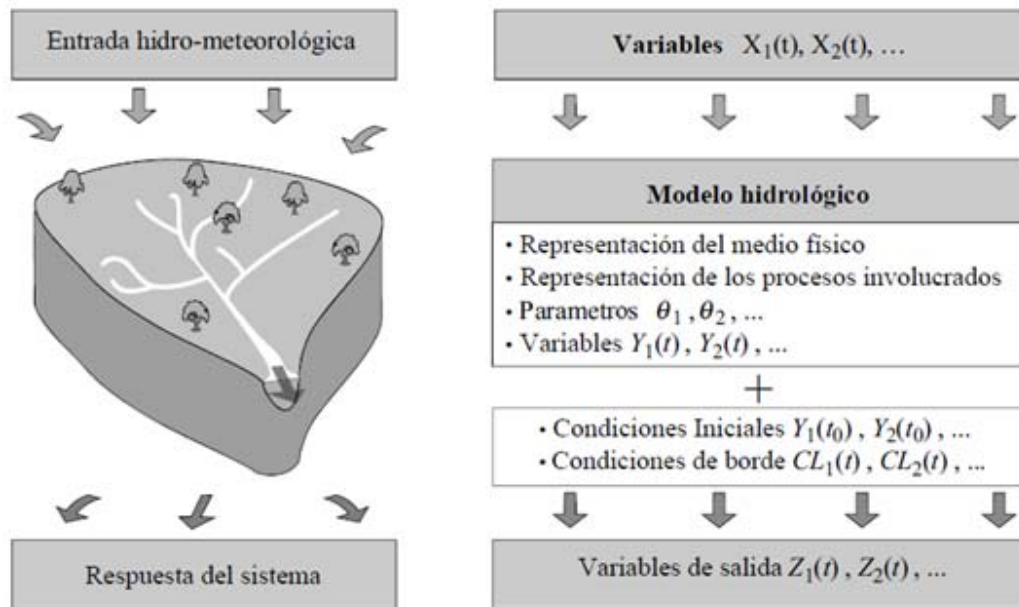


Figura 2.2. Estructura típica y variables de un modelo hidrológico.<sup>2</sup>

Por lo general, las variables de entrada  $X(t)$  son independientes entre sí, y suelen estar disponibles en la forma de series de tiempo. Dichas variables de entrada a usar dependen del modelo, pero en su mayoría tienen a asociarse con fenómenos meteorológicos, como precipitación, evapotranspiración de referencia y temperatura. Dichos datos suelen estar disponibles sólo en ciertos puntos, correspondientes a las estaciones de medición ubicadas dentro de la cuenca. En algunos casos, los datos pueden reflejar una distribución espacial, como ocurre en el caso de los campos de precipitación derivados de las observaciones realizadas por medio de satélites o radar. Otras variables de entrada pueden incluir caudales desde cuencas *aguas arriba*, o salidas de caudal para riego u otros usos.

Los valores de salida de las variables producidas por la simulación están asociados a la expresión:

$$Z_{SIM}(t, \theta) = G[X(t), Y(t), CL(t), \theta] \quad (2)$$

La variable de salida principal de cualquier modelo hidrológico es el caudal de descarga de la cuenca, o a veces el nivel del cauce, en uno o más puntos dentro de la red de canales. Asimismo, otras variables del ciclo hidrológico suelen ser simuladas, como la tasa de evaporación, altura de nivel freático, superficie cubierta con nieve y volumen de agua equivalente.

Los valores de salida del modelo pueden ser comparados con los valores observados para cada una de las variables hidrológicas, si es que están disponibles. La diferencia entre los valores obtenidos por medio de la modelación y los valores observados para cierta variable representan el error (o residuo) del modelo. Dicho error varía con el tiempo para cada variable. El error asociado a una variable  $Z$  se expresa por medio de:

$$\varepsilon_Z(t, \theta) = Z_{OBS}(t) - Z_{SIM}(t, \theta) \quad (3)$$

Donde  $Z_{OBS}$  y  $Z_{SIM}$  corresponden ser los valores observados y obtenidos por medio de la modelación, respectivamente.  $\varepsilon_Z$  corresponde ser el error del modelo, que, a su vez, es una función dependiente del tiempo y del conjunto de parámetros asociados al modelo, definido por  $\theta$ . Por tanto, se puede

<sup>2</sup> Fuente: [1].

inferir que el error del modelo dependerá de cuáles sean los parámetros requeridos para la construcción del mismo, y cómo sean utilizados.

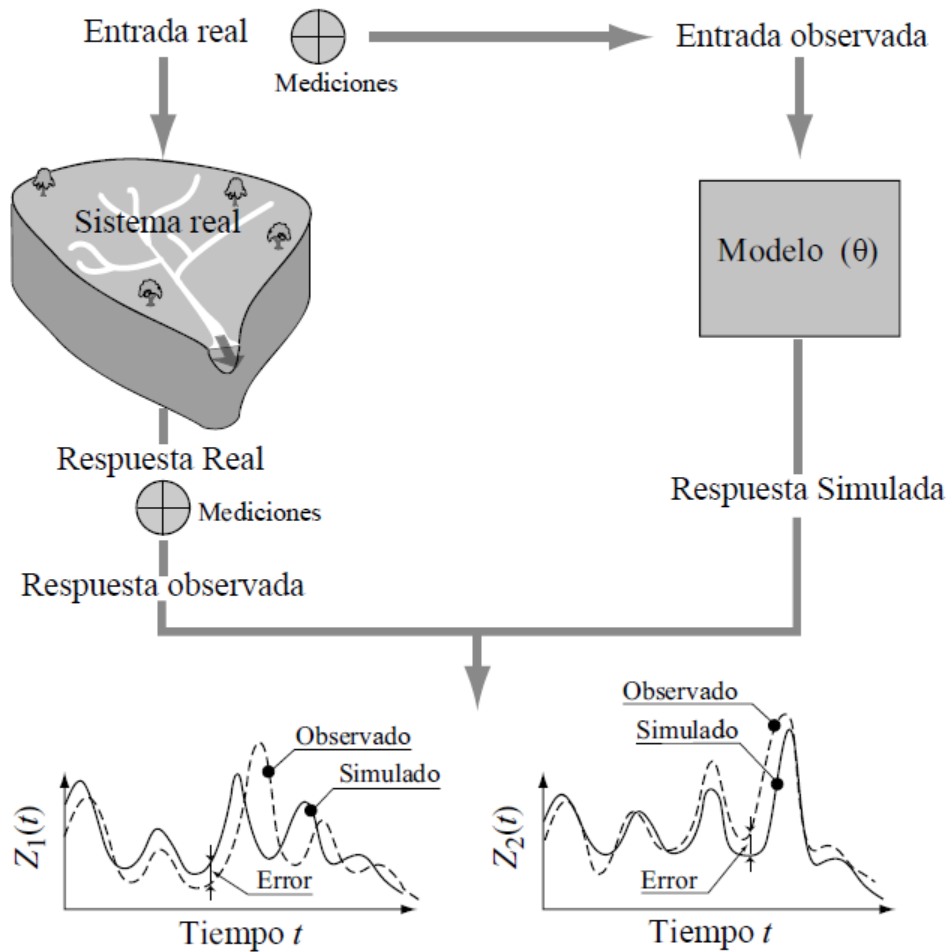


Figura 2.3. Ilustración del error de simulación para dos variables de salida.<sup>3</sup>

#### 2.1.4. Construcción del modelo hidrológico

Al momento de construir un modelo hidrológico, se pueden seguir dos formas para tal propósito.

El primer método de construcción, denominado “de arriba abajo” (o “top-down”), limita los objetivos de la modelación, de modo de desarrollar el modelo hidrológico de la forma más simple posible, sólo considerando los procesos más importantes de acuerdo al objetivo deseado. La representación de los procesos dentro del modelo o la geometría de la cuenca de estudio pueden ser refinados gradualmente, en la medida en que se cuente con más información y/u observaciones. Este método se usa generalmente en procesos hidrológicos operacionales, y conlleva al desarrollo de modelos relativamente sencillos y eficientes para los objetivos propuestos.

El segundo método es referido como “abajo arriba” (“bottom-up”). En este caso, los objetivos de modelación no están predefinidos. Se asume que el comportamiento general del sistema puede ser simulados correctamente a medida que los procesos que controlan el sistema están suficientemente reconocidos, y en conjunto con la interdependencia entre los procesos, están correctamente

<sup>3</sup> Fuente: [1].

representados. Esto lleva a modelos con estructuras muy complejas y mucho más difícil de evaluar, dado que a menudo, los datos experimentales requeridos no existen. Para ser usados a escala operacional, estos modelos requieren cierto número de simplificaciones, asumiendo que uno (o varios) de los procesos inicialmente considerados no tiene relevancia alguna en el desarrollo del modelo [1].

Sea como fuere, la construcción de un modelo hidrológico está basada idealmente en:

1. Observación y experimentación del fenómeno hidrológico de interés y sus procesos asociados;
2. Formulación de los supuestos requeridos para representar el medio físico y los procesos que ocurren dentro de él;
3. Poner a prueba dichos supuestos.

Estos tres pasos sucesivos se vuelven a priori un método iterativo, apuntando a mejorar la descripción matemática y conocimiento de algunos o todos los componentes del ciclo hidrológico.

### 2.1.5. Representación de los procesos

Las distintas formas de representar los procesos que ocurren dentro de la cuenca, conducen a modelos empíricos, conceptuales, o de base física. Sea cual sea el tipo de representación, los modelos están compuestos generalmente de distintos módulos, cada uno de ellos diseñado para describir los procesos que componen la cuenca.

1. **Modelos empíricos:** Se basan en las relaciones entre los valores de entrada y salida de la cuenca de estudio. Estos modelos expresan las relaciones entre los parámetros de entrada y salida del sistema por medio de un conjunto de fórmulas desarrolladas y ajustadas por medio de información extraída desde la misma cuenca. Un modelo empírico no está diseñado para describir las causas del fenómeno hidrológico considerado o para describir el funcionamiento interno de la cuenca, sino que está diseñado para funcionar como una “caja negra”.
2. **Modelos conceptuales:** Están diseñados para representar los principales procesos hidrológicos de un modo razonable, sin tener que recurrir a la parametrización de las leyes físicas que los controlan. Esta representación es *conceptual* dado que está basada en la percepción que tenga el hidrólogo sobre el comportamiento general de la cuenca. Dicha percepción se basa en la experiencia/expertiz que se tenga, junto con el conocimiento teórico, empírico y/o intuitivo acerca de la cuenca en estudio.
3. **Modelos de base física:** Representan el comportamiento de la cuenca por medio del acoplamiento de varios sub-modelos, cada uno de ellos a cada proceso hidrológico por separado. Generalmente, están asociados a una discretización espacial fina del medio. Sea cual fuere la naturaleza y la resolución de la discretización utilizada, la variabilidad espacial del medio físico y sus procesos involucrados, sólo pueden ser descritos explícitamente en escalas mucho más grandes que las escalas asociadas al proceso de discretización.

### 2.1.6. Discretización del espacio

Los modelos pueden ser distinguidos en la forma en que representan el medio físico, y en particular, por las dimensiones en las cuales se resuelven las fórmulas que describen los procesos hidrológicos. Por su parte, la cuenca puede ser representada de modo discreto, por medio de distintas unidades espaciales. Dependiendo del nivel de discretización y de las relaciones entre sus elementos, los modelos se pueden definir como *espaciales*, *semi-espaciales*, y *distribuidos*.

**Modelo espacial:** estos modelos tratan de representar el medio físico, y en particular, la superficie de la cuenca, utilizando una discretización espacial relativamente fina. Un modelo

espacial simula la evolución del sistema en cada punto de su discretización, junto con los intercambios de agua de los elementos que lo rodean. Cada elemento de la discretización, es, en principio, caracterizado con sus propios parámetros. Dada la influencia de la topografía en el proceso de escorrentía que ocurre dentro de la cuenca, la discretización está generalmente asociada a la forma en la cual se describe la topografía de la cuenca.

**Modelo semi-espacial:** En este tipo de modelos, la discretización consiste en delimitar unidades hidrológicas, para las cuales se asume que su comportamiento puede ser descrito por medio de un modelo distribuido, o bien, como un elemento único (también llamado Modelo Agregado). Se asume que cada una de estas unidades funciona de modo independiente, y que descargan una sobre otra, o bien hacia la red de canales asociada a la cuenca. Cuando las cuencas son muy grandes, las unidades hidrológicas suelen ser sub-cuencas de la misma. Los métodos para definir dichas sub-cuencas son meramente empíricos, y se basan en la topografía, la estructura de la red de canales y los puntos clave dentro de la misma.

**Modelo semi-distribuido:** En un modelo de este tipo, se asume que el comportamiento de la cuenca puede ser representado por medio del comportamiento de un número limitado de unidades hidrológicas, cada una de ellas representando los principales comportamientos a nivel hidrológico dentro de una cuenca. A diferencia de un modelo espacial, el cual está fuertemente marcado por la topografía de la cuenca, en un modelo distribuido se pueden incorporar otros aspectos y/o características. Por lo general, se refiere a estas unidades como Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU).

## 2.2. Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU)

Desde mediados de la década de 1990, se ha dado atención a métodos de parametrización basados en el medio físico por medio de las Unidades de Respuesta Hidrológica, las cuales generalmente representan áreas con similar uso de suelo y características. Este concepto fue introducido por Leavesley [5], quien delineó elementos basados en segmentos topográficos para simulaciones de crecida con el modelo hidrológico PRMS (Precipitation-Runoff Modeling System). En su aproximación, cada unidad era considerada como el equivalente a uno o varios planos de flujo dentro de la cuenca.

En un modo más amplio, Flügel [6], define a una Unidad de Respuesta Hidrológica (también conocida por su sigla HRU, *Hydrologic Response Unit*) como un elemento estructuralmente homogéneo, con parámetros en común (clima, uso de suelos, cobertura vegetal, etc.), que controlan la dinámica interna de la unidad, es decir, con una respuesta hidrológica similar frente a un fenómeno impuesto en particular. El supuesto crítico para esta afirmación radica en que la variación dinámica de los procesos que ocurren dentro de una HRU en particular sea pequeña en comparación con otras.

En términos del modelo hidrológico, la respuesta total de la cuenca se determina como la suma de cada una de las respuestas de cada HRU. La importancia de cada HRU es proporcional al área que ésta tiene dentro de la cuenca. Diversos autores [7, 14] declaran que una HRU no representa, necesariamente, áreas geográficamente contiguas, por lo que la topología de estos elementos puede ser simplificada o despreciada.

### 2.2.1. Metodologías de delineamiento de HRU

Cabe destacar que no existe un criterio unificado para delinear HRU, ni tampoco se cuenta con un criterio unificado para determinar una cantidad ideal de unidades. No obstante, la mayoría de las

metodologías de delineamiento de HRU se basan en correlaciones entre las características físicas y ecológicas de la cuenca, y sus respectivos parámetros de modelación [1].

Por ejemplo, Young *et al.* [14] utilizan un conjunto de cuencas de la Sierra Nevada en California, y las descomponen en HRU, por medio de la intersección de sub-cuencas, tipo de suelo, cobertura vegetal y bandas de elevación, de modo de implementarlas como elementos *catchment* en WEAP (Ver Figura 2.4). El objetivo de este criterio de delineamiento consiste en que, al incorporar dentro del análisis las bandas de elevación, se espera que las distribuciones de precipitación y temperatura influyeran sobre los procesos hidrológicos internos (variabilidad de precipitaciones, existencia de zonas nivales, aportes por derretimiento de nieve, etc.), mientras que los demás parámetros complementan otros procesos (por ejemplo, precipitación efectiva y escorrentía).

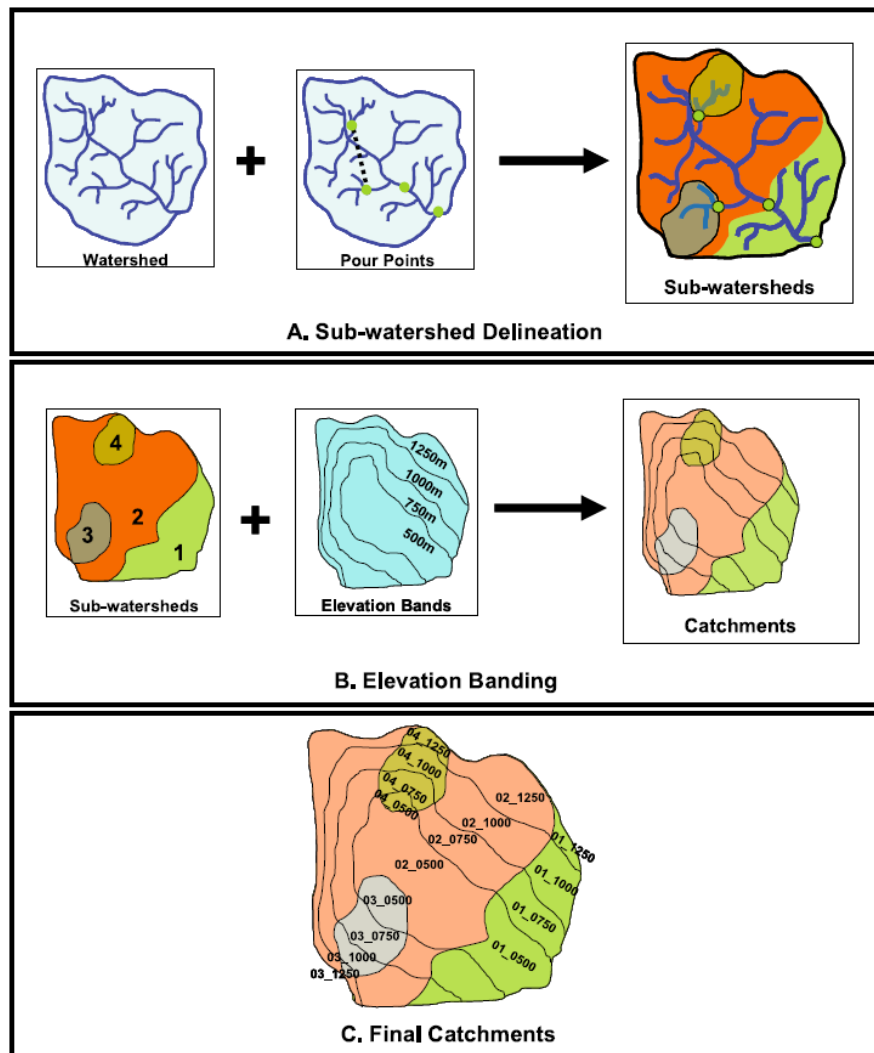


Figura 2.4. Metodología de delineamiento de HRU propuesta por Young *et al.* [14]

Por otra parte, Savvidou *et al.* [7] define las Unidades de Respuesta en torno a rangos del parámetro de Curva Número (CN), asociado al método de precipitación efectiva y escorrentía homónimo del SCS [2, 3]. Dicho parámetro está fuertemente vinculado a las características topográficas y geológicas de la cuenca, así como la existencia y distribución de coberturas vegetales. Teniendo en cuenta dicho vínculo, Savvidou establece un criterio de delineamiento del parámetro CN, estableciendo rangos de valores asociados a pendientes, vegetación y permeabilidad del suelo, y en

base a dichos rangos de valores, establece por medio de una fórmula el valor del CN. La distribución del parámetro CN sobre la superficie de la cuenca del Río Nedontas (Grecia) es descrita, por medio de cuatro rangos diferentes, en la Figura 2.5.

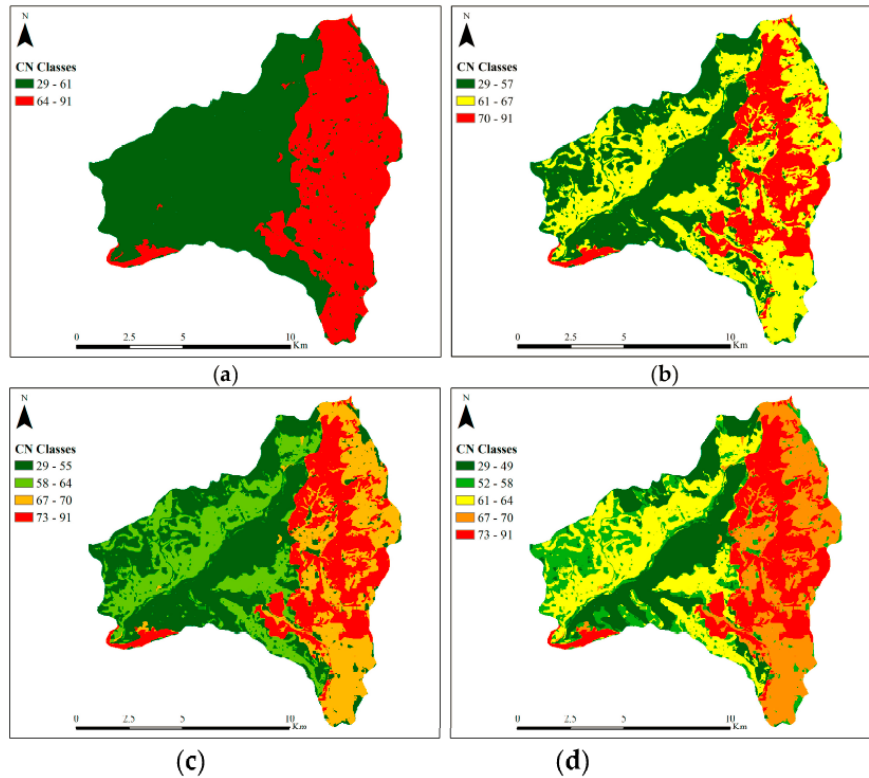


Figura 2.5. Delineamiento de HRU propuesta por Savvidou *et al.* [7]

Descomposición de la cuenca en a) 2 HRU, b) 3 HRU, c) 4 HRU, d) 5 HRU.

En ambos casos, los criterios asignados para delinear las HRU, así como para determinar la cantidad ideal de unidades son meramente subjetivos, quedando a criterio de quien realice el modelo y con la limitante de la información que se tenga disponible. Esto ha dado pie al surgimiento de nuevas metodologías de delineamiento de HRU, recurriendo a información georreferenciada (GIS), así como de estadística en múltiples variables, como lo demostrado por Fouedjio [10], el cual desarrolla un método de agrupamiento de información geo estadística multivariable.

### 2.3. Análisis de Componentes Principales (PCA)

En estadística, el análisis de componentes principales (en español ACP, en inglés, PCA) es una técnica utilizada para describir un conjunto de datos en términos de nuevas dimensiones (componentes) no correlacionadas entre sí.

De acuerdo a la teoría expuesta por Husson, Lê, y Pagès [9], un conjunto de  $l$  individuos puede ser descrito por medio de  $n$  variables. Dicha descripción se llama "nube de datos". Dado que no es posible poder representar dicho conjunto de datos en todas sus dimensiones en simultáneo, se busca proyectar dicha nube de datos (y la distribución de los mismos) de modo tal que se pierda la menor información posible.

Para estos efectos, se requiere, primeramente, establecer una serie de correlaciones entre cada una de las variables. Todo el conjunto de correlaciones, para todas las variables, queda descrito por la matriz:

$$[R] = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & \cdots & \cdots & r_{nn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Donde  $r_{ij}$  corresponde ser la correlación entre las variables  $i$  y  $j$ :

$$r_{ij} = r(i, j) = \frac{\sum_{u=1}^I (x_{iu} - \bar{x}_i)(x_{ju} - \bar{x}_j)}{\sqrt{\sum_{u=1}^I (x_{iu} - \bar{x}_i)^2} \sqrt{\sum_{u=1}^I (x_{ju} - \bar{x}_j)^2}} \quad (5)$$

Dada la naturaleza de la información con la que se trabaja, se tiene que la matriz de correlación es simétrica, así como todos los valores sobre la diagonal principal son 1.

De modo de establecer claramente los ejes de proyección del ACP, se procede a diagonalizar la matriz de correlaciones (entre variables), obteniendo  $n$  valores propios y vectores propios, respectivamente. El porcentaje de influencia asociado a cada valor propio  $\lambda_i$  queda definido por medio de:

$$100 * \frac{\lambda_i}{\sum \lambda_i} \quad (6)$$

Dado que la proyección más recurrente es por medio de planos (en dos dimensiones), se considera que los ejes principales del ACP son aquellos cuyos valores propios sean los de mayor influencia. De este modo, se proyectan los conjuntos de variables sobre este plano, por medio de un conjunto de correlaciones entre las variables y los vectores que componen el plano, siguiendo la metodología indicada por Husson, Lê y Pagès [9]. Si bien la proyección de las variables es con respecto a todos los vectores propios de la matriz de correlaciones, el énfasis recae en los dos vectores asociados a los dos mayores valores propios.

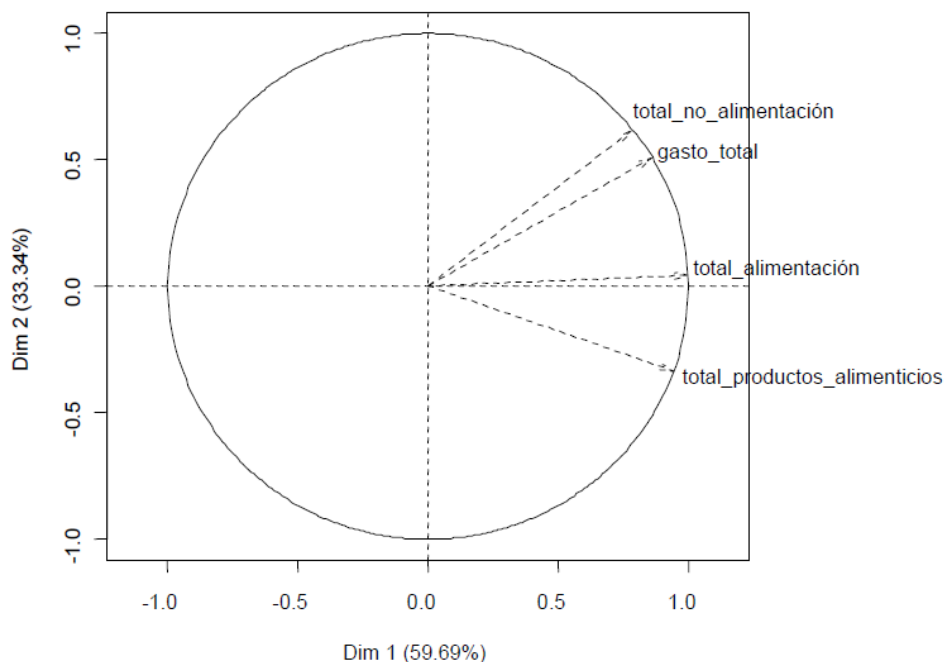


Figura 2.6. Representación de la proyección de Variables sobre un plano de PCA.<sup>4</sup>

La contribución  $C_{jk}$  de cada variable  $j$  a cada dimensión  $k$  está definida por:

$$C_{jk} = (\phi_{jk})^2 \cdot 100\% \quad (7)$$

## 2.4. Acerca del Software HEC-HMS

HEC-HMS (Hydrologic Modeling System) es un programa elaborado por el Centro de Ingeniería Hidrológica (Hydrologic Engineering Center), dependiente del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos [15]. Dicho programa está diseñado para simular los procesos de precipitación y escorrentía dentro de cuencas, de modo de ser aplicado en un amplio rango de áreas geográficas y en la mayor cantidad de aplicaciones posibles, tanto a nivel de cuencas hidrológicas de gran extensión, así como sistemas de escorrentía en entornos urbanos. Todos los hidrogramas producidos pueden utilizarse directamente, o en conjunto con otros programas para estudios de disponibilidad de recursos hídricos, drenaje urbano, pronóstico de crecidas, impacto de urbanización en la dinámica de las cuencas, diseño de reservorios, reducción de daños por crecidas, regulación de áreas inundables y operación de sistemas.

El programa es un sistema de modelación generalizado, capaz de representar múltiples cuencas. Un modelo de la cuenca es construido por medio de la descomposición del ciclo hidrológico en partes adecuadas, y la definición de fronteras alrededor de la cuenca de interés. Cualquier cambio dentro del ciclo puede ser representado por medio de un modelo matemático. En la mayoría de los casos, hay diversas opciones disponibles para representar los cambios. Cada modelo matemático incluido dentro del programa es compatible en distintos ambientes y bajo distintas condiciones de

<sup>4</sup> Fuente: [14].

funcionamiento. Escoger el modelo más adecuado requiere conocimiento sobre la cuenca, sobre los objetivos del estudio hidrológico, y criterio del ingeniero.

#### 2.4.1. Métodos asociados de escorrentía

Para el análisis de escorrentía, se puede escoger entre los siguientes métodos:

**1) Método del Hidrograma Unitario de Snyder:** Este modelo está basado en el análisis de cuencas sin información fluviométrica en las Montañas Apalaches, en EE.UU. A partir de dicho análisis, se establecen relaciones para establecer los parámetros del hidrograma unitario desde las características de la cuenca. Para tales efectos, se asumen como características críticas de la cuenca el tiempo total del hidrograma, el tiempo peak del hidrograma, y el tiempo de desfase del mismo. Se define como un hidrograma unitario *estándar* como uno donde el tiempo de duración de la precipitación  $t_r$  está asociado al tiempo peak de la cuenca  $t_p$ , por medio de:

$$t_p = 5,5t_r \quad (8)$$

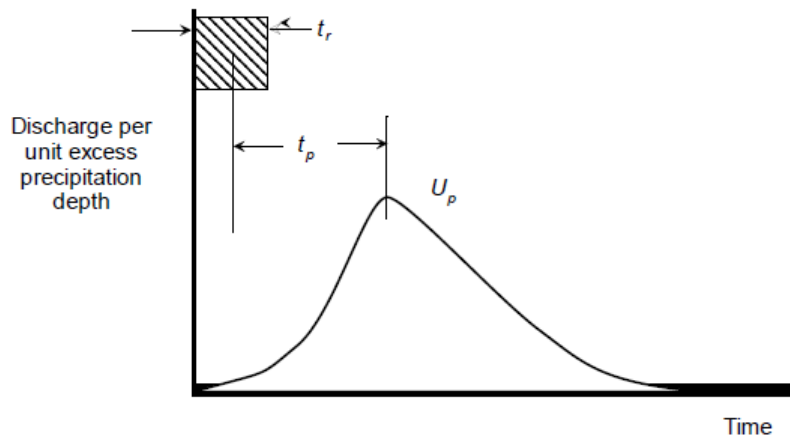


Figura 2.7. Hidrograma Unitario de Snyder.<sup>5</sup>

Donde  $t_p$  es la diferencia entre el centroide del hidrograma de precipitación efectiva y el peak de caudal. Si la duración del hidrograma unitario asociado a la cuenca de interés difiere de lo especificado en la expresión anterior, se puede corregir a través de:

$$t_{pR} = t_p - \frac{t_r - t_R}{4} \quad (9)$$

Donde  $t_{pR}$  es el tiempo al peak del hidrograma esperado, y  $t_R$  es el tiempo de desfase esperado. En el caso estándar, el tiempo al peak del hidrograma unitario y el caudal por unidad de área están relacionados por:

$$\frac{U_p}{A} = C \frac{C_p}{t_p} \quad (10)$$

Donde  $U_p$  es el caudal peak de la cuenca,  $A$  es el área de la cuenca,  $C_p$  es el coeficiente de amplificación del hidrograma unitario, y  $C$  es una constante (para unidades del SI,  $C=2,75$ ). Esta fórmula puede extrapolarse al caso con tiempos de duración y al peak diferidos:

<sup>5</sup> Fuente: [15].

$$\frac{U_{pR}}{A} = C \frac{C_p}{t_{pR}} \quad (11)$$

Para determinar el tiempo al peak de la cuenca, se recurre a la fórmula:

$$t_p = CC_t(LL_c)^{0.3} \quad (12)$$

Donde  $L_c$  es la longitud a lo largo del cauce principal al punto más cercano al centroide de la cuenca,  $L$  es la longitud del cauce principal,  $C_t$  es el coeficiente de cuenca, y  $C$  es una constante de conversión (para unidades del SI,  $C = 0,75$ )

**2) Método del Hidrograma Unitario del SCS:** Este modelo se basa en un hidrograma unitario adimensional, de peak único. Dicho hidrograma expresa el caudal de descarga  $U_t$ , como una fracción del caudal peak  $U_p$ , en cualquier tiempo  $t$ , una fracción del tiempo peak. La relación entre el caudal peak y el tiempo peak está dada por:

$$U_p = C \frac{A}{T_p} \quad (13)$$

Donde  $A$  es el área de la cuenca, y  $C$  es una constante de conversión (en unidades del SI,  $C=2,08$ ). El tiempo peak está definido por medio de:

$$T_p = \frac{\Delta t}{2} + t_{lag} \quad (14)$$

Donde  $\Delta t$  es tiempo de exceso de precipitación (o el intervalo de tiempo en el hidrograma) y  $t_{lag}$  es el tiempo de desfase de la cuenca, definido como el tiempo entre el centroide de precipitación y el peak del hidrograma unitario. SCS sugiere determinar a  $t_{lag}$  como una fracción del tiempo de concentración:

$$t_{lag} = 0,6t_c \quad (15)$$

Con respecto al tiempo de concentración de la cuenca  $t_c$ , el método no especifica una fórmula para determinar dicho valor, por lo que se puede recurrir a fórmulas desde manuales o desde otros métodos, como los expuestos por Maidment [3], o Chow, Maidment y Mays [2].

**3) Método del Hidrograma Unitario de Clark:** El método se descompone en la descripción de dos procesos críticos en la transformación de precipitación en escorrentía:

- Traslado de la escorrentía, desde su origen, hacia el punto de descarga de la cuenca.
- Reducción de la magnitud de descarga a medida que se “almacena” la escorrentía en la cuenca.

El almacenamiento del agua caída en el corto plazo a través de una cuenca (sobre la superficie y en los canales que conducen al punto de descarga) juega un rol importante en la transformación de precipitación en escorrentía. Los efectos de dicho almacenamiento son comúnmente representados por medio de un modelo de reservorio lineal. Dicho modelo se basa en la ecuación de continuidad:

$$\frac{dS}{dt} = I_t - O_t \quad (16)$$

Donde  $dS/dt$  es la razón de cambio del agua almacenada en un tiempo  $t$ , mientras que  $I_t$  y  $O_t$  son los flujos de entrada y salida, respectivamente. Utilizando el modelo de reservorio lineal, el almacenamiento queda asociado al flujo de salida en un tiempo  $t$ :

$$S_t = RO_t \quad (17)$$

Donde  $R$  es una constante de almacenamiento lineal. Resolviendo (17) por medio de un esquema de diferencias finitas, se puede aproximar la salida como:

$$O_t = C_A I_t + C_B O_{t-1} \quad (18)$$

Donde:

$$\begin{aligned} C_A &= \frac{\Delta t}{R + 0,5\Delta t} \\ C_B &= 1 - C_A \end{aligned} \quad (19)$$

Para aplicar este método de hidrograma unitario, es necesario conocer las propiedades del hidrograma tiempo-área, y el coeficiente de almacenamiento. En el primer caso, se establece la siguiente relación entre tiempo y área:

$$\frac{A_T}{A} = \begin{cases} 1,414 \left(\frac{t}{t_c}\right)^{1,5} & \text{si } \frac{t}{t_c} \leq \frac{1}{2} \\ 1 - 1,414 \left(1 - \frac{t}{t_c}\right)^{1,5} & \text{si } \frac{t}{t_c} > \frac{1}{2} \end{cases} \quad (20)$$

Donde  $A_T$  corresponde ser el área de la cuenca que aporta a la escorrentía,  $A$  es el área total de la cuenca, y  $t_c$  es el tiempo de concentración de la misma. Al igual que con el método del hidrograma unitario del SCS, no hay un lineamiento específico para determinar el tiempo de concentración de la cuenca, por lo que se recurre a fórmulas desde otros métodos o manuales [2, 3]. El coeficiente de almacenamiento  $R$  corresponde ser un índice del almacenamiento transitorio de la precipitación efectiva, a medida que ésta drene hacia el punto de descarga. También puede ser determinada por medio de calibración, si es que se cuenta con información pluviométrica y fluviométrica disponible.

#### 2.4.2. Métodos asociados de tránsito de crecidas

Para establecer de manera apropiada un modelo de tránsito de crecidas sobre una sección de canal, se requiere la siguiente información:

1. Una descripción del canal, ya sea de manera implícita, por medio de los parámetros del modelo a escoger, o bien, de modo explícito, por medio de términos más familiares: ancho del canal, pendiente media del lecho, sección transversal, etc.
2. Definir parámetros para la determinación de pérdidas de carga. En los modelos basados en el medio físico, la pérdida de carga se obtiene por medio de la fórmula de Manning y su respectivo coeficiente de rugosidad; mientras que, en otros modelos, la pérdida de carga se obtiene de modo empírico.
3. Establecer condiciones iniciales de flujo, específicamente, el flujo a la salida del canal antes de la primera iteración. De acuerdo con el manual disponible con HEC-HMS [15], este flujo puede determinarse como el flujo base dentro del canal al principio de la simulación, o bien, el caudal peak en la salida del canal para un hipotético evento de crecida.

4. Establecer condiciones de borde: hidrogramas en la entrada del canal, laterales y tributarios. Estos pueden ser datos observados, o pueden ser calculados por medio de los modelos de precipitación y escorrentía disponibles.

Para el análisis del tránsito de crecidas en canales, se cuenta con los siguientes métodos:

**1) Método Puls Modificado:** se basa en la aproximación por medio de un esquema de diferencias finitas de la ecuación de continuidad [16], junto con una representación empírica de la ecuación de momento [2]. Para este método, la ecuación de continuidad, en términos de caudal  $Q$  y superficie  $A$  queda descrita como:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (21)$$

Dicha simplificación asume que cualquier ingreso de flujo lateral es despreciable, y permite la variación del ancho del canal a lo largo del mismo. Incorporando la aproximación por diferencias finitas, la ecuación queda como:

$$\bar{I}_t - \bar{O}_t = \frac{\Delta S_t}{\Delta t} \quad (22)$$

Donde  $I_t$  es el flujo de entrada promedio en un tiempo  $\Delta t$ ,  $O_t$  es el flujo de salida promedio del canal durante el mismo intervalo de tiempo, y  $\Delta S_t$  es la variación en el tiempo del caudal almacenado en el canal. Realizando un esquema de diferencias finitas "paso atrás" [16], y despejando las variables desconocidas, se obtiene:

$$\frac{S_t}{\Delta t} + \frac{O_t}{2} = \left( \frac{I_{t-1} + I_t}{2} \right) + \left( \frac{S_{t-1}}{\Delta t} - \frac{O_{t-1}}{2} \right) \quad (23)$$

Dado un tiempo  $t$ , se conocen todas las variables del lado derecho (caudales de entrada, almacenamiento previo y caudal de salida del tiempo anterior), por lo que las variables objetivo corresponden ser el caudal de salida y el almacenamiento dentro del canal en el tiempo  $t$ . Para su resolución se requiere establecer una relación entre el almacenamiento y el caudal de salida, de modo de convertir el problema a una ecuación no lineal de una variable, resuelta de modo iterativo.

Dicha relación entre caudal de salida y almacenamiento puede ser determinada por medio de:

- Un perfil hidráulico del canal para distintos niveles de descarga, obtenido por medio de un programa de modelado hidráulico de canales (HEC-RAS, por ejemplo).
- Observaciones históricas perfil del cauce, a partir de las marcas de aguas altas que dejan las crecidas sobre las riveras del cauce.
- Calibración, utilizando hidrogramas de entrada y salida en los extremos del canal.

Dado que la implementación del modelo recae en esquemas de diferencias finitas, su resolución también está asociada a descomposiciones en esquemas de diferencias finitas. En el modelo de onda cinética, una solución precisa puede ser encontrada con un algoritmo estable cuando  $\Delta x / \Delta t \approx c$ , siendo  $c$  la velocidad de onda promedio a lo largo de una distancia  $\Delta x$ . Para la implementación del esquema de diferencias finitas, la aproximación de  $\Delta x$  en  $\partial Q / \partial x$  es implícitamente igual a la longitud del canal  $L$ , dividido una cantidad (entera) de pasos. El objetivo es encontrar el número de pasos tal que el tiempo que se tome viajar a lo largo del canal sea igual a  $\Delta t$ . Esto se obtiene por medio de:

$$Pasos = \frac{L}{c \Delta t} \quad (24)$$

**2) Método de Muskingum:** Similar al método anterior, éste utiliza una simplificación de la ecuación de continuidad:

$$\left(\frac{I_{t-1} + I_t}{2}\right) - \left(\frac{O_{t-1} + O_t}{2}\right) = \left(\frac{S_t - S_{t-1}}{\Delta t}\right) \quad (25)$$

El almacenamiento dentro del canal se define como la suma de los almacenamientos en las secciones “prisma” y las secciones “cuña”. En las etapas iniciales de la crecida, el almacenamiento de las secciones “cuña” es positivo, mientras que en el tramo posterior al peak de la crecida, el almacenamiento de las secciones “cuña” es negativo, y se resta a las secciones “prisma”.

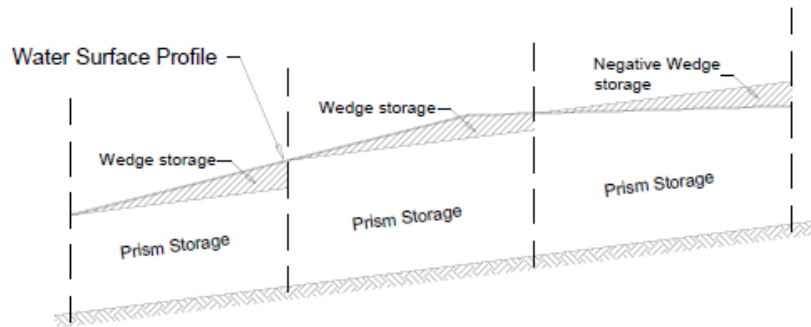


Figura 2.8. Almacenamiento dentro del canal.<sup>6</sup>

El volumen de la sección “prisma” es el caudal de salida  $O$ , multiplicado por tiempo de traslado a lo largo de la sección de canal,  $K$ . El volumen de la sección “cuña” es una diferencia ponderada entre caudal de entrada y salida, multiplicada por el tiempo  $K$ . De esta forma, el método de Muskingum define al almacenamiento como:

$$S_t = K(XI_t + (1 - X)O_t) \quad (26)$$

Donde  $X$  corresponde ser una variable adimensional entre 0 y 0.5. Si  $X$  es igual a 0, se genera un modelo de reservorio lineal (ver sección 2.4.1, Método del Hidrograma Unitario de Clark), mientras que si  $X$  es igual a 0.5, se asocia igual ponderación a caudales de entrada y salida, por lo que la onda se traslada a lo largo del canal sin atenuarse. Combinando (25) y (26), se obtiene:

$$O_t = \left(\frac{\Delta t - 2KX}{2K(1 - X) + \Delta t}\right) I_t + \left(\frac{\Delta t + 2KX}{2K(1 - X) + \Delta t}\right) I_{t-1} + \left(\frac{2K(1 - X) - \Delta t}{2K(1 - X) + \Delta t}\right) O_{t-1} \quad (27)$$

Cabe destacar, que al igual que en otros métodos, una solución precisa requiere de una selección apropiada de intervalos de tiempo, espacio y parámetros, que aseguren la estabilidad de la solución. De modo similar al método Puls modificado, el espaciamiento  $\Delta x$  está indirectamente relacionado con la cantidad de pasos necesarios para dividir el canal. Dado que, en este modelo, la velocidad de onda se aproxima a  $K/L$ , el número de pasos puede aproximarse a  $K/\Delta t$ . Por otra parte, para asegurar racionalidad en los resultados, implica que los valores de  $X$  y  $K$  quedan restringidos a un dominio en particular.

<sup>6</sup> Fuente: [15].

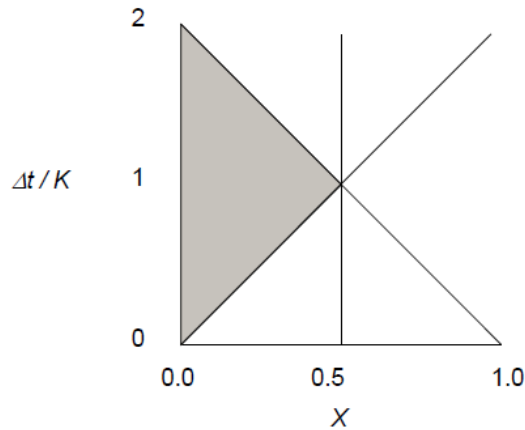


Figura 2.9. Dominio de los parámetros X y K.<sup>7</sup>

Otra forma de determinar el valor de K, es utilizando hidrogramas de entrada y salida, en la medida en que estén disponibles. Dicho parámetro puede ser determinado como la distancia entre los centroides de los hidrogramas de entrada y salida, o la distancia entre los peak de ambos hidrogramas. Una vez estimado K, se puede obtener X de forma iterativa. En caso de que no se cuente con información fluviométrica disponible, se recurre a la ley de Seddon:

$$V_w = \frac{1}{B} \frac{dQ}{dY} \quad (28)$$

$$K = \frac{L}{V_w} \quad (29)$$

Donde  $B$  es el ancho superficial del cauce, y  $dQ/dy$  es la pendiente de descarga del canal.

**3) Método de Muskingum-Cunge:** El método está basado en la resolución de la ecuación de continuidad (incluyendo flujo lateral  $q$ ):

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q \quad (30)$$

Y la forma de difusión de la ecuación de momento:

$$S_f = S_0 - \frac{\partial y}{\partial x} \quad (31)$$

Combinándolas se obtiene:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + c \frac{\partial Q}{\partial x} = \mu \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} + cq \quad (32)$$

Donde  $c$  es la celeridad o velocidad de onda, y  $\mu$  corresponde ser la difusividad hidráulica.

$$c = \frac{dQ}{dA} \quad (33)$$

<sup>7</sup> Fuente: [15].

$$\mu = \frac{Q}{2BS_0} \quad (34)$$

Donde  $B$  es el ancho superficial del cauce. Estableciendo un esquema de diferencias finitas sobre (32), se obtiene:

$$O_t = C_1 I_{t-1} + C_2 I_t + C_3 O_{t-1} + C_4 (q \Delta x) \quad (35)$$

Donde los coeficientes son:

$$C_1 = \frac{\frac{\Delta t}{K} + 2X}{\frac{\Delta t}{K} + 2(1 - X)} \quad (36)$$

$$C_2 = \frac{\frac{\Delta t}{K} - 2X}{\frac{\Delta t}{K} + 2(1 - X)} \quad (37)$$

$$C_3 = \frac{2(1 - X) - \frac{\Delta t}{K}}{\frac{\Delta t}{K} + 2(1 - X)} \quad (38)$$

$$C_4 = \frac{\frac{2\Delta t}{K}}{\frac{\Delta t}{K} + 2(1 - X)} \quad (39)$$

Los parámetros  $K$  y  $X$  están definidos por medio de:

$$K = \frac{\Delta x}{c} \quad (40)$$

$$X = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{Q}{BS_0 c \Delta x} \right) \quad (41)$$

Dado que  $Q$ ,  $c$  y  $B$  cambian con el tiempo, también lo harán los coeficientes  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  y  $C_4$ . Nuevamente, la definición de intervalos de espacio y tiempo resulta crítica. El intervalo de tiempo puede ser definido como el mínimo de los siguientes: el tiempo de viaje a lo largo del canal, o 1/20 del tiempo entre el caudal peak de entrada y el punto con máxima pendiente. Una vez definido  $\Delta t$ , se define a  $\Delta x$  como:

$$\Delta x = c \Delta t \quad (42)$$

El valor de  $\Delta x$  está restringido por medio de:

$$\Delta x < \frac{1}{2} \left( c \Delta t + \frac{Q_0}{BS_0 c \Delta x} \right) \quad (43)$$

Donde  $Q_0$  es el caudal de entrada de referencia (dependiendo del caso, puede ser cero). La forma para determinar el ancho superficial  $B$  para un caudal  $Q$  dependerá de cómo se determine la forma del cauce, tanto en su sección transversal como en su materialidad, por lo que se debe recurrir a fórmulas para flujo en canales abiertos, por ejemplo, la fórmula de Manning [3, 17].

### 2.4.3. Receso del flujo basal

El flujo de un cauce se compone a menudo de los aportes de diversas fuentes: escorrentía directa, flujos desde otros cuerpos, descarga por derretimiento de nieves, y descarga de aguas subterráneas o flujo base. La predominancia de cada factor dependerá de las características climáticas, topográficas y geográficas de la cuenca.

Cada uno de estos componentes, en su respectiva medida, genera un aporte al cauce principal durante las estaciones húmedas. No obstante, en estaciones secas, el flujo es mayormente soportado por contribuciones desde el subsuelo. El mecanismo de agotamiento del agua subterránea sigue una forma de decaimiento exponencial [18], por medio de la fórmula:

$$Q(t) = Q_0 K^t \quad (44)$$

Donde  $Q(t)$  es el caudal en un tiempo  $t$ ,  $Q_0$  es el caudal en un tiempo  $t_0$ , mientras que  $K$  es una constante de decaimiento. Manipulando (44) se puede obtener

$$\log(Q(t)) = \log(Q_0) + t \cdot \log(K) \quad (45)$$

Por lo que el valor  $K$  puede deducirse como la pendiente media de la curva logarítmica de  $Q(t)$  en función del tiempo. No obstante, para tener un mejor valor de dicha constante, Bako y Owoade [19] sugieren correlacionar diversos eventos ocurridos dentro de la cuenca por medio de:

$$\log \bar{K} = \frac{\sum_{i=1}^b (\sum_{j=1}^{n_i} V_i y_{ij} - (n_i)(n_i - 1)(Y_i)/2)}{\sum_i^b \frac{(n_i^3 - n_i)}{12}} \quad (46)$$

Donde:

Tabla 2.1. Parámetros de funcionamiento de (46).

b	Cantidad de eventos de recesión
$n_i$	Cantidad de mediciones realizadas en el i-ésimo evento de recesión
$V_i$	Varianza de las mediciones en el i-ésimo evento de recesión
$Y_i$	Caudal medio del i-ésimo evento de recesión
$y_{ij}$	j-ésima medición de caudal del i-ésimo evento de recesión

Otra propuesta sobre la estimación del parámetro  $K$  es definida por Vogel y Kroll [20], considerando para ello sólo un evento de recesión con  $n$  mediciones:

$$K = \frac{\sum_{t=1}^{n-1} Q_{t-1} Q_t}{\sum_{t=1}^{n-1} Q_t^2} \quad (47)$$

Dado que no se ha podido establecer de manera consistente una relación entre las características geomorfológicas de la cuenca y el parámetro  $K$ , este deberá ser estimado manualmente, siendo parte del proceso de calibración del modelo.

## 2.5. Acerca del Balance Hídrico Nacional

### 2.5.1. Ciclo hidrológico y balance hídrico

El ciclo hidrológico, es el foco central de la hidrología. El ciclo no tiene principio ni fin y sus diversos procesos ocurren en forma continua. En la Figura 2.7 se muestra en forma esquemática como el agua se evapora desde los océanos y desde la superficie terrestre para volverse parte de la atmósfera; el vapor de agua se transporta y se eleva en la atmósfera hasta que se condensa y precipita sobre la superficie terrestre o los océanos; el agua precipitada puede ser interceptada por la vegetación, convertirse en flujo superficial sobre el suelo, infiltrarse en él, correr a través del suelo como flujo sub-superficial y descargar en los ríos como escorrentía superficial. La mayor parte del agua interceptada y de escorrentía superficial regresa a la atmósfera mediante la evaporación. El agua infiltrada puede percolar profundamente para recargar el agua subterránea, de donde emerge en manantiales o se desliza hacia ríos para formar la escorrentía superficial, y finalmente fluye hacia el mar o se evapora en la atmósfera a medida que el ciclo hidrológico continúa [2].

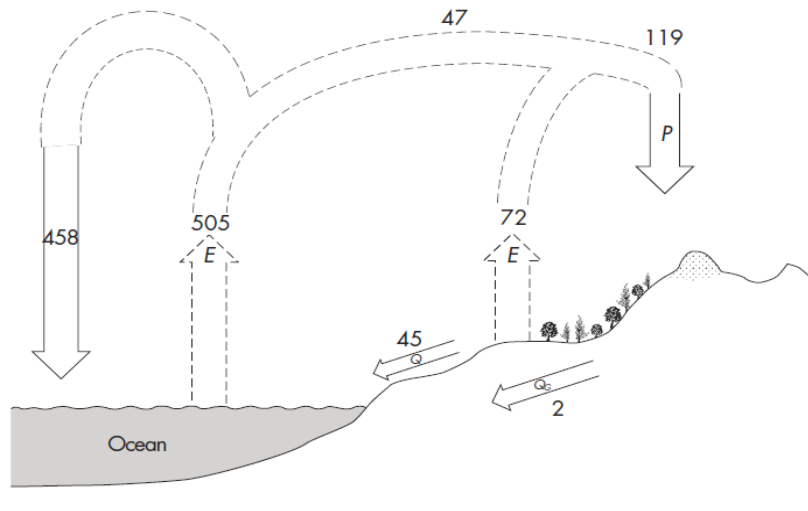


Figura 2.10. Esquema del ciclo hidrológico.<sup>8 9</sup>

Los números en la figura representan una estimación de los volúmenes de agua en millones de [km<sup>2</sup>] anuales para cada proceso. E: evaporación; P: precipitación; Q<sub>g</sub>: flujo sub-superficial; Q: escorrentía. Fuente: [21].

Asociado al concepto de ciclo hidrológico, surge el concepto de balance hídrico, el cual se define como

$$I - O = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (48)$$

Donde  $I$  y  $O$  son los caudales de entrada y salida en un determinado volumen de control, respectivamente.  $V$  es el almacenamiento al interior de dicho volumen. Para un intervalo de tiempo  $\Delta t$  comprendido entre dos instantes  $t_1$  y  $t_2$ , el balance hídrico en una cuenca puede descomponerse como sigue: [21]

$$P + Q_a - R - E - T - Q_e = \Delta V_{sup} + \Delta V_{sub} + \Delta V_h + \Delta H \quad (49)$$

<sup>8</sup> Los números en la figura representan una estimación de los volúmenes de agua en millones de [km<sup>2</sup>] anuales para cada proceso. E: evaporación; P: precipitación; Q<sub>g</sub>: flujo sub-superficial; Q: escorrentía.

<sup>9</sup> Fuente: [21].

Donde  $P$  es la precipitación total caída en el intervalo  $\Delta t$ ,  $Q_a$  es el caudal afluente (superficial y/o subterráneo) a la cuenca,  $R$  es la precipitación retenida por la vegetación,  $E$  es la evaporación desde superficies húmedas o cuerpos de agua,  $T$  es la transpiración vegetal ocurrida en el período,  $Q_e$  es el caudal de salida (superficial y/o subterráneo) de la cuenca, mientras que  $\Delta V_{sup}$ ,  $\Delta V_{sub}$ ,  $\Delta V_h$  y  $\Delta H$  son variaciones en el volumen almacenado de agua en depresiones superficiales, lagos y embalses, en forma subterránea, en forma de nieve estacional, hielos y glaciares, y en forma de humedad contenida en los suelos.

### 2.5.2. Balance Hídrico Nacional

El Balance Hídrico Nacional [11] consiste en la compilación de datos y registros hidrometeorológicos dentro del territorio nacional durante un lapso de tiempo determinado, con el objetivo de definir políticas de planificación del territorio y el desarrollo de actividades que requieren del agua como principal insumo.

Para tales efectos, se recopilan observaciones históricas sobre diversas variables: precipitación, temperatura, caudales, altura de cuerpos de nieve, etc. Las entradas y salidas al sistema se igualan de acuerdo a la ecuación (49), a la variación temporal en el volumen almacenado. Este último término ocurre en distintos compartimientos de la cuenca, tales como los acuíferos, glaciares, cuerpos de agua, entre otros.

Un estudio previo del Balance Hídrico Nacional, desarrollado entre 1983 y 1987, derivó en un informe que integraba la red hidrometeorológica nacional de la época, determinando las forzantes meteorológicas de precipitación y evapotranspiración, así como la escorrentía de forma distribuida en todo el territorio de Chile continental. En aquella época, se consideraba que las variaciones de almacenamiento podían ser consideradas despreciables al ser promediadas en un periodo de tiempo lo suficientemente amplio (30 años).

Durante las últimas tres décadas, la red hidrométrica nacional ha crecido significativamente, contando con mayor cantidad de registros, así como nuevas zonas monitoreadas y nuevas variables observadas (en terreno y de forma remota). Toda esta nueva cantidad de información disponible permite realizar no solo un análisis espacial de las componentes del balance, sino que además estudiar las variaciones temporales que se han observado en las últimas décadas, donde los supuestos de estacionalidad ya no se cumplen, como consecuencia de un clima en constante estado de cambio.

La última actualización del Balance Hídrico Nacional surge como respuesta a la necesidad de incorporar 30 años de nuevos registros y nuevas fuentes de información, para cuantificar la disponibilidad de los recursos hídricos. Este estudio sirve como línea base de cualquier estudio hidrológico, así como proyectos de consultoría a nivel nacional, teniendo una metodología uniforme y viable que permita incorporar procesos físicos en su estimación a modo de tener un producto robusto. Todo lo anterior favorece la inclusión de cambios, producto tanto del cambio en los usos de suelo, así como las proyecciones de cambio climático esperadas para todo el territorio nacional [22].

### 2.5.3. Fuentes de información del Balance Hídrico Nacional

Para determinar los distintos componentes del balance hídrico, se consideran principalmente tres fuentes de información:

**1) Observaciones puntuales (in situ):** Se entiende por observaciones In situ todas aquellas mediciones que tienen una estructura física de medición permanente o eventual en el territorio nacional. Para efectos de diferenciar los distintos procesos físicos relacionados con el balance hídrico se diferencia en cuatro grandes grupos: Mediciones hidrometeorológicas, de aguas subterráneas, en nieve y glaciares, e información de estructura.

Las variables hidrometeorológicas consideran precipitación, caudal, temperatura, humedad relativa, evaporación, radiación y velocidad del viento obtenidas a partir de las bases de datos de: Dirección general de Aguas (DGA), la Dirección Meteorológica de Chile (DMC), Agroclima (AGRO), la red Agromet (INIA), el Sistema de Información de Calidad del Aire (SINCA), la red de estaciones de Vinos de Chile (MTV) y el Centro de Estudios de Zonas Áridas (CEAZA).

Las mediciones de los niveles piezométricos en los pozos de observación son la principal fuente de información y control de los sistemas hídricos subterráneos [23]. Desde este punto de vista, una descripción de la actual red de monitoreo piezométrica es de vital importancia para validar espacial y técnicamente los datos medidos. En el Capítulo 4 se realiza un análisis de la disponibilidad de información de niveles piezométricos y de la distribución de la actual red de monitoreo de niveles de agua subterránea de la DGA. El análisis contempla el estudio de las 32 cuencas hidrográficas representativas definidas en el Atlas del Agua 2016. Los datos medidos en cada una de las estaciones de monitoreo fueron recopilados desde la plataforma virtual de la DGA (Banco Nacional de Aguas - BNA) abarcando el período 1985-2015.

Respecto a las mediciones de profundidad, existen las rutas de nieve que consisten en mediciones en una línea recta, discretizadas cada cierta cantidad de metros (en Chile 10 metros) entre postes graduados situados usualmente cada 100 [m]. En el Balance Hídrico Nacional se analizan 23 rutas de nieve entre el periodo 1980 y 2015. Dicha información es puntual y se realiza a frecuencias anuales o inferiores (no se mide todos los años).

Respecto a registros de medición continua de nieve, en las últimas décadas la unidad de hidrología de la DGA ha incorporado sensores de distancia ultrasónicos en su red de estaciones meteorológicas. Del mismo modo se ha incorporado el uso de Snow Pillows y Snow Scales, que mediante el peso de la nieve en una superficie conocida estiman directamente el contenido del equivalente en agua de nieve en un punto.

**2) Percepción Remota:** Se define como la obtención de información de un lugar geográfico, sin hacer contacto físico con la zona de estudio, en contraste con un sitio dedicado a la observación puntual. Entre los métodos más útiles se encuentran los satélites, aviones y radares. Por la cantidad de datos disponible, su cobertura espacial y temporal y por la forma distribuida en la que se entrega, la información proveniente de mediciones satelitales es de gran interés al momento de estudiar zonas que abarquen grandes extensiones geográficas.

**3) Reanálisis climáticos [24]:** Uno de los aspectos más relevantes del cálculo del balance hídrico es contar con una serie de campos de precipitación y temperatura que sean confiables y homogéneos en el tiempo y espacio. Con este propósito, se aplicó una metodología en desarrollo para generar datos diarios de precipitación y temperaturas extremas en una grilla de alta resolución espacial (aproximadamente 5 km). La metodología extrae información de observaciones locales y de reanálisis atmosféricos. Un reanálisis consiste en el re-procesamiento de la información meteorológica disponible, bajo condiciones y/o metodologías diferentes. La regionalización de variables a partir de datos de mayor escala, como reanálisis u otros productos derivados de forma indirecta (por ejemplo, precipitación inferida desde imágenes satelitales), aporta información valiosa en regiones carentes —o con baja densidad— de observaciones directas.

Para realizar las tareas de percepción remota, así como los reanálisis climáticos, el Balance Hídrico Nacional hace uso de los siguientes productos:

Tabla 2.2. Productos climáticos evaluados para el Balance Hídrico Nacional.

Producto	Tipo	Variables	Período disponible	Resolución espacial
NCEP CFSR	Reanálisis	P, T <sub>max</sub> , T <sub>min</sub>	1979-2000	0,25° lat-lon (orig. ~ 38 km)
ERA INTERIM	Reanálisis	P, T <sub>max</sub> , T <sub>min</sub>	1979-pres.	0,5° lat-lon (orig. ~ 79 km)
NASA MERRA	Reanálisis	P, T <sub>max</sub> , T <sub>min</sub>	1980-2015	0,5°x0,667° lat-lon
PRECIS-ERA40	Simulación RCM	P, T <sub>max</sub> , T <sub>min</sub>	1958-2001	0,25° lat-lon
CMAP	Comb. obs. satelitales, sup. y reanálisis	P	1979-pres.	2,5° lat-lon
GPCP	Comb. obs. satelitales y sup.	P	1979-pres.	2,5° lat-lon
MSWEP	Comb. obs. satelitales, sup. y reanálisis	P	1979-2015	0,25° lat-lon
TRMM-3B43	Comb. obs. satelitales y sup.	P	1998-2015	0,25° lat-lon

#### 2.5.4. Sobre la información disponible

Dentro de los productos que entregan las distintas etapas del Balance Hídrico Nacional, se incluye tanto información georreferenciada (elementos *shape*, rásters) como información grillada en formato NetCDF. Esta última se descompone como:

- Forzantes históricas: Precipitación, temperatura, humedad relativa, evapotranspiración, etc.
- Forzantes de cambio climático: Modelos de precipitación y temperatura.
- Escenarios probables de cambio climático: Modelos de precipitación y temperatura.
- Caudales de salida de acuerdo al modelo hidrológico VIC (*Variable Infiltration Capacity*).

Dicha información se entrega grillada con una resolución espacial de aproximadamente, 5 [km].

## 2.6. Acerca del procesamiento de datos y el Lenguaje R

R es un entorno y lenguaje de programación con un enfoque al análisis estadístico, desarrollado inicialmente por Robert Gentleman y Ross Ihaka, del Departamento de Estadística de la Universidad de Auckland en 1993. Su desarrollo actual es responsabilidad del R Development Core Team.

R proporciona un amplio abanico de herramientas estadísticas (modelos lineales y no lineales, tests estadísticos, análisis de series temporales, algoritmos de clasificación y agrupamiento, etc.) y gráficas. Al tratarse de un lenguaje de programación, permite que los usuarios lo extiendan definiendo sus propias funciones. De hecho, gran parte de las funciones de R están escritas en el mismo R, aunque para algoritmos computacionalmente exigentes, se puede desarrollar bibliotecas en C, C++ o Fortran que se cargan dinámicamente. Los usuarios más avanzados pueden también manipular los objetos de R directamente desde código desarrollado en C.

### 2.6.1. RStudio

RStudio es un entorno de desarrollo integrado (IDE) para el lenguaje de programación R, dedicado a la computación estadística y gráficos. Incluye una consola, editor de sintaxis que apoya la ejecución de código, así como herramientas para el trazado, la depuración y la gestión del espacio de trabajo.

RStudio también puede extenderse por medio de paquetes desarrollados para R por su comunidad de usuarios. Dado el enorme número de nuevos paquetes, estos se han organizado en vistas (o temas), que permiten agruparlos según su naturaleza y función. Por ejemplo, hay grupos de paquetes relacionados con estadística bayesiana, econometría, series temporales, etc.

Algunos de los paquetes utilizados en el desarrollo de este trabajo son:

- FactomineR: Análisis de datos multivariable [9].
- Raster: Análisis y modelado de datos geográficos.
- GISTools: Aplicaciones de GIS para R.
- Ncdf4: Herramientas de gestión de datos en formato NetCDF.
- SP: Herramientas de análisis espacial y cambio de coordenadas.

### 2.6.2. Sobre el formato NetCDF y su gestión en RStudio

NetCDF (*Network Common Data Form*) es un conjunto de librerías de software y formatos de datos auto-descriptivos e independientes de la máquina que admiten la creación, el acceso y el intercambio de datos científicos orientados a matrices. NetCDF es desarrollado y mantenido por el programa *Unidata* de la University Corporation for Atmospheric Research (UCAR). Es comúnmente utilizado en climatología, meteorología, aplicaciones oceanográficas, y sistemas de información geográfica (GIS), como un formato de entrada y salida de datos.

Este formato debiera ser generado y manipulado según una convención llamada CF Metadata Convention (*Climate and Forecast Metadata Convention*). Estas convenciones están diseñadas para promover el procesamiento y el intercambio de archivos creados con la API NetCDF. Las convenciones de CF están ganando cada vez más aceptación y han sido adoptadas por una serie de proyectos y grupos científicos como estándar principal. Las convenciones definen metadatos que proporcionan una descripción definitiva de lo que representan los datos en cada variable y las propiedades espaciales y temporales de los datos. Esto permite a los usuarios de datos de diferentes fuentes decidir qué cantidades son comparables y facilita la creación de aplicaciones con potentes capacidades de extracción, regulación y visualización.

Por lo general, un conjunto de datos (o archivo) de tipo NetCDF se compone de:

- Dimensiones: latitud, longitud, elevación, tiempo, etc.
- Variables: los conjuntos de valores (precipitación, temperatura, caudal, etc.)
- Atributos: características acerca de los datos, factor de escala, etc.

La manipulación de estos datos a través de RStudio se realiza a través de los comandos incorporados en los paquetes:

- `ncdf`
- `ncdf4`
- `RnetCDF`
- `ncdf.tools`
- `tidync`

Cabe destacar que existen más paquetes especializados en este formato de archivos, y que, a su vez, no son mutuamente excluyentes, es decir, se pueden usar de modo combinado las herramientas de distintos paquetes de modo de conseguir la información o resultados esperados.

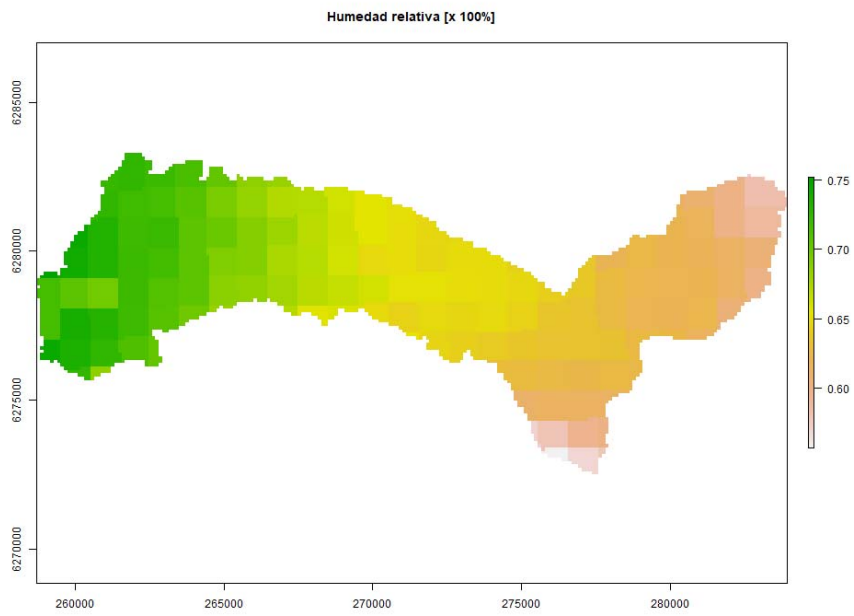


Figura 2.11. Distribución de humedad relativa para una cuenca, obtenida por medio de herramientas NetCDF.<sup>10</sup>

---

<sup>10</sup> Elaboración propia.

## CAPÍTULO III

### 3. Metodología de desarrollo

Para poder delimitar de modo satisfactorio las HRU, es necesario tener en cuenta los procesos que ocurren dentro de la cuenca, así como los parámetros más importantes que se asocian a cada proceso. Es por ello que resulta clave tanto escoger los métodos, los parámetros de interés y la forma en que éstos se ponderan, de modo de tener una correcta representación del comportamiento de la cuenca por medio de sus HRU.

#### 3.1. Definición métodos de escorrentía y tránsito de crecidas

Musy y Higy [4] afirman que la naturaleza de una cuenca es mucho más compleja que cualquier modelo o simulación de la misma. No obstante, para establecer una representación de la cuenca que pueda abarcar parte la heterogeneidad de la misma, es necesario que los métodos de escorrentía y tránsito de crecidas que se impongan sobre el modelo, también consideren y representen, dentro de sus capacidades, dicha heterogeneidad.

Dichos métodos se definen por medio de conjuntos de parámetros, los cuales deben estar correctamente definidos, para representar apropiadamente los comportamientos del sistema. En algunos casos, dichos parámetros pueden ser obtenidos de manera directa (como, por ejemplo, la cota de terreno, o precipitación en un intervalo de tiempo). No obstante, existen parámetros que, para su determinación, requieren de manera implícita, determinar otros sub-parámetros (como, por ejemplo, tiempos de concentración o variables asociadas a coberturas vegetales). Una metodología poco consistente para la obtención de estos últimos puede afectar de modo significativo la correcta representación de la cuenca.

Para el caso de los métodos de escorrentía disponibles en HEC-HMS (y descritos en la sección 2.4.1), todos los métodos incorporan de modo limitado información asociada a las características de la cuenca, remitiéndose sólo a áreas, longitudes de cauce y/o tiempo de concentración de la cuenca. Cualquier otro valor que llegase a ser necesario debe extrapolarse desde datos previamente observados y registrados [2, 3, 15]. No obstante, el método del hidrograma unitario del SCS incorpora el parámetro de curva número (CN). Dicho parámetro está asociado directamente a los conceptos de infiltración del suelo y precipitación efectiva. Asimismo, está asociado de modo indirecto al nivel de impermeabilidad, y, en consecuencia, a los tipos de suelo y cobertura vegetal que puedan existir dentro de la cuenca. Cualquier cambio en la vegetación (por ejemplo, cambio en la distribución, densidad o tipo) o en el tipo de suelo que se tenga a lo largo de la cuenca, conlleva a variaciones del valor de curva número, y a su vez, en cómo se desarrolla el fenómeno de escorrentía.

De manera similar a lo que ocurre con los modelos de escorrentía, en los métodos de tránsito de crecida disponibles en HEC-HMS (y descritos en la sección 2.4.2), los parámetros asociados a cada método se deben extrapolar desde tablas, o bien calibrar con respecto a datos previamente observados y registrados. La excepción está asociada al método de tránsito de crecidas de Muskingum-Cunge. En este método, sus parámetros principales ( $X$  y  $K$ ) varían en la medida que varía la velocidad sobre el cauce [3], el cual a su vez, depende del caudal instantáneo, de la sección transversal media del cauce, su longitud, pendiente y rugosidad [17]. Junto con ello, en caso de que exista un cambio significativo en alguno de los parámetros del cauce durante una longitud considerable, éste puede descomponerse en múltiples partes de modo de considerar dichas variaciones.

En síntesis, se recurrirá como método de escorrentía predeterminado al método del hidrograma unitario del SCS, y como método de tránsito de crecidas al método de Muskingum-Cunge.

## 3.2. Obtención de parámetros de interés

### 3.2.1. Parámetros asociados a modelo de escorrentía

De acuerdo con el método de escorrentía elegido, se necesitan los siguientes parámetros:

- Área superficial de la cuenca, en [km<sup>2</sup>].
- Tiempo de concentración, en [min].
- Curva Número (CN, adimensional).

Existen diversas fórmulas para la determinación del tiempo de concentración de una cuenca, y cómo cada una de ellas pueda afectar los resultados finales será parte de un análisis de sensibilidad posterior. No obstante, diversos manuales sugieren utilizar una abstracción de la fórmula de Kirpich [2, 25, 26]:

$$t_c = 0,0195 \left( \frac{L^3}{\Delta h} \right) [min] \quad (50)$$

Donde  $L$  es la longitud del cauce y  $\Delta h$  es la variación de la altura dentro de la cuenca, o sección de canal, ambos en [m]. Dado que se trabaja con elementos grillados (ráster), la longitud  $L$  corresponde a la distancia de cada píxel hasta el punto de salida de la cuenca, a través de la red de flujo de la cuenca; mientras que  $\Delta h$  es la variación de cotas entre cada píxel y el punto de salida. Cabe destacar, que en el método elegido en HEC-HMS (método del hidrograma unitario del SCS) no solicita el tiempo de concentración como dato propiamente tal, sino que solicita el tiempo de desfase de la cuenca, o  $t_{lag}$ . En (15) se indica que, dicho valor corresponde a un 60% del tiempo de concentración real de la cuenca.

Con respecto al parámetro de la curva número (CN), si bien se pueden extraer valores tipo desde tablas [2], estos valores serían impuestos de modo arbitrario, no representando, necesariamente, la heterogeneidad de la cuenca. Savvidou *et al.* [7], establece una metodología para determinar el valor del parámetro curva número en base a una combinación de coeficientes asociados a permeabilidad, densidad de cobertura vegetal y pendiente del terreno:

$$CN = 10 + 9i_p + 6i_v + 3i_s \quad (51)$$

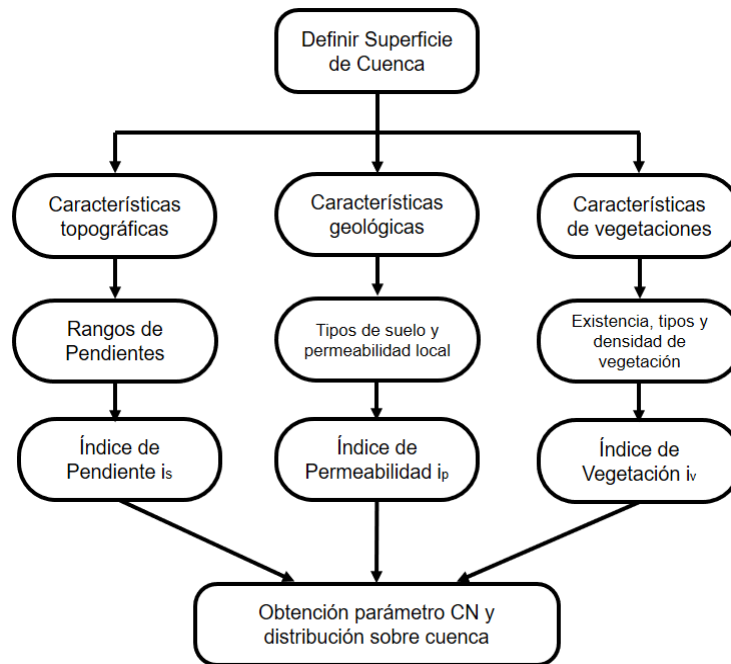


Figura 3.1. Metodología de determinación del parámetro CN según Savvidou et al. [7].

Donde  $i_p$  está asociado al nivel de permeabilidad del suelo,  $i_v$  está asociado a la densidad de cobertura vegetal, e  $i_s$  está asociado a la pendiente del terreno. Cada uno de estos coeficientes fluctúa entre 1 y 5.

Cabe señalar que el valor de CN que se obtiene desde (51) está asociado a condiciones normales de precipitación y humedad del suelo. En caso de que se tengan condiciones de humedad extremas (suelo muy seco o saturado) Chow *et al.* [2] recomienda corregir los valores del CN, por medio de:

$$CN(I - \text{Seco}) = \frac{4,2CN(II)}{10 - 0,058CN(II)} \quad (52)$$

$$CN(III - \text{Saturado}) = \frac{23CN(II)}{10 + 0,13CN(II)} \quad (53)$$

El primer parámetro que aparece en (51) hace referencia al nivel de permeabilidad del suelo. Para ello, se requiere información sobre los tipos de suelo, la cual puede obtenerse desde el Mapa Geológico de Chile [27]. Dado que la cantidad de categorías geológicas en dicho mapa es considerablemente grande, se procede a compilar dichas categorías en base a la clasificación de suelos desarrollada por Dürr *et al.* [28]. En base a dicha clasificación de suelos, se pueden obtener valores (aproximados) de permeabilidad a nivel local, de acuerdo a lo realizado por Gleeson *et al.* [29]. En base a ello, los valores aproximados de las categorías geológicas de Dürr *et al.* [28] quedan como indica en la tabla 3.1:

Tabla 3.1. Valores aproximados de permeabilidad local, según Gleeson et al. [29] en base a las categorías litológicas de Dürr et al. [28].

Categoría	$K_{local}$ [m <sup>2</sup> ] <sup>11</sup>	$K$ [m/s] <sup>12</sup>
DS (dunas)	$1 \cdot 10^{-10}$	$9,75 \cdot 10^{-4}$
SU (sedimentos no consolidados)	$1 \cdot 10^{-12}$	$9,75 \cdot 10^{-6}$
SC (rocas sedimentarias carbonatadas)	$1 \cdot 10^{-13}$	$9,75 \cdot 10^{-7}$
SM (rocas sedimentarias mixtas)	$1 \cdot 10^{-14}$	$9,75 \cdot 10^{-8}$
SS (rocas sedimentarias silicoclásticas)	$5 \cdot 10^{-13}$	$4,87 \cdot 10^{-6}$
VA (rocas volcánicas ácidas)	$1 \cdot 10^{-11}$	$9,75 \cdot 10^{-5}$
VB (rocas volcánicas básicas)	$1 \cdot 10^{-14}$	$9,75 \cdot 10^{-8}$
VI (rocas volcánicas intermedias)	$5 \cdot 10^{-13}$	$4,87 \cdot 10^{-6}$
PA (rocas plutónicas ácidas)	$5 \cdot 10^{-13}$	$4,87 \cdot 10^{-6}$
PB (rocas plutónicas básicas)	$1 \cdot 10^{-16}$	$9,75 \cdot 10^{-10}$
PI (rocas plutónicas intermedias)	$1 \cdot 10^{-15}$	$9,75 \cdot 10^{-9}$
MT (rocas metamórficas)	$1 \cdot 10^{-17}$	$9,75 \cdot 10^{-11}$

Dichos valores se aproximan a los rangos estimados para otras clasificaciones de suelos, como las indicadas por Fetter [30]. Dados estos valores, se puede establecer una fórmula para determinar el coeficiente de permeabilidad  $i_p$  según la fórmula:

$$i_p(k) = 5 - 4 \frac{(K_{min} - k)}{(K_{min} - K_{max})} \quad (54)$$

El coeficiente de vegetación  $i_v$  está relacionado con el tipo de vegetación sobre el suelo y la densidad del mismo. Para ello, se recurre al Mapa de Cobertura Vegetal de Chile [13]. Dicho mapa recurre a la clasificación de coberturas vegetales realizada por Zhao *et al.* [31] y Di Gregorio [32].

Tabla 3.2. Clasificación de coberturas vegetales según Di Gregorio [32].

Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
100 - Cultivos	110 - Arrozales	
	120 - Invernaderos	
	130 - Otros Cultivos	
	140 - Huertos	
	150 - Barbechos	
200 - Bosques	210 - Nativo de Hoja Ancha	211 – Primarios
		212 – Renovales
	220 - Nativo de Coníferas	221 – Primarios
		222 – Renovales
	230 - Mixtos	231 – Primarios
		232 – Renovales
	240 - Plantaciones de Hoja Ancha	241 – Adultas
		242 – Cosechas
	250 - Plantaciones de Coníferas	251 – Adultas
		252 – Cosechas
300 - Pastizales	310 - Praderas	311 – Anuales

<sup>11</sup> Valores aproximados.

<sup>12</sup> En términos de permeabilidad, 1 [m<sup>2</sup>] equivale a 9.745.500 [m/s], aproximadamente.

		312 – Perennes
	320 - Otros Pastizales	
	330 - Pastizales Áridos	
400 - Matorrales	410 - Matorrales	
	420 - Matorrales Arborescentes	
	430 - Suculentas	
	440 - Plantación de Matorrales	
	450 - Otros Matorrales Áridos	
500 - Humedales	510 - Marismas	
	520 - Pantanos	
	530 - Otros Humedales	
600 - Cuerpos de Agua	610 - Lagos	
	620 - Reservorios	
	630 - Ríos	
	640 - Océano	
800 - Superficies Impermeables		
900 - Tierras Desnudas	910 - Salares	
	920 - Suelos arenosos	
	930 Suelos rocosos	931 - Rocas 932 - Gravas
1000 - Hielo y Nieves	1010 - Nieve	
	1020 - Hielo	
1200 - Nubes	1200 - Nubes	1210 - Nubes

Dada esta clasificación, se determinan de manera aproximada los valores de  $i_v$ .

Tabla 3.3. Clasificación del parámetro  $i_v$  en base a las categorías de cobertura vegetal.

Categoría de Cobertura Vegetal	Valor de $i_v$
211, 212, 221, 222, 231, 232, 241, 242, 251, 252	1
110, 120, 130, 140, 150	2
311, 312, 320, 330	3
410, 420, 430, 440, 450	4
510, 520, 530, 610, 620, 630, 640, 800, 910, 920, 931, 932, 1010, 1020	5

La categorización propuesta en la Tabla 3.3 corresponde a una abstracción simplificada. Otros criterios más extensos para clasificar la vegetación son posibles, no obstante, dado que el coeficiente  $i_v$  está asociado a la menor ponderación, la variación de los datos no es significativa.

Finalmente, el parámetro  $i_s$ , se asocia a la pendiente del terreno. Savvidou *et al.* [7] propone un criterio para definir dicho parámetro en base a rangos de pendientes, como muestra la fórmula:

$$i_s = \begin{cases} 1 & \text{si } i < 7.5 \% \\ 1 - \left(\frac{4}{22.5}\right)(7.5 - i) & 7.5 \% \leq i \leq 30 \% \\ 5 & \text{si } i > 30 \% \end{cases} \quad (55)$$

### 3.2.2. Parámetros asociados a modelo de tránsito de crecidas

De acuerdo con el método de escorrentía elegido, se necesitan los siguientes parámetros:

- Longitud del canal
- Pendiente media del canal
- Sección transversal
- Coeficiente de Manning

La pendiente media del canal se puede determinar como la variación de cota entre inicio y fin del canal, dividido por la longitud del canal. En el caso de que se cuente con una red de canales (ver Figura 3.1), se recomienda descomponer la red en múltiples canales, cada uno con su pendiente particular.

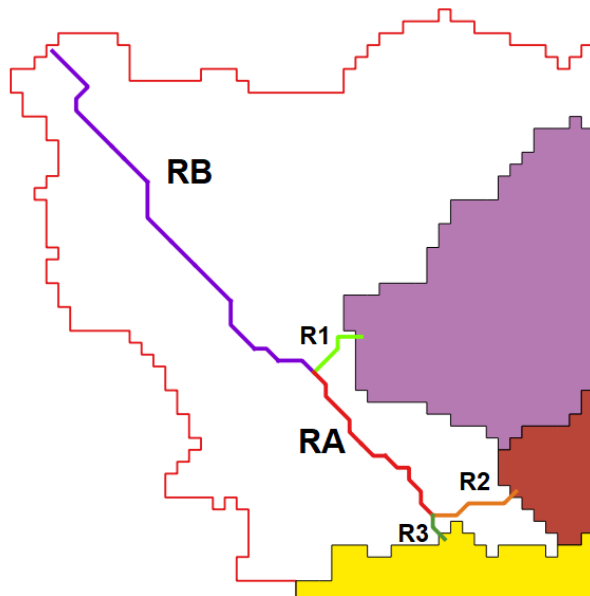


Figura 3.2. Descomposición de red de canales dentro de una cuenca.<sup>13</sup>

Con respecto a la sección transversal del canal, se sugiere, que, para cuencas de carácter pluvial, se asuma un canal de sección transversal triangular en las zonas bajas [33, 34]. La pendiente de talud de dicha sección transversal se puede asumir como proporcional a la pendiente media del canal.

Los valores del coeficiente de Manning pueden determinarse en base a la materialidad presente en el lecho del canal [2, 17]. Dicha materialidad está relacionada con el tipo de suelo existente: en la medida en que el lecho consista de material fino, su rugosidad disminuirá; por otra parte, si se encuentra en zonas rocosas, como en las faldas de una montaña, su rugosidad aumentará. Barnes [35] propuso un rango para el coeficiente de rugosidad, entre 0,024 y 0,075, en base a observaciones realizadas sobre múltiples cauces. Transponiendo dicha información, con la clasificación de suelos realizada por Dürr *et al.* [28], se obtienen los valores de la Tabla 3.4.

<sup>13</sup> Imagen referencial, elaboración propia.

Tabla 3.4. Valores de coeficiente de Manning de acuerdo a clasificación de tipo de suelo.

Tipo de suelo	Valor aproximado $n$
DS-SU-MT	0,022
SC,SS	0,025
SM, VI	0,035
VA,VB	0,05
PA,PI,PB	0,075

### 3.3. Tratamiento de variables meteorológicas

El elemento clave a la hora de desarrollar un modelo hidrológico basado en escorrentía, es la precipitación dentro de la cuenca de interés (de hecho, es el único dato de entrada en un modelo de dichas características). Dicha precipitación no es homogénea en toda la cuenca, teniendo una distribución irregular sobre la misma [2]. Dicha distribución es mucho más evidente a medida que la superficie de la cuenca aumenta. Si bien una cuenca puede contar con una o varias estaciones pluviométricas, con cantidades considerables de datos observados y aplicar técnicas de proporciones de datos sobre la superficie de la cuenca (como polígonos de Voronoi) [2, 3], estos conjuntos de observaciones no representan necesariamente la real distribución de precipitación sobre cuencas de gran extensión.

Dada esta situación, se requiere contar con una fuente de datos mucho más completa. Para estos efectos, se consideran observaciones realizadas por medio de satélites [1, 4], como las obtenidas en el Balance Hídrico Nacional [11]. La gestión de dichos datos (obtenidos en formato NetCDF) permite obtener datos de precipitaciones sobre el conjunto de celdas asociado a la cuenca de interés. Desde estas series de datos, se pueden obtener promedios históricos de precipitaciones para cada celda NetCDF, los cuales pueden extrapolarse al conjunto de celdas que componen la cuenca de interés.

Puede darse el caso en que la resolución de los datos NetCDF no coincida con la resolución de datos de la cuenca, y se pueda omitir parte de la variabilidad de la distribución de precipitaciones. Queda a criterio de quien desarrolle el modelo establecer una metodología que permita una distribución más realista de los datos, de ser necesario. Una propuesta para satisfacer este apartado consiste en establecer nodos de puntos y realizar interpolación de datos sobre la superficie de la cuenca; y en el caso de que se requiera una representación mucho más sensible, establecer una regresión múltiple, incorporando al análisis de manera explícita, la topografía propia de la cuenca.

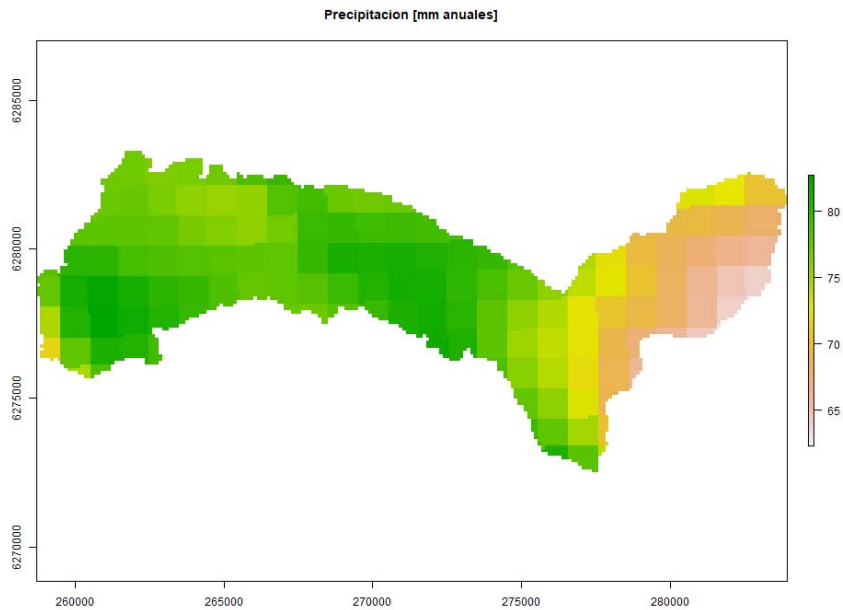


Figura 3.3. Distribución de la precipitación sobre una cuenca por medio de gestión de datos NetCDF.

### 3.4. Criterio de delineamiento de HRU

Para el correcto delineamiento de las HRU, se requiere conocer:

- Qué parámetros están involucrados en la composición de las HRU;
- En qué magnitud se ponderan dichos parámetros;
- Cuántas HRU se consideran necesarias para una correcta representación de la cuenca.

El proceso completo que conlleva dicho proceso de delineamiento por medio de la metodología PCA/HPC [8, 9], esquematizado en la Figura 3.4. Habiendo elegido la cuenca de estudio, se procede a obtener la información meteorológica (precipitaciones y temperaturas a nivel anual y/o trimestral), así como la información necesaria para describir adecuadamente sus características geomorfológicas. Una vez compilada toda información necesaria, se realiza el Análisis de Componentes Principales sobre el conjunto de datos. Desde dicho análisis, se obtiene el número óptimo de Unidades de Respuesta,

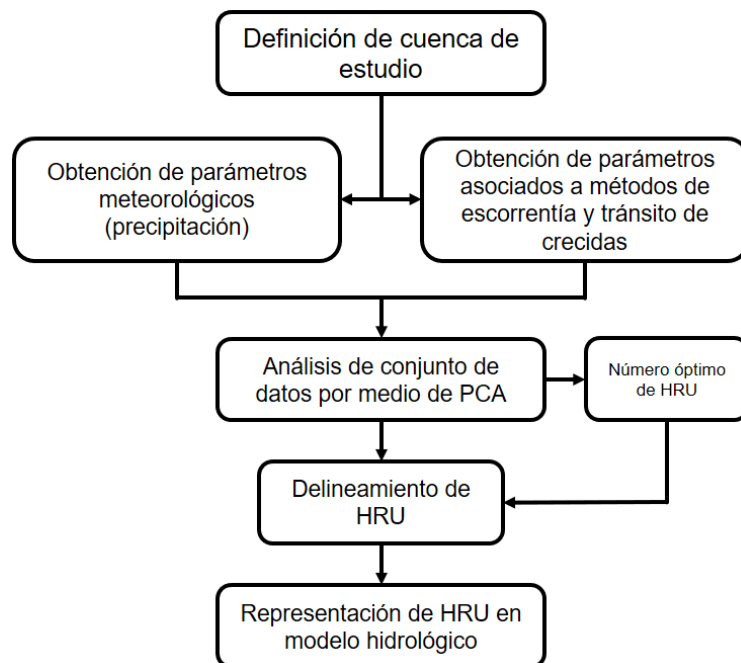


Figura 3.4. Metodología de delineamiento de Unidades de Respuesta Hidrológica.

### 3.4.1. Definición por medio de PCA

Se realiza un Análisis de Componentes Principales (PCA) sobre todo el conjunto de variables disponibles, o bien, sobre el conjunto de variables de interés<sup>14</sup>, a través del conjunto de herramientas *FactomineR* [9]. Para efectos de este trabajo de título, las variables de interés en cuestión son:

Parámetro	Asociado a
Elevación (cota)	Tiempo de concentración de cuenca
Longitud de cauce	
Curva Número CN	Precipitación efectiva
Precipitación media	Dato de entrada
Temperatura media	Dato de entrada

Tabla 3.5. Lista de parámetros de análisis de PCA.

Los resultados de dicho análisis se muestran sobre un plano cuyas dimensiones comprenden la mayor parte de la varianza total del conjunto de datos. Cabe destacar que, en cada dimensión, cada variable se relaciona de distinto modo: Es posible que dos variables se correlacionen positivamente con respecto a una dimensión, y que correlacionen negativamente en otra; o que la contribución de una variable varíe de forma considerable entre distintas dimensiones.

<sup>14</sup> Existe la posibilidad que algunos parámetros estén correlacionados o sean dependientes de otros. Por ejemplo, el parámetro de curva número CN lleva de modo implícito los valores de pendiente, permeabilidad del suelo y rangos de cobertura vegetal.

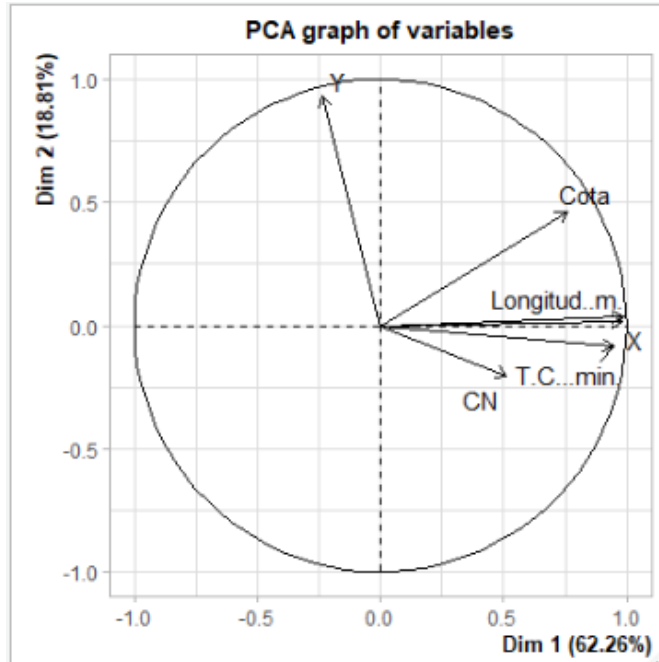


Figura 3.5. Conjunto de variables proyectadas sobre dos dimensiones del PCA realizado a dicho conjunto.<sup>1516</sup>

Es posible a su vez, que, de modo de observar mayor variación dentro del análisis a alguna variable en particular, asignarle un peso mayor.

### 3.4.2. Cantidad óptima de HRU

Diversos autores, como Fouedjio [10] y Husson, Lê y Pagès [9] proponen variadas fórmulas para agrupar los conjuntos de datos (llamados *clusters* en la literatura) asociados en cantidades óptimas. Sea como fuere, el objetivo de ellas es optimizar la representación de los datos en cada *cluster*. En el ámbito de las HRU, el objetivo es el mismo: dado el conjunto de datos, una cantidad óptima de HRU puede describirse como la cantidad mínima de unidades tal que el conjunto de información esté bien representado.

Dicho número, se obtiene por medio de la fórmula del índice de silueta [10, 36], el cual incorpora el concepto de *disimilaridad*, que se define como el grado de dispersión entre conjuntos de datos [10]. La fórmula del índice de silueta recurre a dos tipos de disimilaridades: una disimilaridad interna de cada *cluster* (el grado de dispersión entre cada parámetro dentro de un mismo cluster), y una disimilaridad entre *clusters*. Existe variedad de fórmulas para determinar disimilaridades, quedando a criterio de quien realice el análisis del conjunto de datos [10], o del algoritmo utilizado [9].

Se utilizará este índice en vez del indicado en [8], ya que no depende directamente de una diferencia, sino de sí mismo. El número óptimo de clusters es aquel que maximice el valor del índice de silueta, definido por medio de:

$$S(q) = \frac{1}{q} \sum_{i=1}^q \left( \frac{1}{n_i} \sum_{x \in C_i} S^i(x) \right) \quad (56)$$

$$S^i(x) = \frac{b^i(x) - a^i(x)}{\max(b^i(x), a^i(x))}$$

<sup>15</sup> Elaboración propia.

<sup>16</sup> Imagen Referencial.

Donde  $q$  representa el número de clusters,  $a^i(x)$  representa la disimilaridad interna promedio,  $b^i(x)$  representa la mínima disimilaridad entre *clusters*, mientras que  $C_i$  representa el  $i$ -ésimo *cluster* de cardinalidad  $n_i$ .

Para generar los clusters, se utilizará el criterio de agrupamiento jerárquico (*Hierarchical Clustering*) de Ward, el cual se basa en un enfoque de carácter aglomerativo o “de abajo arriba”, donde cada observación se considera como un *cluster*, y pares de clusters se fusionan a medida que uno sube de jerarquía.

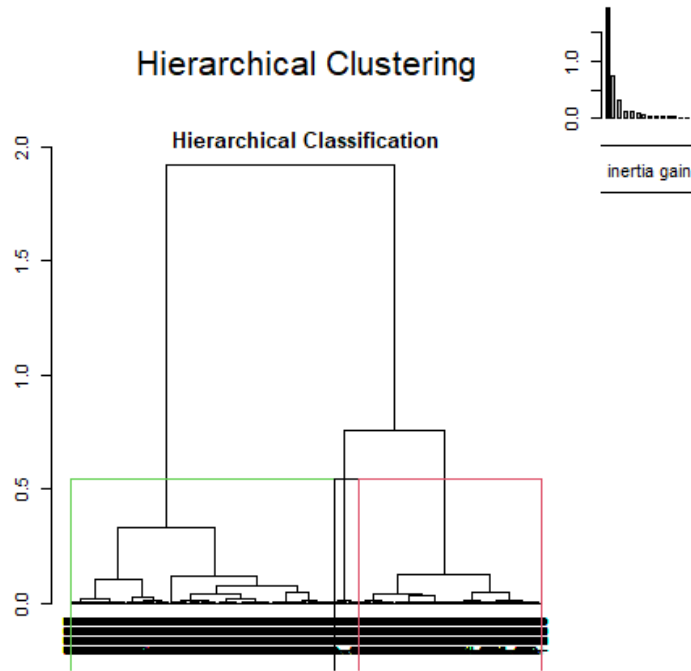


Figura 3.6. Dendrograma de agrupamiento jerárquico.

Las distancias entre *clusters* se definen por el cuadrado de la distancia euclidiana entre los valores de cada observación y sus promedios. Si se tiene un conjunto de  $i$  observaciones y  $k$  variables, la varianza total de  $Q$  grupos (*clusters*) queda definida por medio de:

$$\sum_{k=1}^K \sum_{q=1}^Q \sum_{i=1}^{Nq} (x_{iqk} - \bar{x}_k)^2 = \sum_{k=1}^K \sum_{q=1}^Q Nq (\bar{x}_{qk} - \bar{x}_k)^2 + \sum_{k=1}^K \sum_{q=1}^Q \sum_{i=1}^{Nq} (x_{iqk} - \bar{x}_k)^2 \quad (57)$$

Donde  $x_{iqk}$  es el valor normalizado de la  $k$ -ésima variable para el  $i$ -ésimo individuo del *cluster*  $q$ ,  $x_{qk}$  es el valor promedio de la variable  $k$  para el  $q$ -ésimo *cluster*,  $\bar{x}_k$  es el valor promedio de la  $k$ -ésima variable (dicho valor es cero si la variable está normalizada). Los dos términos del lado derecho de (57) representan la varianza entre *clusters* y la varianza interna, respectivamente. La importancia de dicha fórmula radica en que la varianza total del sistema permanece constante, a medida que la varianza interna disminuye (cada *cluster* se torna más homogéneo en su composición) y la varianza entre *clusters* aumenta (se vuelven más diferentes uno del otro).

### 3.5. Representación de HRU en modelo hidrológico

La implementación del modelo hidrológico de HEC-HMS se realiza por medio de tres elementos:

- Elemento *Sub-Basin*: Corresponde a la sub-cuenca de captación. Sobre ella se definen los valores de los parámetros asociados al método de escorrentía.

- Elemento *Reach*: Corresponde a una sección de canal. Sobre él se definen los valores de los parámetros asociados al método de tránsito de crecidas escogido.
- Elemento *Sink*: Es la salida de la cuenca.

Una visualización más completa de la composición de dichos elementos se indica en la Figura 3.7.

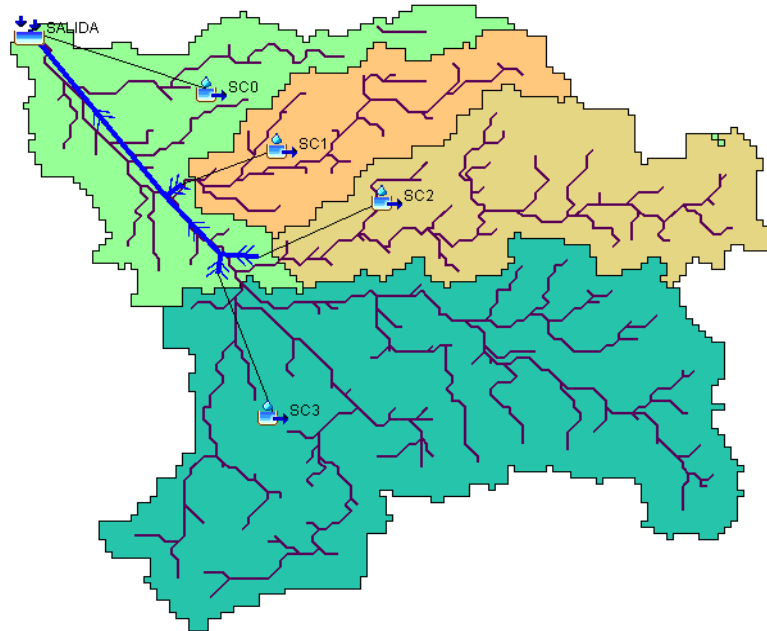


Figura 3.7. Esquema de modelo hidrológico de HEC-HMS.<sup>1718</sup>

La representación de cada una de las HRU dentro del modelo hidrológico de HEC-HMS se realizará de la siguiente forma:

1. Cada HRU se modela como una sub-cuenca, o elemento *Sub-Basin*, por separado.
2. Cada HRU tendrá sus propios parámetros de modelación, considerando los métodos de escorrentía previamente definidos (Superficie, valor de CN promedio, tiempo de concentración promedio). Dichos parámetros se extraerán desde el análisis de HRU desarrollado previamente.
3. Cada HRU descarga de forma directa sobre la salida de la cuenca. En caso de la distancia entre la salida de la cuenca y la HRU sea considerable, se debe incorporar un canal, o elemento *Reach*, exclusivo de dicha HRU
4. Las características del canal (forma, longitud, pendiente, rugosidad) dependen de las características principales de la cuenca, en el tramo que comprende entre la salida de la HRU y la salida de la cuenca.

<sup>17</sup> La visualización de polígonos asociados a subcuencas y redes de canales es de mero uso ilustrativo, dependiendo del tipo de descomposición de la cuenca.

<sup>18</sup> Elaboración propia.

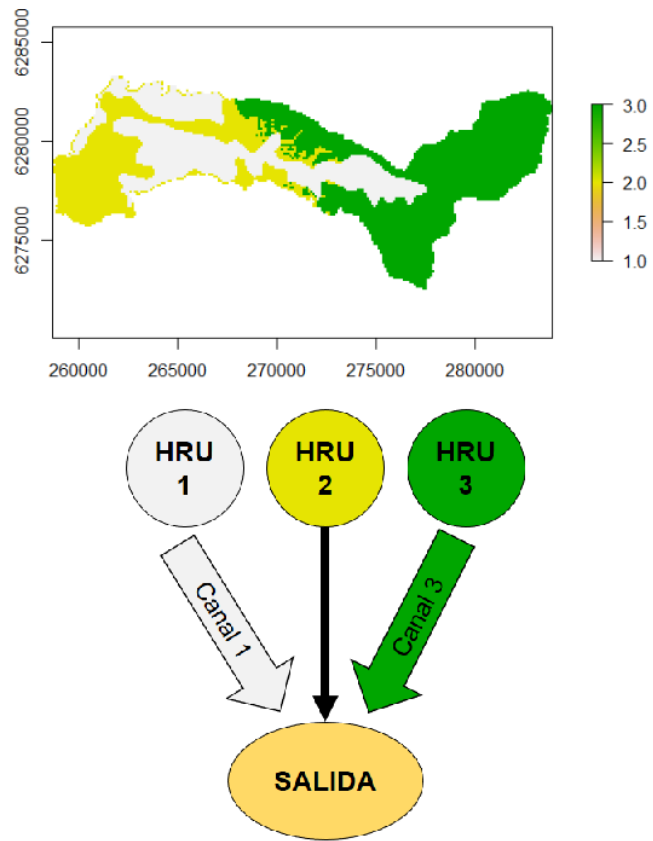


Figura 3.8. Descomposición de cuenca en 3 Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU), y su diagrama de implementación en un modelo hidrológico.<sup>19</sup>

<sup>19</sup> Elaboración Propia.

## CAPÍTULO IV

### 4. Recopilación de datos

#### 4.1. Caracterización del área de estudio N°1

##### 4.1.1. Ubicación

La zona de estudio está ubicada en la Región de Valparaíso, perteneciente a la Provincia de Los Andes, y a las comunas de Calle Larga y Los Andes. Se considera como punto de salida la estación fluviométrica “Estero Pocuro en El Sifón”, ubicada a  $32^{\circ}54'26''$  de Latitud Sur, y  $70^{\circ}32'35''$  de Longitud, y a una elevación de 1064 [msnm].

La cuenca del Estero Pocuro se identifica con el número 054-11, según el registro utilizado por la DGA. El cauce principal de esta cuenca es el Estero Pocuro, que tiene una extensión aproximada de 46 [km]. Su mayor aporte procede desde las laderas y esteros menores al norte del cordón de Chacabuco, para desembocar en la ribera izquierda del río Aconcagua, al sur de la ciudad de San Felipe.

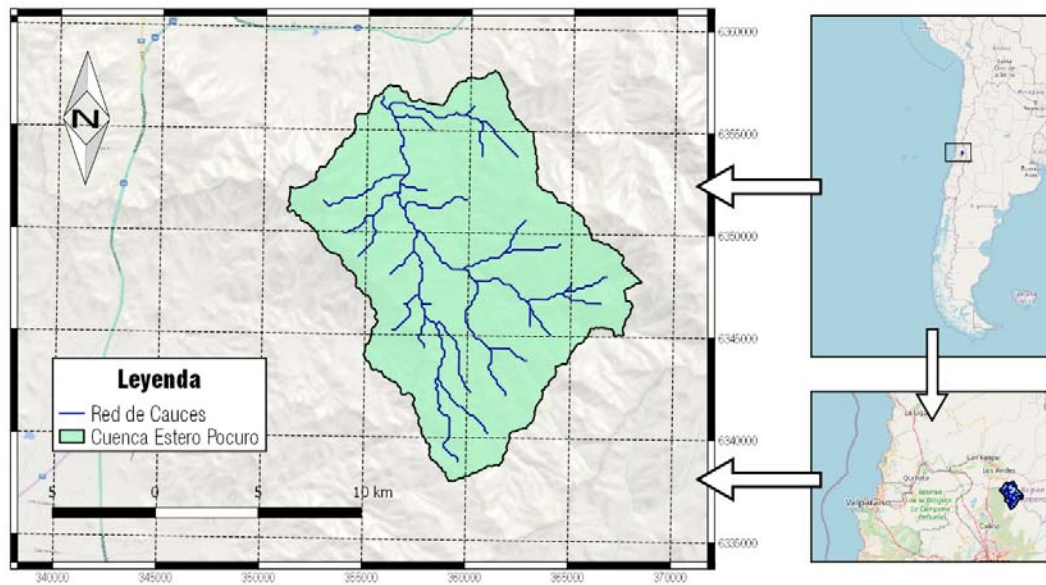


Figura 4.1. Cuenca del Estero Pocuro.

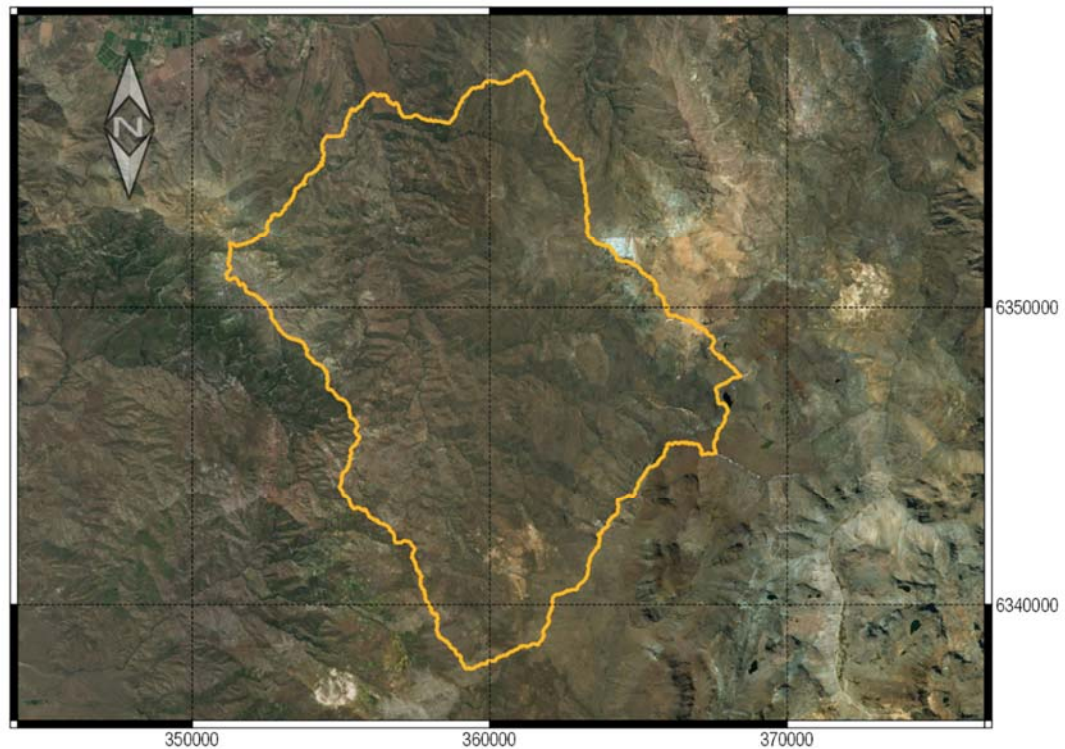


Figura 4.2. Imagen satelital, cuenca del Estero Pocuro.

El interés sobre esta cuenca en particular radica en que posee un muy bajo nivel de intervención humana: no existen asentamientos urbanos dentro del área definida, ni infraestructura que pueda alterar de modo significativo la red de cauces local. Asimismo, la mayoría de las tormentas registradas fuera de los meses de invierno son de características mayormente pluviales.

#### 4.1.2. Características morfológicas

La cuenca cuenta con un rango de elevaciones que van entre los 1064 a los 3580 [msnm]. Tiene un área aportante de 186,06 [km<sup>2</sup>], con el grueso de su superficie comprendido por debajo de los 2500 [msnm], lo que se puede observar en la curva hipsométrica de la zona de estudio (ver Figura 4.2). Por su parte, las zonas de cotas altas (por sobre los 2500 [msnm]) se distribuyen y concentran en el ala oriente y suroriental de la cuenca, como muestra la Figura 4.3.

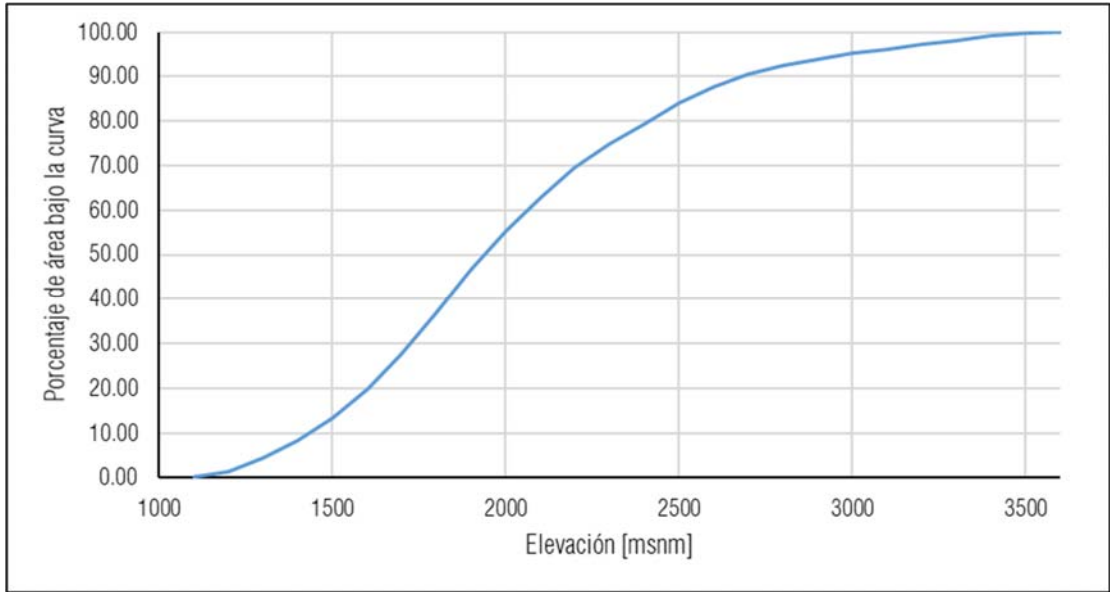


Figura 4.3. Curva hipsométrica de la cuenca.

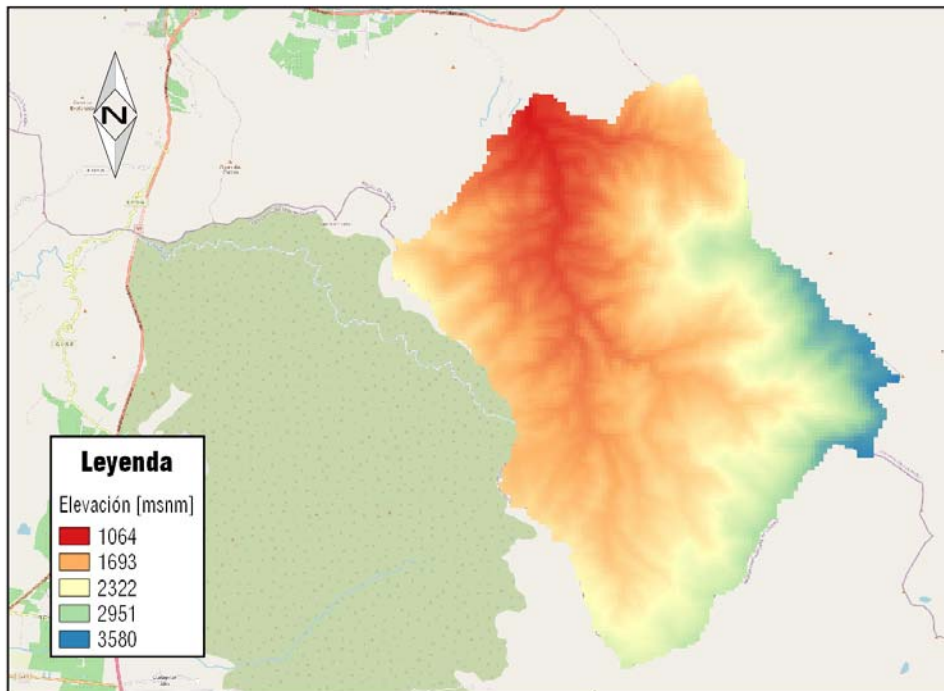


Figura 4.4. Morfología de la cuenca.

### 4.1.3. Características climáticas

Los climas que se distinguen dentro de la cuenca del Estero Pocuro corresponden a los climas Templado de tipo mediterráneo cálido y Frío de altura [37].

El clima templado se desarrolla sobre gran parte de la cuenca. Se caracteriza principalmente por ser más seco y con una variación térmica mayor que en la costa. La temperatura media anual es de 13,15 [°C] en la salida de la cuenca (Estero Pocuro en El Sifón), mientras que la precipitación alcanza los 432 [mm/año]

El Clima Frío de Altura se localiza en la cordillera de los Andes por sobre los 3.000 [m] de altura, en las laderas al oriente y suroriente de la cuenca (ver Figura 4.3). Las bajas temperaturas y las precipitaciones sólidas, caracterizan este tipo climático, permitiendo la acumulación de nieve en cumbres y quebradas.

En la Figura 4.4 se presenta un climograma utilizando los datos de temperatura y precipitación, correspondiente a la estación meteorológica "Estero Pocuro en El Sifón" (año hidrológico) [38]. Por su parte, en la Figura 4.5 se muestran las curvas de caudales medios medidos en la cuenca, mostrando un régimen mayoritariamente nival.

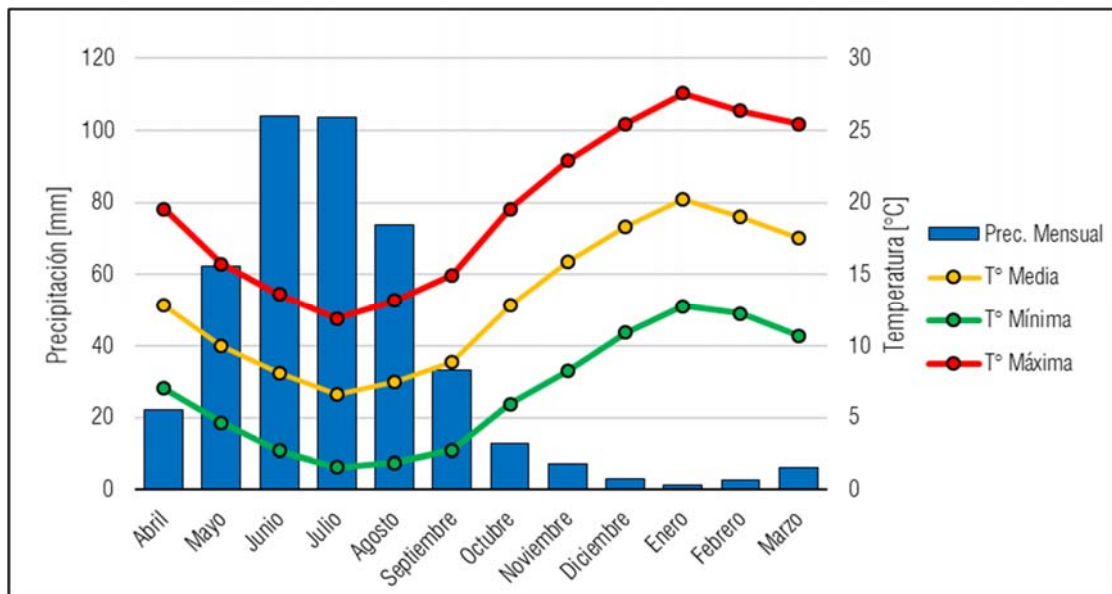


Figura 4.5. Climograma representativo Estero Pocuro.

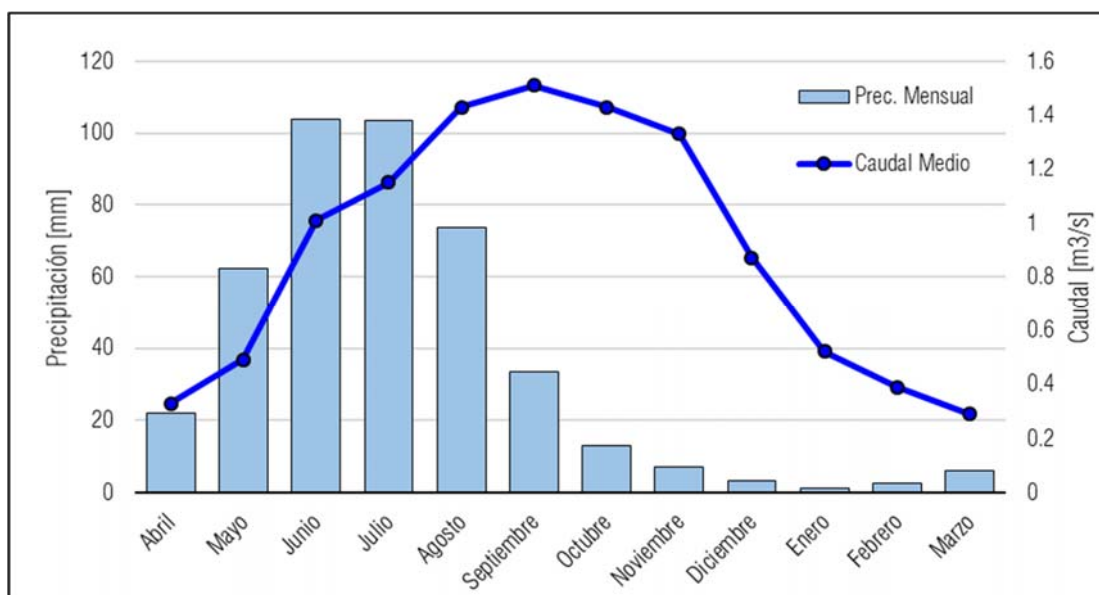


Figura 4.6. Curva de régimen y precipitaciones medias mensuales, Estero Pocuero.

#### 4.1.4. Características de tipo de suelo

De acuerdo a la información obtenida desde el Mapa Geológico de Chile [27], las categorías geológicas presentes en la cuenca son las siguientes:

Tabla 4.1. Descripción de categorías geológicas, cuenca Estero Pocuero.

Sigla / Color	Descripción	Superficie (%)
M3i	Mioceno Inferior-Medio: Complejos volcánicos parcialmente erosionados y secuencias volcánicas: lavas, brechas, domos y rocas piroclásticas andesítico-basálticas a dacíticas. En la Cordillera Principal, regiones I a VIII: complejos volcánicos Doña Inés y Ojos de Maricunga; formaciones Cerro Las Tórtolas y Farellones.	6.16
Mh	Mioceno (20-12 Ma): Pórfidos dacíticos, andesíticos, monzodioritas y dioritas de hornblenda, piroxeno y biotita. En la Cordillera Principal, regiones I a III: pórfidos de Poquis, Chapiquiña y 'Pórfidos auríferos' de la 'Franja de Maricunga'. En la Depresión Central y Cordillera Principal, región Metropolitana: cerro Manquehue.	0.67
Mimg	Mioceno Inferior-Medio (22-16 Ma): Granodioritas, monzogranitos, monzodioritas, monzonitas y dioritas de biotita y hornblenda. En Cordillera Principal, regiones V y Metropolitana: Plutón La Obra.	1.38
OM2c	Oligoceno-Mioceno: Secuencias volcanosedimentarias: lavas basálticas a dacíticas, rocas epiclásticas y piroclásticas. En la Cordillera Principal, regiones I a IX: formaciones Lupica, Escabroso, Abanico, Coya-Machalí, Cura- Mallín (inferior).	87.54

Q1	Pleistoceno-Holoceno: Depósitos aluviales, coluviales y de remoción en masa; en menor proporción fluvioglaciales, deltaicos, litorales o indiferenciados. En la Depresión Central, regiones Metropolitana a IX: abanicos mixtos de depósitos aluviales y fluvioglaciales con intercalación de depósitos volcanoclásticos.	4.25
TOTAL		100

Dichas categorías geológicas se distribuyen dentro de la cuenca de acuerdo a lo mostrado por la Figura 4.6.

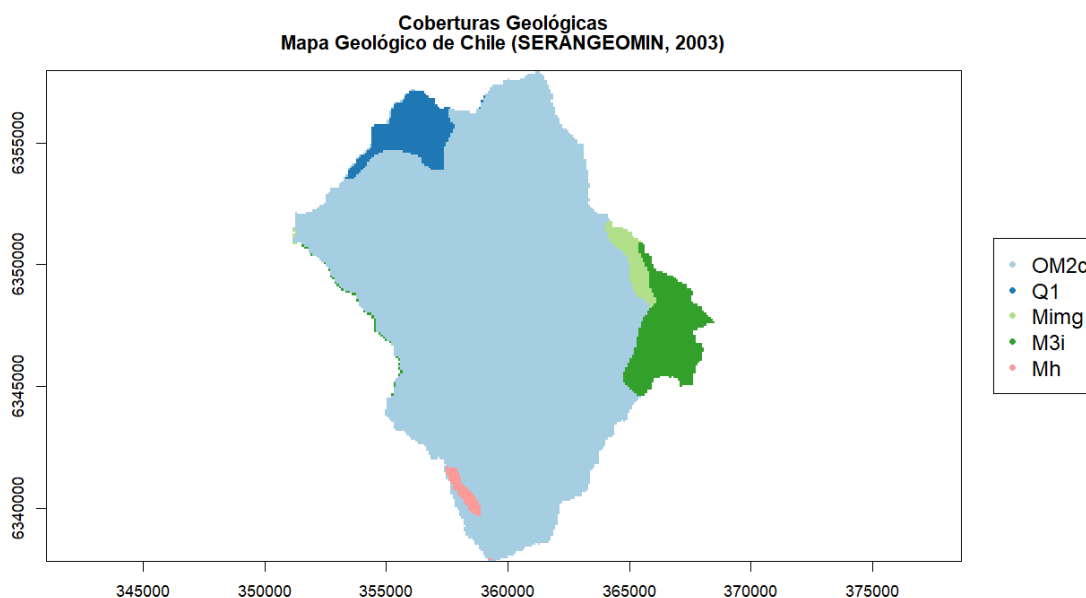


Figura 4.7. Distribución de categorías geológicas.<sup>20</sup>

#### 4.1.5. Características de cobertura vegetal

De acuerdo con la información procesada desde el Mapa de Cobertura de Suelos de Chile [13], se obtiene la categorización de coberturas vegetales para la cuenca del Estero Pocuro, descrito en la Tabla 4.2. Desde dicha tabla se desprende que, el grueso de la superficie de la cuenca está compuesto por matorrales y tierras desnudas; estas últimas concentradas en la parte alta de la cuenca. La distribución espacial de las coberturas vegetales está definida en la Figura 4.7.

Tabla 4.2. Descripción de coberturas vegetales.

Categoría	Superficie (%)
Cultivos	~0
Bosques	~0
Pastizales	2,34
Matorrales	63,8

<sup>20</sup> Los colores asociados a cada categoría se indican en la Tabla 4.1.

Cuerpos de Agua	0,03
Superficies Impermeables	0,01
Tierras Desnudas	33,76
TOTAL	100

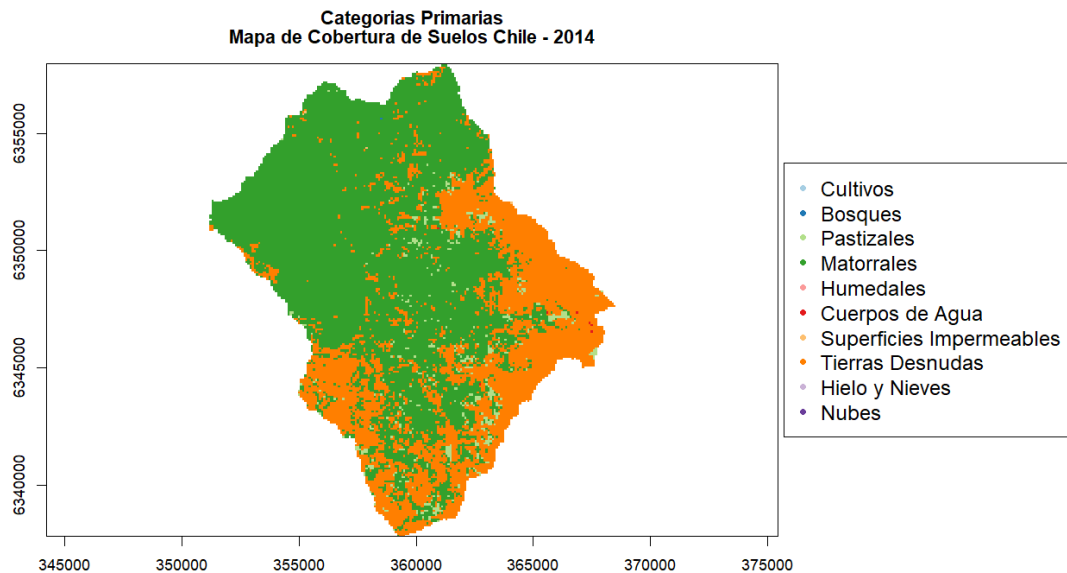


Figura 4.8. Distribución de coberturas vegetales.<sup>21</sup>

## 4.2. Procesamiento de la información disponible

A partir de la información disponible en mapas de elevación digital (DEM) [12], mapas geológicos [27, 28], mapas de cobertura de suelos [13, 31], y la información extraída desde el Balance Hídrico Nacional [11], se procede a obtener la información necesaria para la definición de parámetros necesarios para la implementación del modelo hidrológico en HEC-HMS.

### 4.2.1. Información geográfica y topográfica

La información tiene relación con la determinación de los parámetros de Tiempo de concentración y Curva Número. En el primer caso, se requiere determinar la longitud de cauce de cada una de las celdas que componen la cuenca con respecto al punto de salida. La resolución de cada una de estas celdas, es de, aproximadamente, 142 [m].

<sup>21</sup> Los colores asociados a cada tipo de cobertura vegetal quedan definidos en la Tabla 4.2

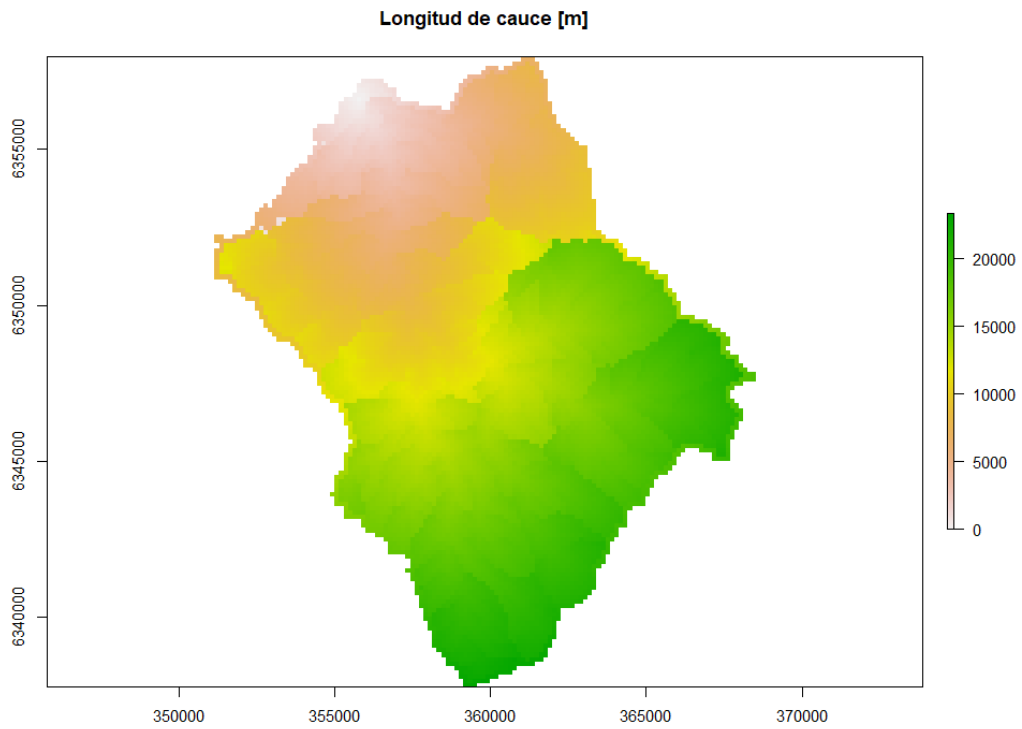


Figura 4.9. Distribución de longitudes de cauce.

#### 4.2.2. Cálculo de Parámetros

Por medio de la fórmula de Kirpich [2, 3] se obtiene el tiempo de concentración, en minutos, para cada una de las celdas, y su distribución sobre la superficie de la cuenca, como muestra la Figura 4.9.

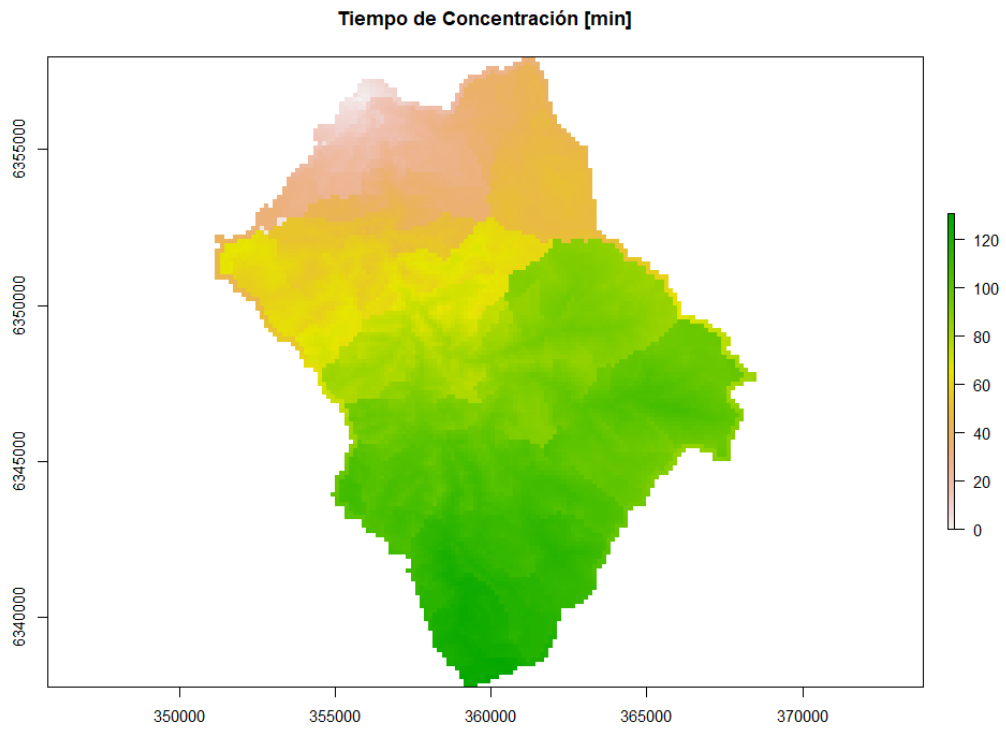


Figura 4.10. Distribución de tiempos de concentración.

Por su parte, la determinación del parámetro de Curva Número (CN), se desarrolla por medio de la metodología descrita por Savvidou *et. al* [7] (ver sección 3.2.1). Dicha metodología requiere de información sobre la geología de la cuenca, la cobertura de suelo de la cuenca, y la distribución de pendientes sobre la cuenca. En este caso, las características de la cuenca asociadas a geología y cobertura de suelo ya están definidas (ver secciones 4.1.4 y 4.1.5), por lo que sólo se requiere la distribución de las pendientes sobre la cuenca, como muestra la Figura 4.10.

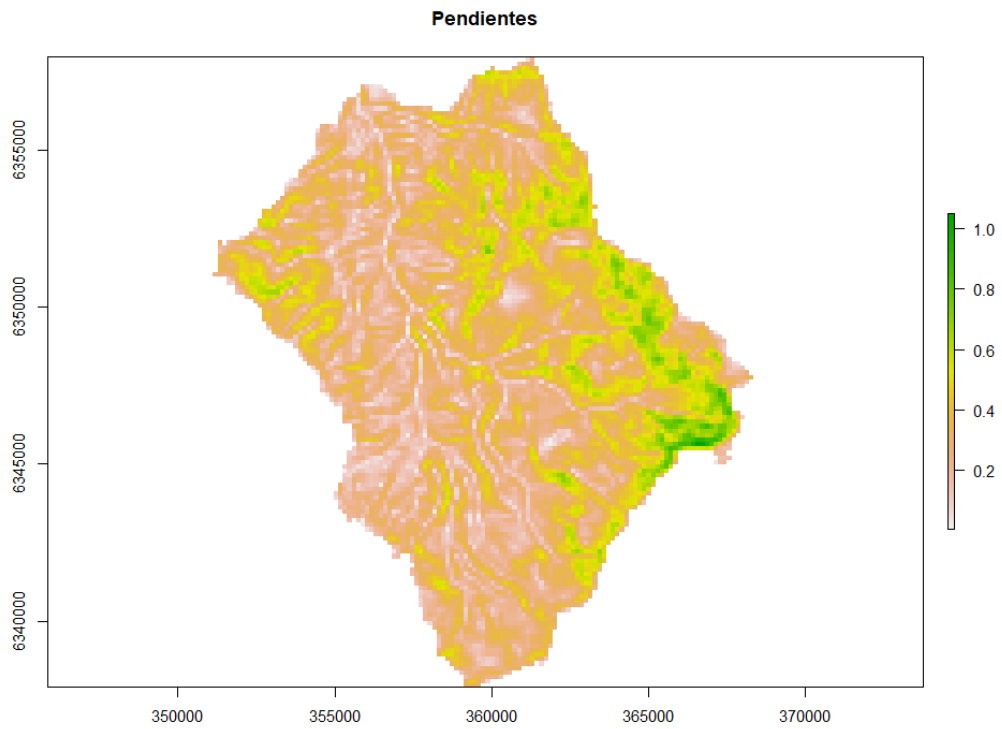


Figura 4.11. Distribución de pendientes en cuenca.

Utilizando la fórmula (51), se obtienen los valores de Curva Número descritos en la Figura 4.11. Desde dicha figura, se puede observar que la distribución del valor CN es relativamente homogénea en la mayoría de su superficie, con la salvedad en tres regiones aisladas: una en la parte baja de la cuenca, y dos en las zonas altas, evidenciando una fuerte influencia de la composición geológica del suelo, y, en consecuencia, de la permeabilidad del mismo.

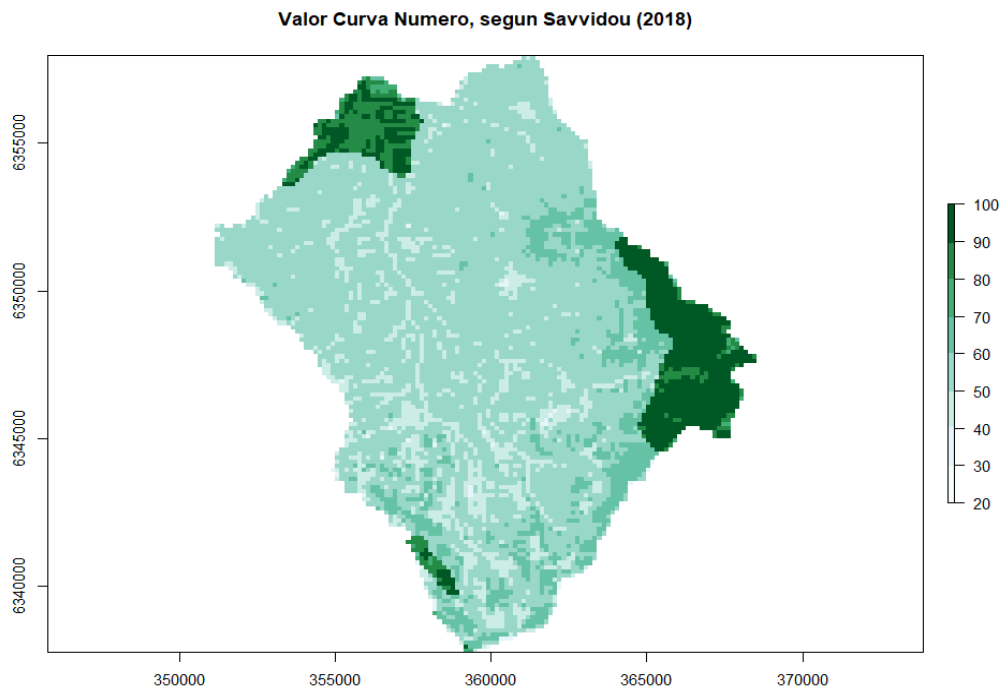


Figura 4.12. Distribución espacial del parámetro Curva Número (CN).

#### 4.2.3. Información meteorológica

La distribución de la precipitación media anual sobre la cuenca se obtuvo por medio de la información disponible del Balance Hídrico Nacional [11]. Dado que la resolución del archivo NetCDF es considerablemente grande, se realiza un ajuste por medio de interpolación con Distancia Inversa Ponderada (IDW) [3], como muestra la Figura 4.13.

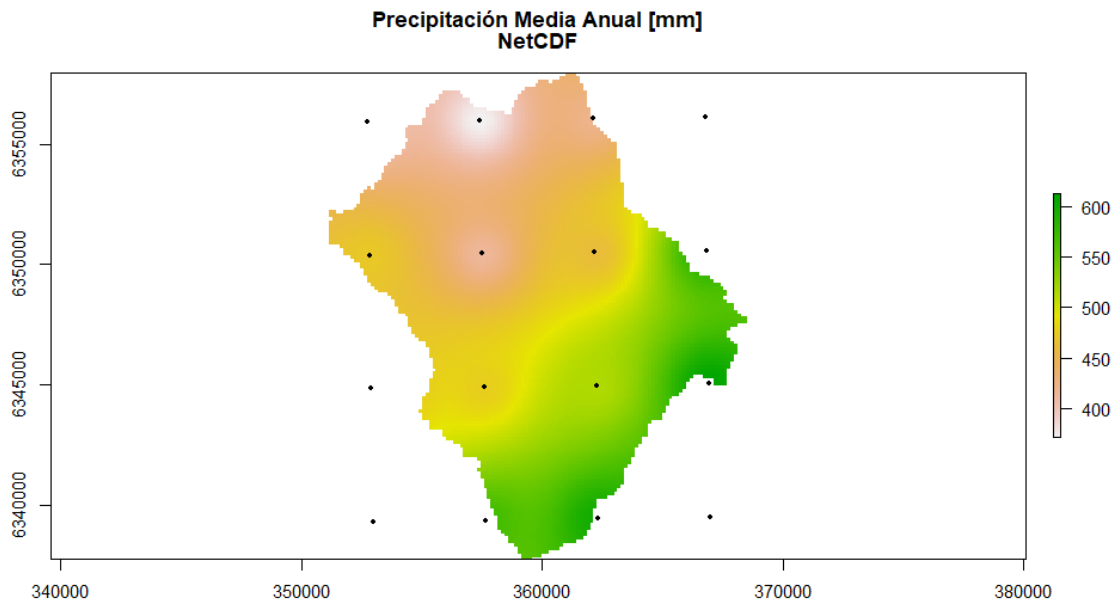


Figura 4.13. Distribución de precipitación media anual.

Los puntos negros dentro de la figura representan las ubicaciones de los puntos de observación del archivo NetCDF.

Desde dicha figura, se obtiene que la distribución de precipitación está relacionada con la altura de la cuenca. No obstante, la interpolación por medio de IDW no tiene en cuenta dicha variable, además de la existencia de “cúmulos” (en la literatura, se denominan “ojo de buey”) de datos asociados a los puntos de análisis del archivo NetCDF. Por lo tanto, es necesario realizar un ajuste de los datos. Dicho ajuste se realiza por medio de un modelo lineal, el cual incorpora a las variables independientes, la altura, cuya variabilidad está de modo implícito dentro de cada celda del archivo NetCDF. De este modo, los valores ajustados son más sensibles con respecto a las variaciones de altura dentro de la cuenca. Todo este proceso se realiza a través de las herramientas de gestión de datos de R.

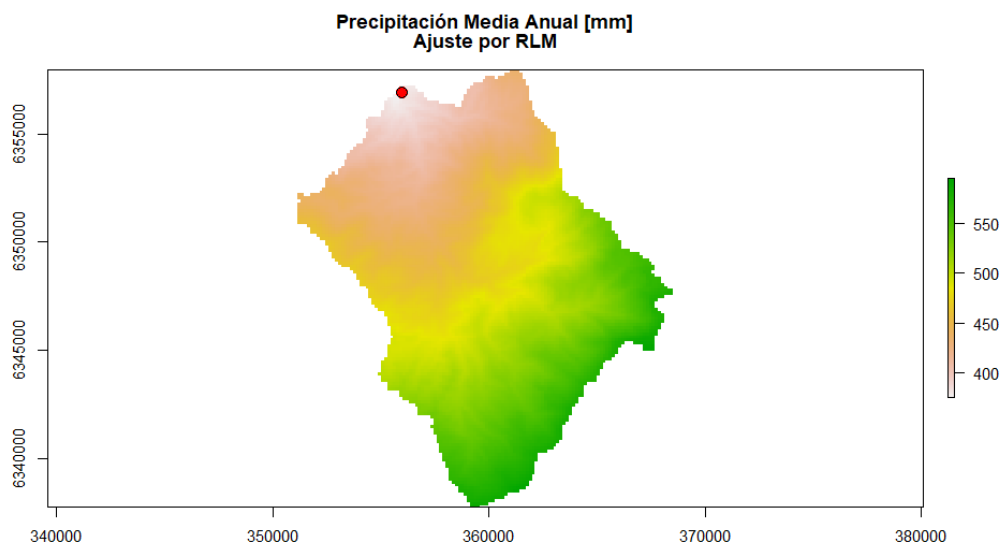


Figura 4.14. Distribución corregida de precipitación media anual.<sup>22</sup>

Paralelamente, se obtiene distribución de la temperatura media anual por medio de la información del Balance Hídrico Nacional.

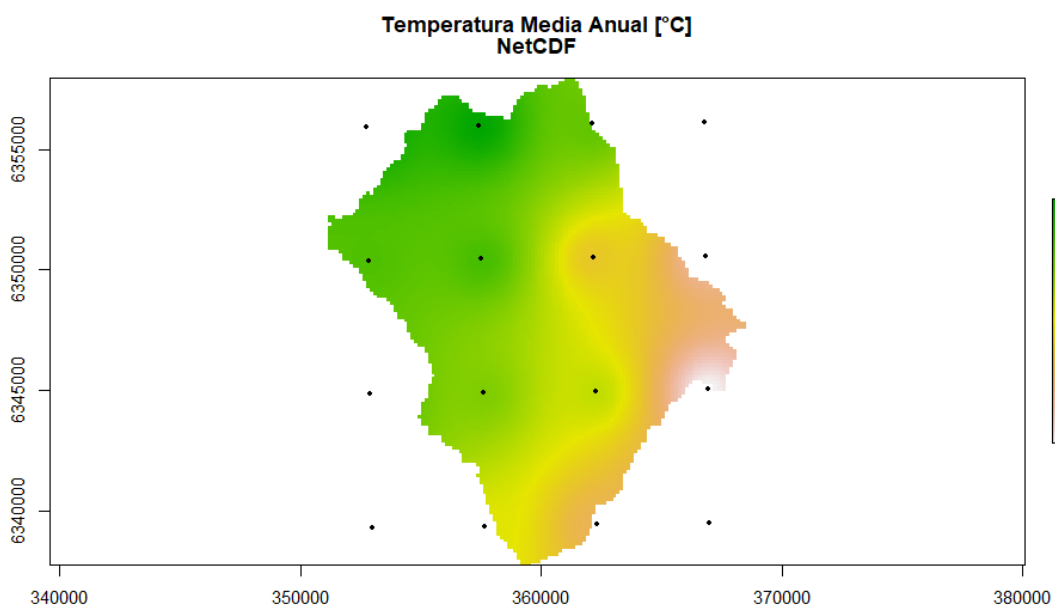


Figura 4.15. Distribución de temperatura media anual.

<sup>22</sup> El punto que aparece en la figura corresponde a la ubicación de la estación meteorológica.

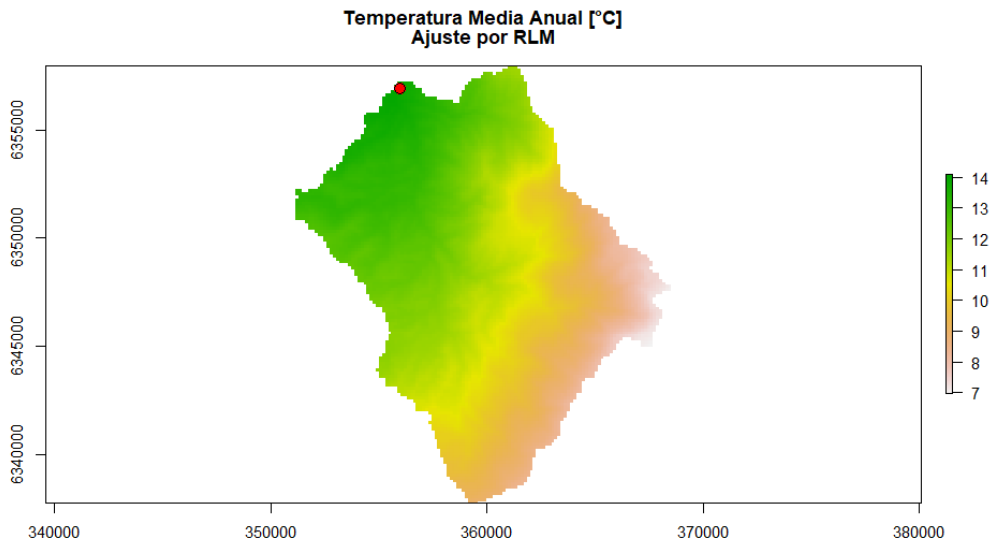


Figura 4.16. Distribución corregida de temperatura media anual.

### 4.3. Fenómenos meteorológicos de interés

Para objetos de este trabajo, se utilizarán como fenómenos de interés dos tormentas ocurridas dentro del trimestre Abril-Junio.

#### 4.3.1. Fenómeno de Mayo de 2012

La primera tormenta de interés es la observada entre los días 26 de Mayo del 2012 al 28 de Mayo del 2012. El hidrograma de crecida asociado a dicho fenómeno en la estación “Estero Pocuro en El Sifón” se muestra en la Figura 4.17.

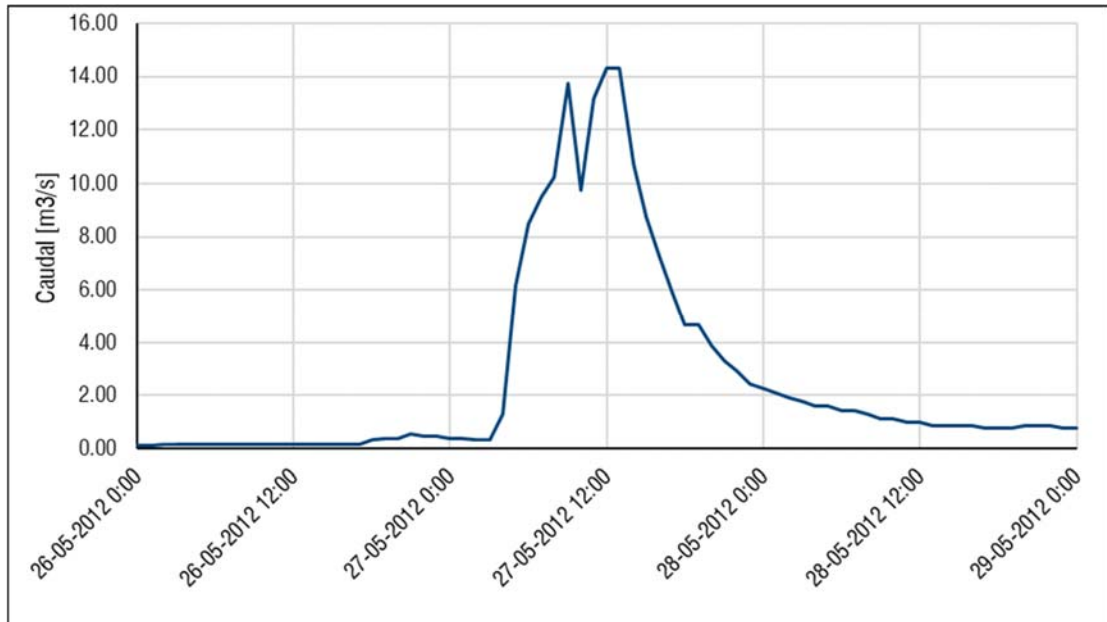


Figura 4.17. Hidrograma de crecida en estación “Estero Pocuro en El Sifón”, evento de Mayo 2012.

Para este registro, la planilla entregada por la DGA declara que los caudales registrados entre las 12:00 y 13:00 del día 27 de mayo, son mayores a los reales. La constante de decaimiento  $K$  del flujo basal [15, 20], considerando el intervalo entre las 14:00 del 27 de mayo, hasta las 00:00 del 29 de mayo, por medio de (47), se aproxima a un valor de 0.187.

#### 4.3.2. Fenómeno de Abril de 2017

La segunda tormenta de interés es la observada entre los días 19 de Abril del 2017 al 23 de Abril del 2017. El hidrograma de crecida asociado a dicho fenómeno en la estación se muestra en la Figura 4.18.

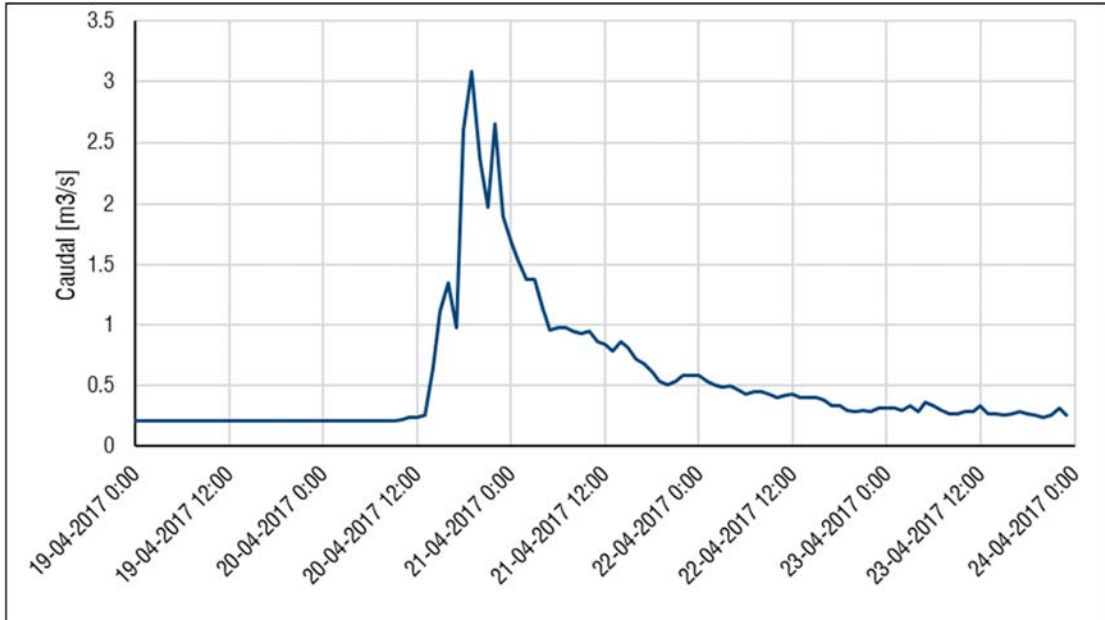


Figura 4.18. Hidrograma de crecida en estación "Estero Pocuro en El Sifón", evento de Mayo 2012.

La constante de decaimiento  $K$  del flujo basal [15, 20], considerando el intervalo entre las 23:00 del 20 de Abril, hasta las 12:00 del 22 de Abril, por medio de (47), se aproxima a un valor de 0.95.

#### 4.3.3. Gestión de la información meteorológica a nivel local, evento de Mayo de 2012

Cabe indicar, que no se cuenta con información de carácter meteorológico (precipitación y temperatura) a nivel horario sobre la misma estación, por lo que es necesario recurrir a las estaciones meteorológicas aledañas, provenientes desde la Red Agroclimática Nacional (Agromet) [39] (disponibles a nivel horario), así como las estaciones de la DGA (disponibles a nivel diario). La ubicación de dichas estaciones se indica en la Figura 4.19.

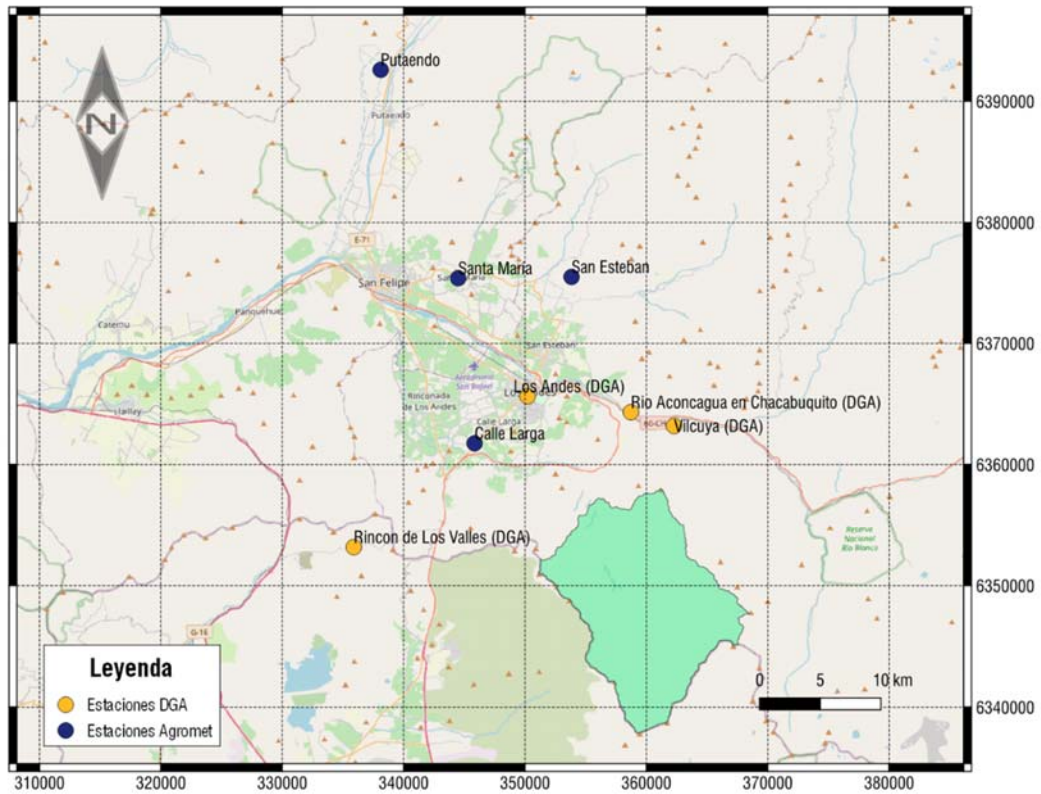


Figura 4.19. Ubicación de estaciones meteorológicas de Agromet y DGA.

Para las estaciones meteorológicas de Agromet, los datos de precipitaciones y temperaturas medias, a nivel horario, se indican en la Figura 4.20 y Figura 4.21, respectivamente.

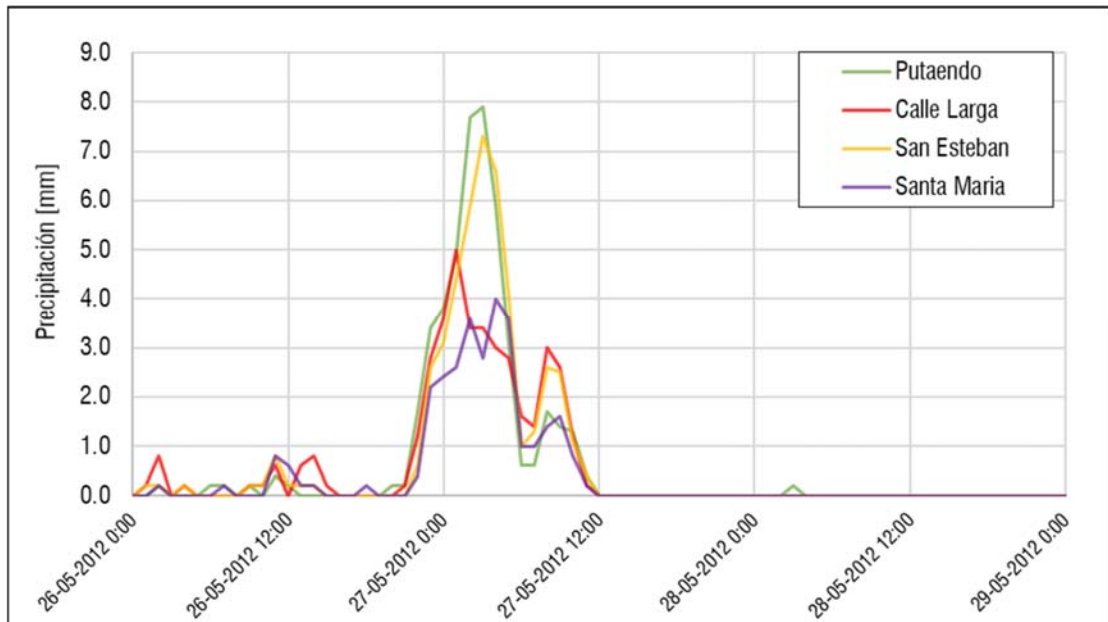


Figura 4.20. Distribución de precipitación a nivel horario, estaciones Agromet, evento de Mayo 2012.

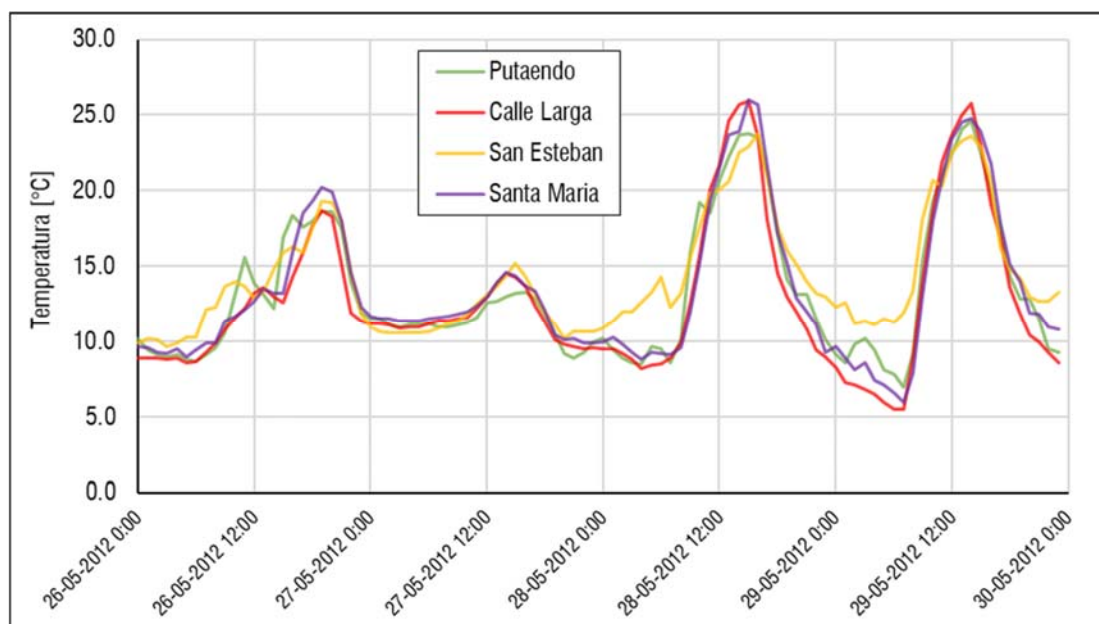


Figura 4.21. Distribución de temperatura a nivel horario, estaciones Agromet, evento de Mayo de 2012.

Por otra parte, las estaciones de la DGA sólo entregan información a nivel diario de precipitación y temperatura, descritos en la Tabla 4.3. Cabe indicar que sólo una de las estaciones DGA cercanas posee datos de temperatura a nivel diario.

Tabla 4.3. Valores meteorológicos diarios, estaciones DGA, evento de Mayo de 2012.

	Estaciones				
	Los Andes	Río Aconcagua en Chacabuquito		Vilcuya	Rincón de los Valles
Valor	Pp	Pp	T°	Pp	Pp
26-05-2012	28.5	31.3	12.6	45.5	33.1
27-05-2012	2.5	6.1	11.8	4.5	9
28-05-2012	0	0	15.1	0	0
29-05-2012	0	0	13.5	0	0

Con la información disponible, no es posible determinar los valores de precipitación y temperatura en la estación fluviométrica, por lo que se debe recurrir a la información a nivel diario del Balance Hídrico Nacional [11]. Cabe destacar, que, durante el proceso de recopilación de datos de precipitación del Balance Hídrico Nacional, ocurre un leve desfase temporal, posiblemente debido a problemas de escalamiento espacial y/o temporal. Debido a ello, se agrega un día más al análisis.

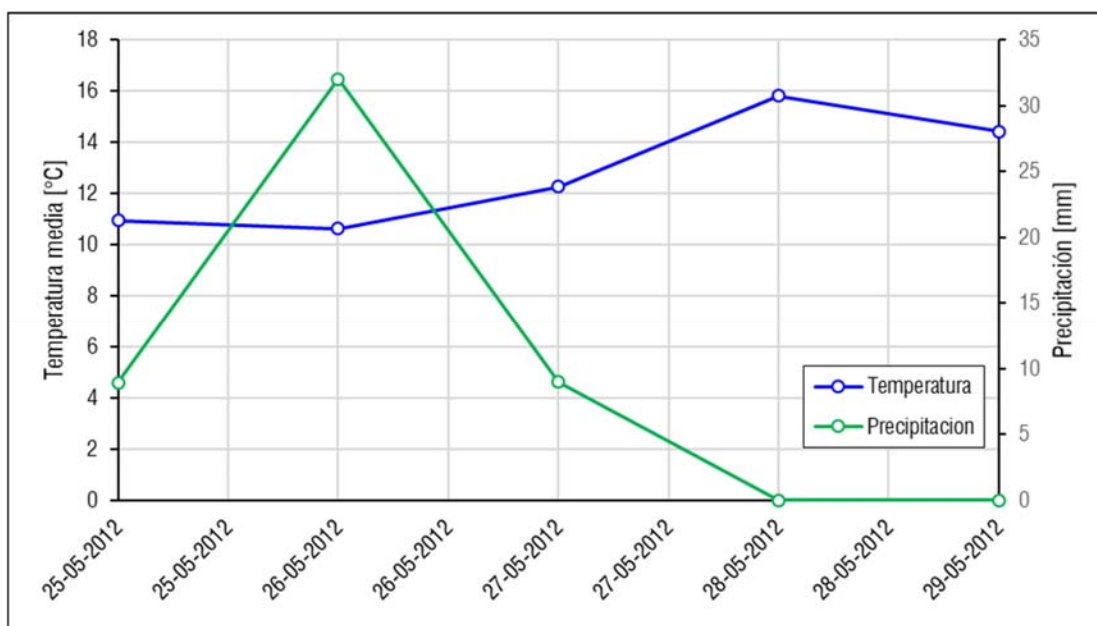


Figura 4.22. Distribución de precipitación y temperaturas medias diarias, Estación "Estero Pocuro en El Sifón".<sup>23</sup>

Tabla 4.4. Valores de precipitación y temperaturas medias diarias, Estación "Estero Pocuro en El Sifón".

	Temp. [°C]	Prec. [mm]
25-05-2012	10.94	8.96
26-05-2012	10.62	32.05
27-05-2012	12.26	8.99
28-05-2012	15.81	0.00
29-05-2012	14.42	0.00
<b>Valor Intervalo</b>	<b>12.81</b>	<b>49.99</b>

Desde los datos obtenidos, se tiene que, en la estación fluviométrica, la temperatura media es de 12,81 [°C], mientras que la precipitación total caída es de 49,99 [mm]. Con este último dato en cuenta, se re-escala y ajusta el hietograma de precipitación horaria de la estación "Calle Larga" de Agromet (ver Figura 4.20). Dicho re-escalamiento se realiza por medio de la fórmula:

$$P_i(\text{Pocuro}) = P_i(\text{Estación}) * \frac{P_{\text{Total}}(\text{Pocuro})}{P_{\text{Total}}(\text{Estacion})} \quad (58)$$

Donde  $P_i$  representa el agua caída en el  $i$ -ésimo intervalo de tiempo.

<sup>23</sup> Fuente: [9].

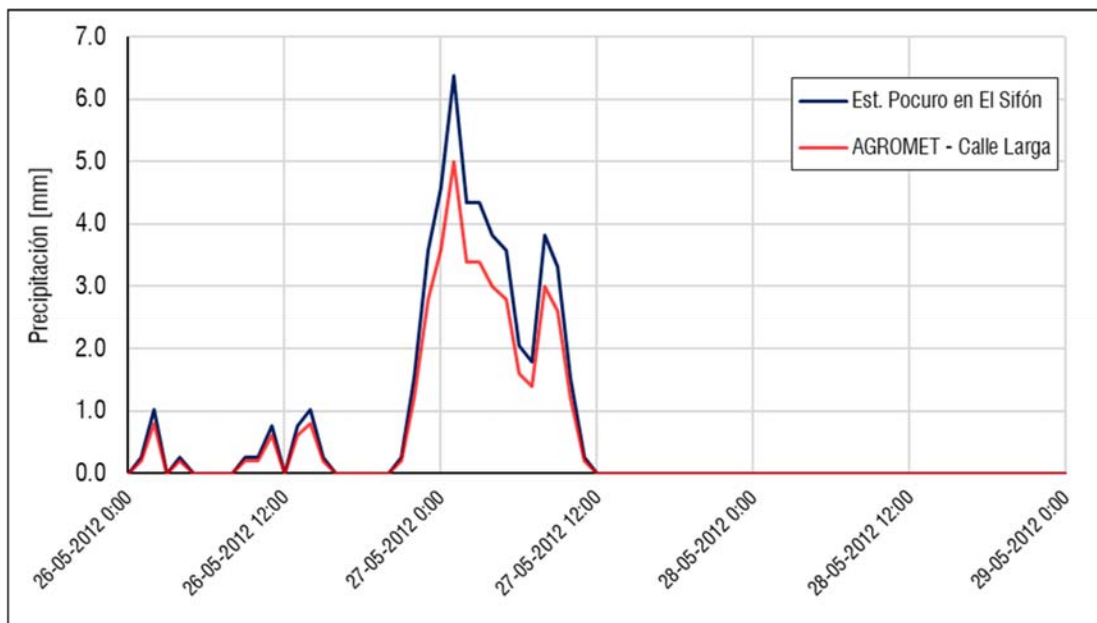


Figura 4.23. Hietograma de Precipitación, estación "Estero Pocuro en El Sifón", evento de Mayo de 2012.

#### 4.3.4. Gestión de la información meteorológica a nivel local, evento de Abril de 2017

Similar con el evento anterior, no se dispone de datos de precipitación y temperatura a nivel horario dentro de la cuenca, por lo que es necesario recurrir a la información entregada por las estaciones meteorológicas de la Red Agroclimática Nacional (ver Figura 4.19). Dichos valores se presentan en la Figura 4.24 y Figura 4.25.

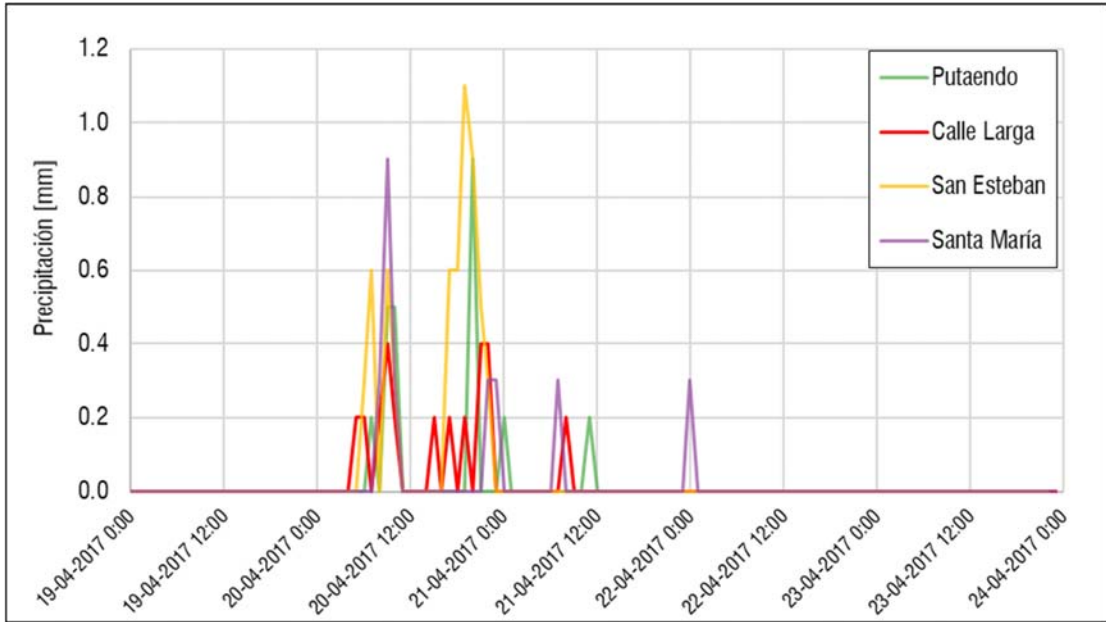


Figura 4.24. Distribución de precipitación a nivel horario, estaciones Agromet, evento de Abril de 2017.

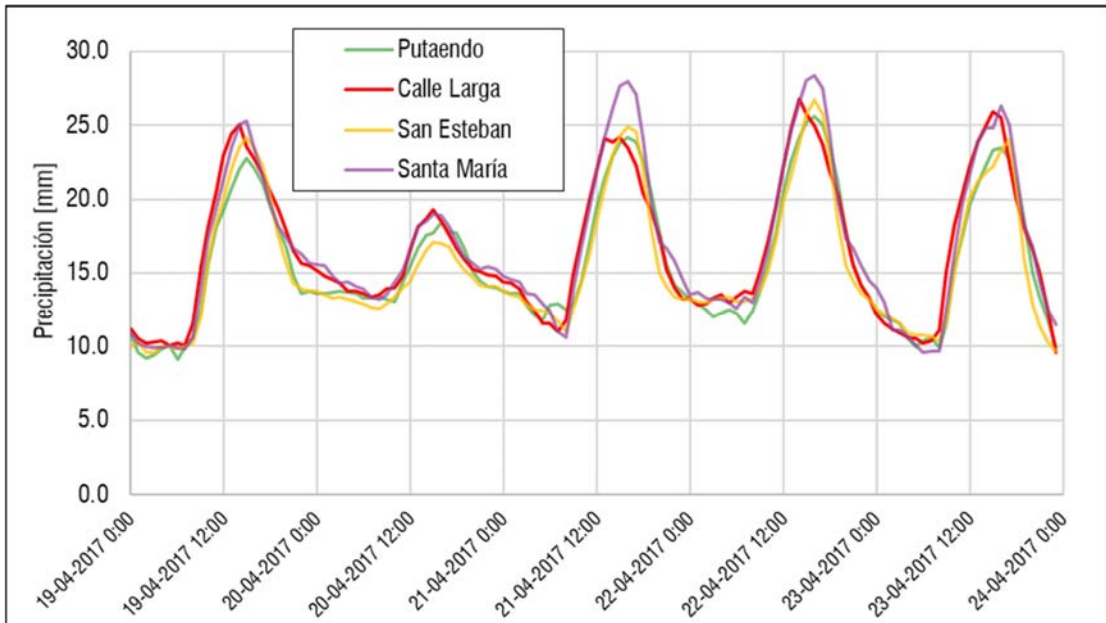


Figura 4.25. Distribución de temperatura a nivel horario, estaciones Agromet, evento de Abril de 2017.

Por su parte, las estaciones de la DGA entregan información meteorológica sólo a nivel diario. Para esta tormenta, sí se cuenta con información pluviométrica, a nivel diario, dentro de la cuenca.

Tabla 4.5. Valores meteorológicos diarios, estaciones DGA, evento de Abril de 2017.

	Estaciones		
	Río Aconcagua en Chacabuquito	Vilcuya	Pocuro en El Sifón
Valor	p	Pp	Pp
19-04-2017	0.3	2	1.2
20-04-2017	5.5	10	6.8
21-04-2017	0	0	0
22-04-2017	0	0	0
23-04-2017	0	0	0

Desde la información registrada, se obtiene que en la estación fluviométrica “Estero Pocuro en El Sifón”, durante el período comprendido entre el 19 de Abril de 2017 al 23 de Abril del mismo año, cayeron 8 [mm] de precipitaciones. Teniendo en cuenta ese dato, se procede a re-escalar el hietograma de precipitación por medio de (58), tomando como referencia la estación “San Esteban” de Agromet. Se utiliza esta estación dado que los datos registrados en esta estación son más consistentes en términos de magnitud, mientras que las demás estaciones presentan errores de medición.

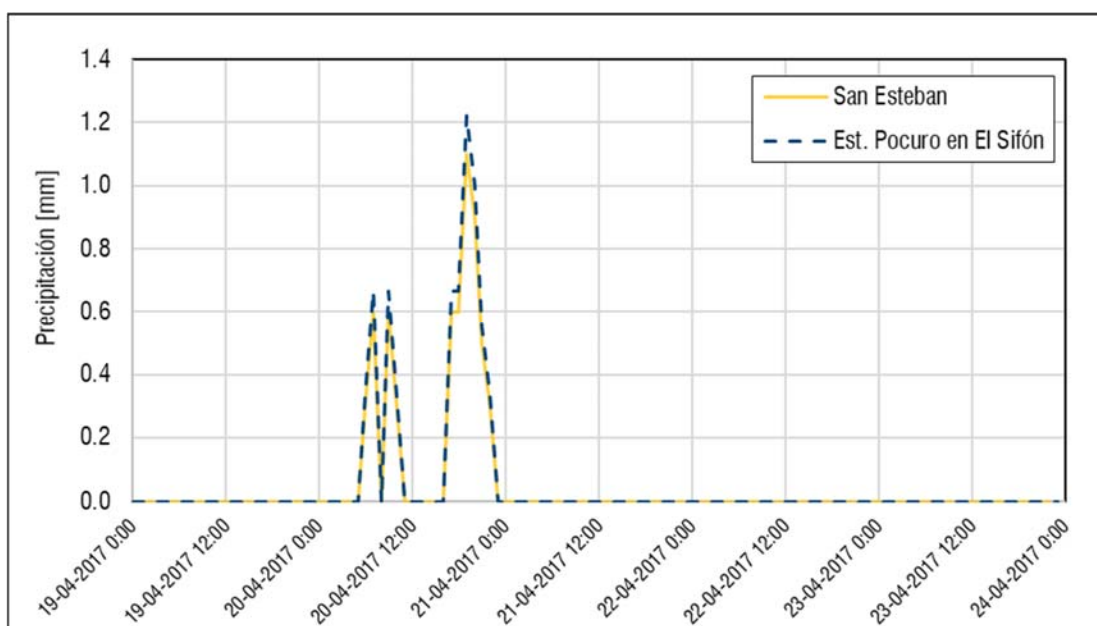


Figura 4.26. Hietograma de Precipitación, estación “Estero Pocuro en El Sifón”, evento de Abril de 2017.

## 4.4. Caracterización del área de estudio N°2

### 4.4.1. Ubicación

La zona de estudio está ubicada en la Región de la Araucanía perteneciente a la Provincia de Malleco, y a la comuna de Purén. Se considera como punto de salida la estación fluviométrica “Río Purén en Tranaman”, ubicada a  $38^{\circ}02'00''$  de Latitud Sur, y  $73^{\circ}01'00''$  de Longitud, y a una elevación de 58 [msnm].

La cuenca del Río Purén se identifica con el número 091-01, según el registro utilizado por la DGA. El cauce principal de esta cuenca es el Río Purén, que tiene una extensión aproximada de 35 [km]. Su mayor aporte procede desde los cerros y quebradas en el ala poniente de la Cordillera de Nahuelbuta, para desembocar en el Río Lumaco, el cual, a su vez, desemboca en la ribera norte del Río Imperial.

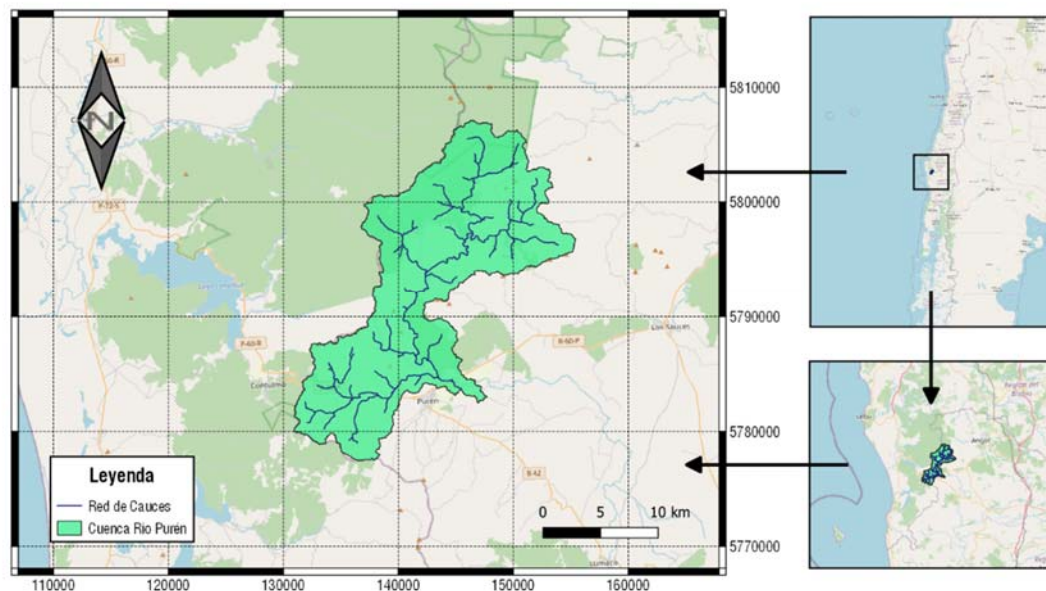


Figura 4.27. Cuenca del Río Purén.

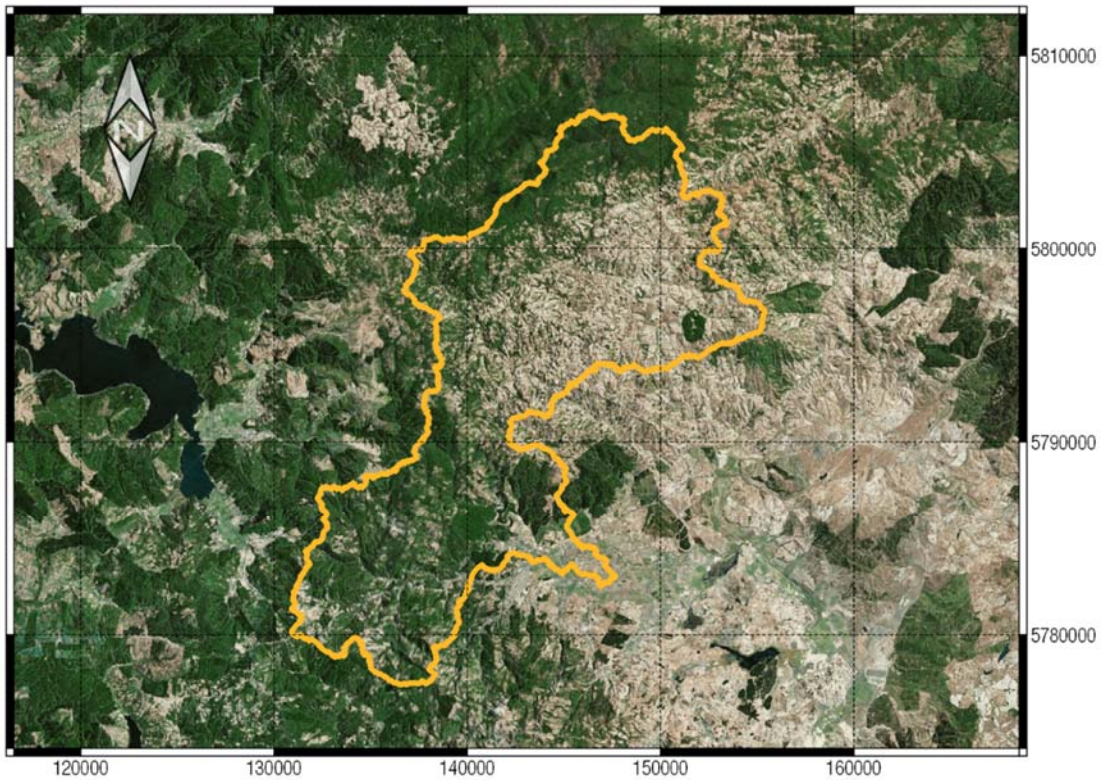


Figura 4.28. Imagen satelital, cuenca del Río Purén.

#### 4.4.2. Características morfológicas

La cuenca cuenta con un rango de elevaciones que van entre los 53 a los 1418 [msnm]. Tiene un área aportante de 294,99 [km<sup>2</sup>], con el grueso de su superficie comprendido por debajo de los 1000 [msnm], lo que se puede observar en la curva hipsométrica de la zona de estudio.

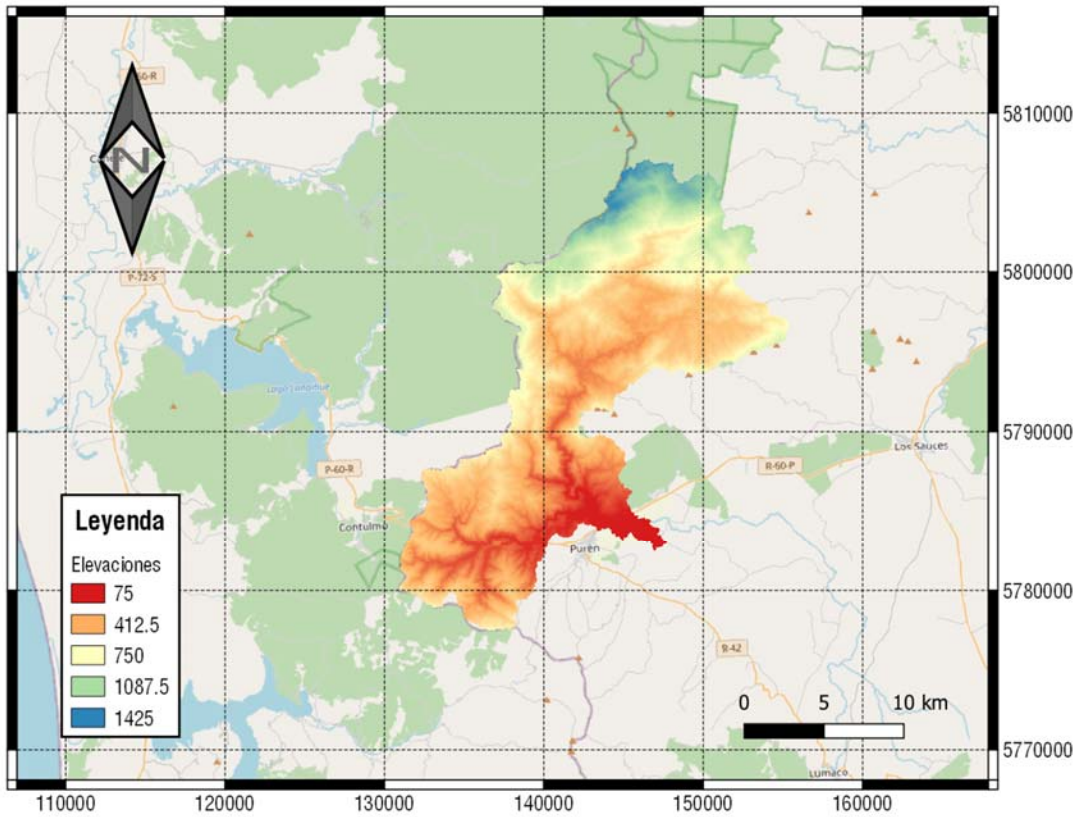


Figura 4.29. Morfología de la cuenca.

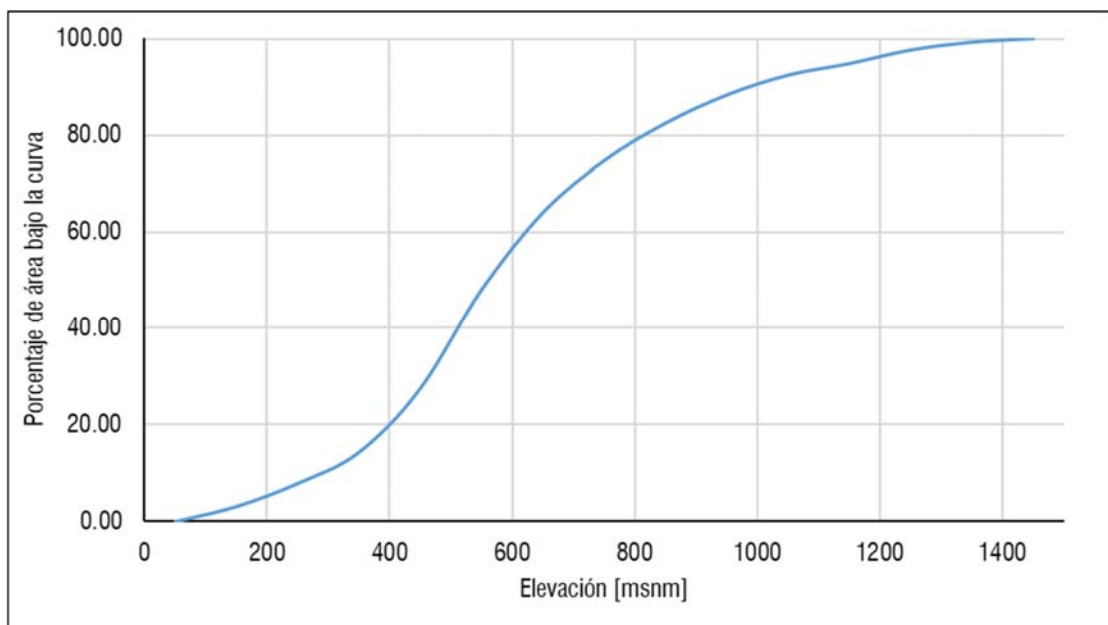


Figura 4.30. Curva hipsométrica de la cuenca.

#### 4.4.3. Características climáticas

El clima distintivo dentro de la cuenca del Río Purén corresponde al clima Templado de tipo mediterráneo cálido [37], caracterizado por un período lluvioso invernal y un período de sequía en verano. La temperatura media anual es de 10,9 [°C] en la salida de la cuenca, mientras que la precipitación alcanza los 1183 [mm/año]. La Figura 4.32 se muestra la curva de régimen de la cuenca.

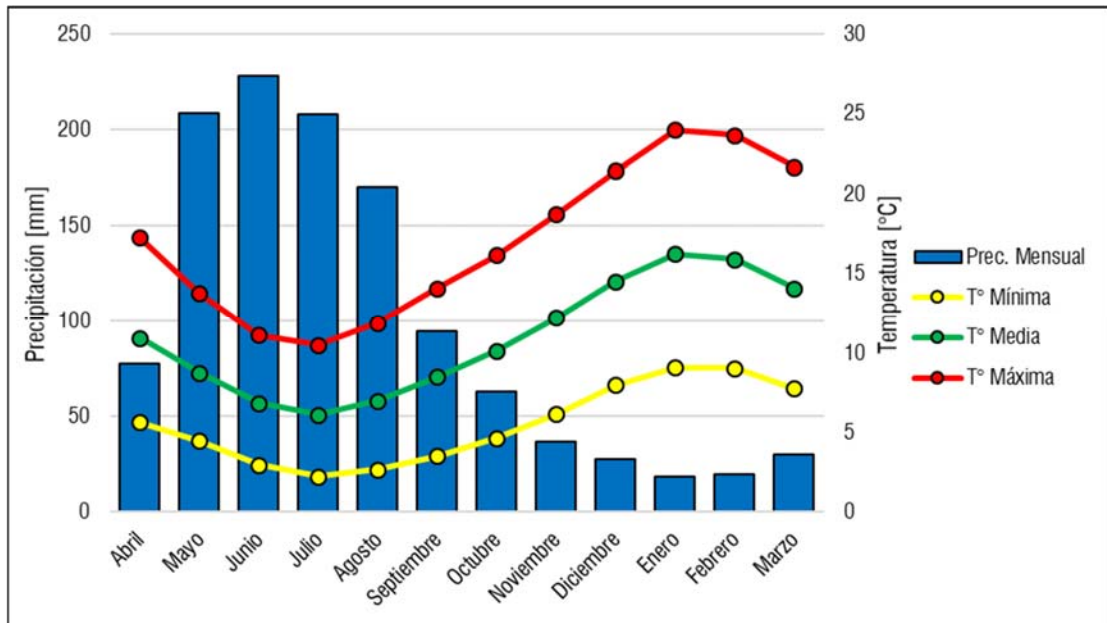


Figura 4.31. Climograma representativo Río Purén.

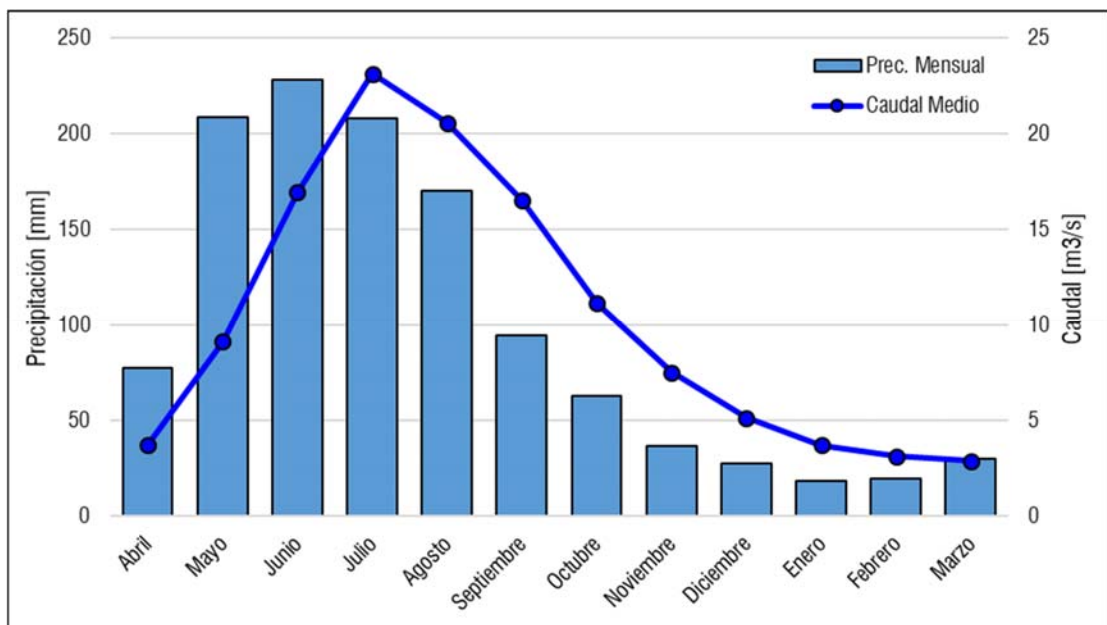


Figura 4.32. Curva de régimen y precipitaciones medias mensuales, Río Purén.

#### 4.4.4. Características de tipo de suelo

De acuerdo a la información obtenida desde el Mapa Geológico de Chile [27], las categorías geológicas presentes en la cuenca son las siguientes:

Tabla 4.6. Descripción de categorías geológicas, cuenca Río Purén.

Sigla / Color	Descripción	Superficie (%)
CPg	Carbonífero-Pérmico (328-235 Ma): Granitos, granodioritas, tonalitas y dioritas, de hornblenda y biotita, localmente de muscovita. En la Precordillera y Cordillera Principal, regiones I a IV: Batolitos compuestos, 'stocks' y cuerpos hipabisales (Sierra Moreno, Cordillera de Domeyko, Batolito Elqui-Limarí); en la Cordillera Principal, regiones X y XI: Batolito Panguipulli-Riñihue y 'Stock' Leones.	61.62
DC4	Devónico-Carbonífero: Metaareniscas, filitas y, en menor proporción, mármoles, cherts, metabasaltos y metaconglomerados; metaturbiditas con facies de 'mélange'. En la Cordillera de la Costa, regiones I a III: Formación El Toco, Complejo Epimetamórfico Chañaral; en la Cordillera Patagónica, regiones XI y XII: Complejo Metamórfico Oriental de Aisén y Magallanes.	3.00
Pz4b	Silúrico?-Carbonífero: Pizarras, filitas y metaareniscas con metamorfismo de bajo gradiente P/T (Serie Oriental) del Carbonífero temprano. En la Cordillera de la Costa, regiones VI a IX.	27.4
PzTr4 a	Paleozoico-Triásico Metapelitas, metacherts, metabasitas y, en menor proporción, neises y rocas ultramáficas con protolitos de edades desde el Devónico al Triásico y metamorfismo del Pérmico al Jurásico. En la Cordillera de la Costa, regiones IX a X: Complejo Metamórfico Bahía Mansa; en la Cordillera Principal, región X: Complejo Metamórfico Liquiñe (esquistos pelíticos)	3.36
Q1	Silúrico?-Carbonífero: Pizarras, filitas y metaareniscas con metamorfismo de bajo gradiente P/T (Serie Oriental) del Carbonífero temprano. En la Cordillera de la Costa, regiones VI a IX.	4.62
TOTAL		100

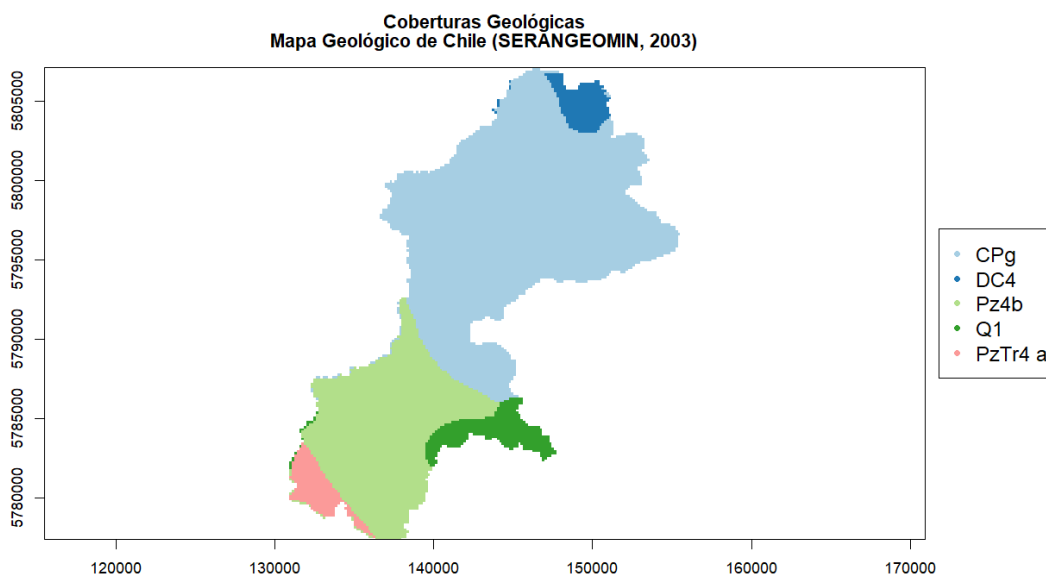


Figura 4.33. Distribución de categorías geológicas.

#### 4.4.5. Características de cobertura vegetal

De acuerdo con la información procesada desde el Mapa de Cobertura de Suelos de Chile [13], se obtiene la categorización de coberturas vegetales para la cuenca del Río Purén, descrito en la Tabla 4.7. Desde dicha tabla se desprende que, el grueso de la superficie de la cuenca está compuesto por matorrales (casi el 60% de la superficie total), además de un porcentaje considerable de la cuenca asociado a bosques, tanto plantaciones asociadas a la industria forestal, como de vegetación nativa.

Tabla 4.7. Descripción de coberturas vegetales.

Categoría	Superficie (%)
Cultivos	0,02
Bosques	32,71
Pastizales	13,36
Matorrales	53,73
Cuerpos de Agua	0,01
Superficies Impermeables	0,15
Tierras Desnudas	0,02
TOTAL	100

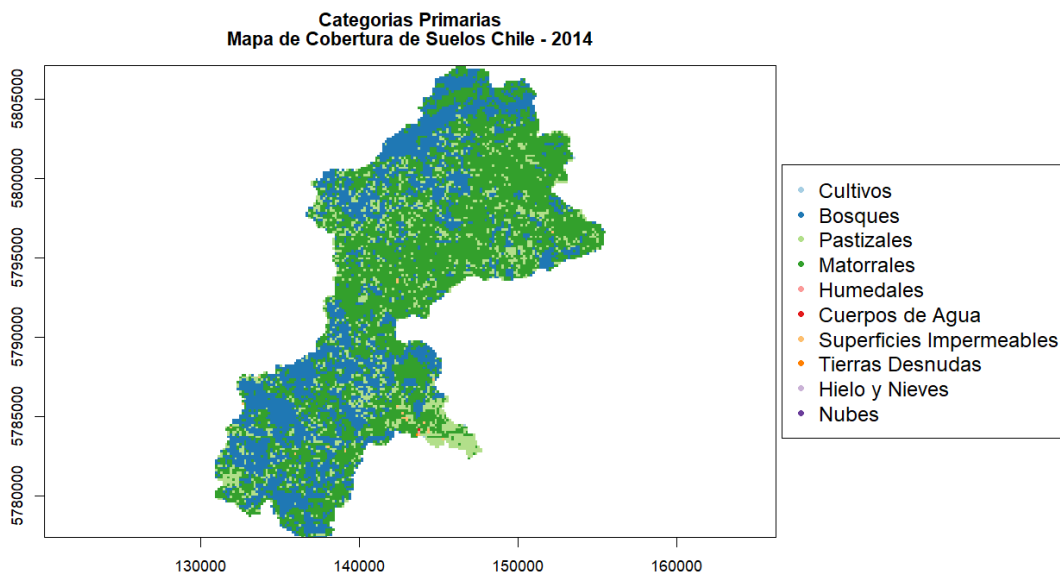


Figura 4.34. Distribución de coberturas vegetales.

## 4.5. Procesamiento de la información disponible

A partir de la información disponible en mapas de elevación digital (DEM) [12], mapas geológicos [27, 28], mapas de cobertura de suelos [13, 31], y la información extraída desde el Balance Hídrico Nacional [11], se procede a obtener la información necesaria para la definición de parámetros necesarios para la implementación del modelo hidrológico en HEC-HMS.

### 4.5.1. Información geográfica y topográfica

La información tiene relación con la determinación de los parámetros de Tiempo de concentración y Curva Número. En el primer caso, se requiere determinar la longitud de cauce de cada una de las celdas que componen la cuenca con respecto al punto de salida. La resolución de cada una de estas celdas, es de, aproximadamente, 194 [m].

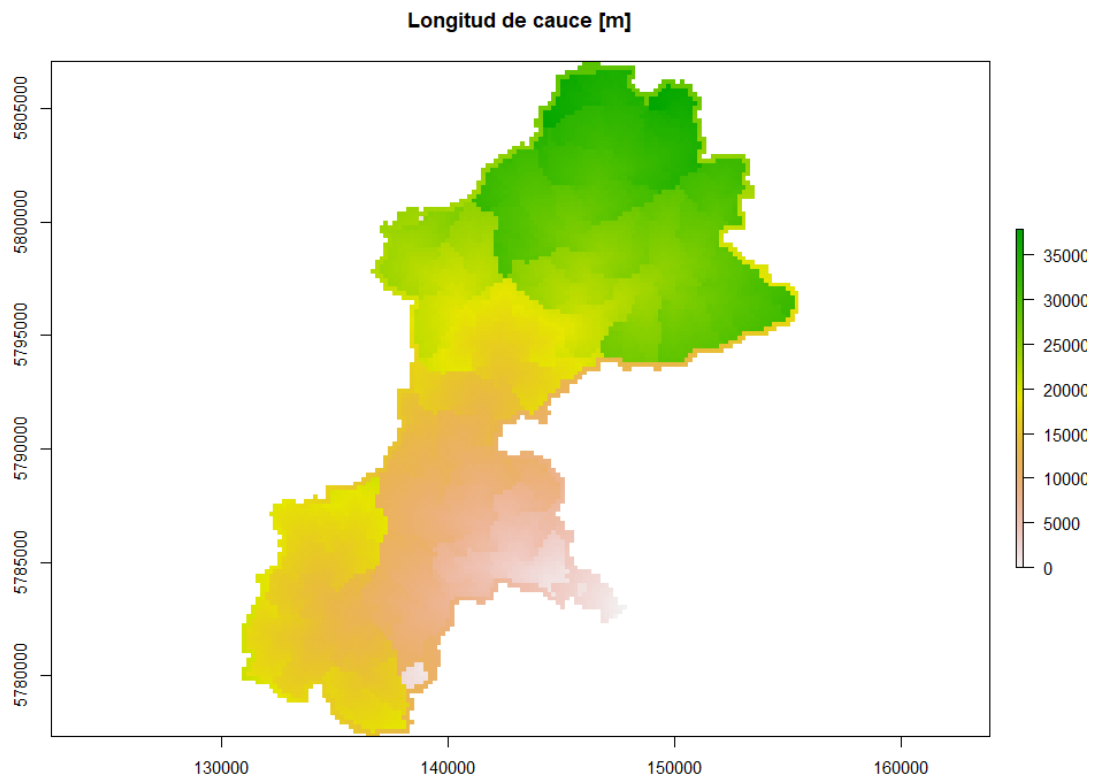


Figura 4.35. Distribución de longitudes de cauce.

#### 4.5.2. Cálculo de Parámetros

Por medio de la fórmula de Kirpich [2, 3] se obtiene el tiempo de concentración, en minutos, para cada una de las celdas, y su distribución sobre la superficie de la cuenca, como muestra la Figura 4.36.

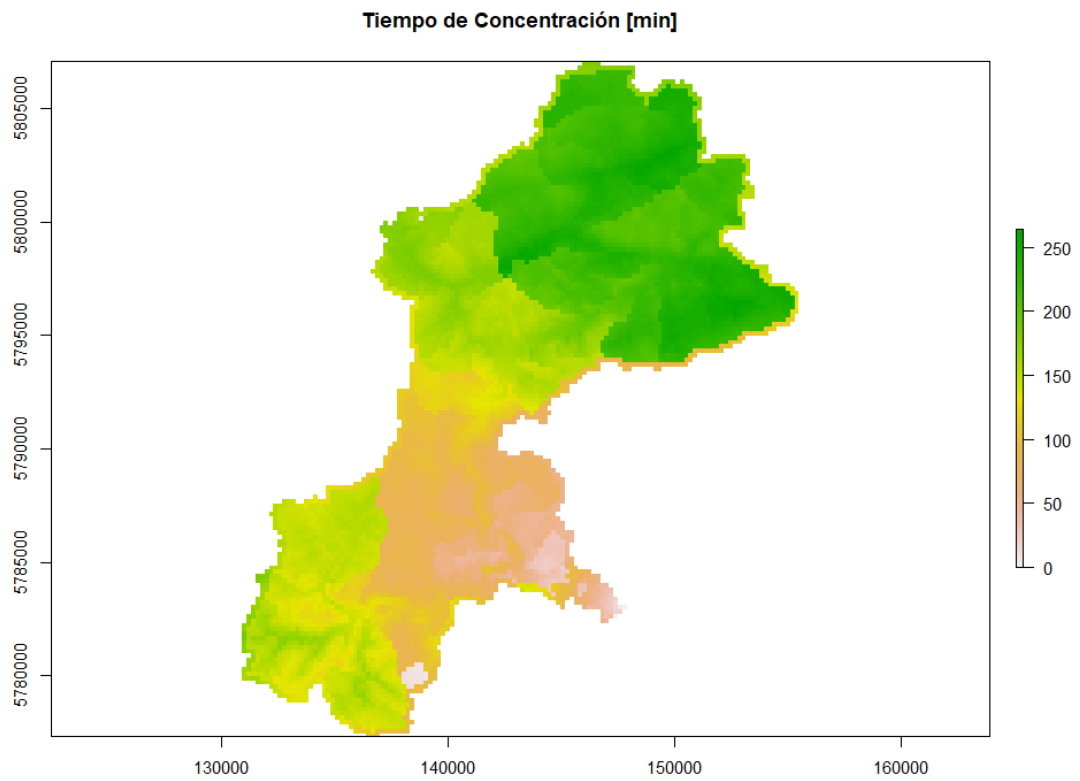


Figura 4.36. Distribución de tiempos de concentración.

Por su parte, la determinación del parámetro de Curva Número (CN), se desarrolla por medio de la metodología descrita por Savvidou et. al [7] (ver sección 3.2.1). Dicha metodología requiere de información sobre la geología de la cuenca, la cobertura de suelo de la cuenca, y la distribución de pendientes sobre la cuenca. En este caso, las características de la cuenca asociadas a geología y cobertura de suelo ya están definidas (ver secciones 4.1.4 y 4.1.5), por lo que sólo se requiere la distribución de las pendientes sobre la cuenca, como muestra la Figura 4.37.

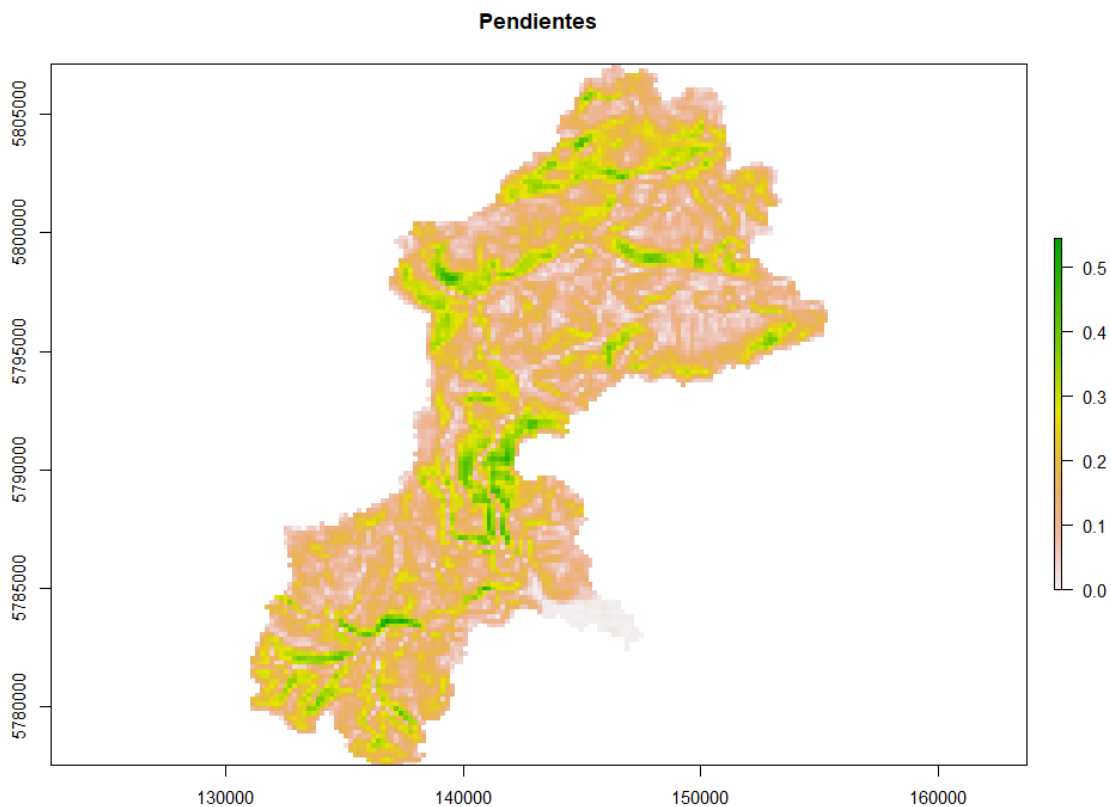


Figura 4.37. Distribución de pendientes en cuenca.

Utilizando la fórmula (51), se obtienen los valores de Curva Número descritos en la Figura 4.38. Desde dicha figura, se puede observar que la distribución del valor CN es de un valor relativamente alto y homogéneo sobre toda su superficie. Esto se debe a que:

- Las capas geológicas presentes en la cuenca están asociadas a una baja permeabilidad del suelo;
- Las categorías vegetales existentes están asociadas a una alta escorrentía;
- Las pendientes dentro de la cuenca son, en general, bajas, con la salvedad de ciertas regiones aisladas. No obstante, una alta variabilidad de la pendiente no implica, necesariamente, una alta variabilidad del parámetro CN [7].

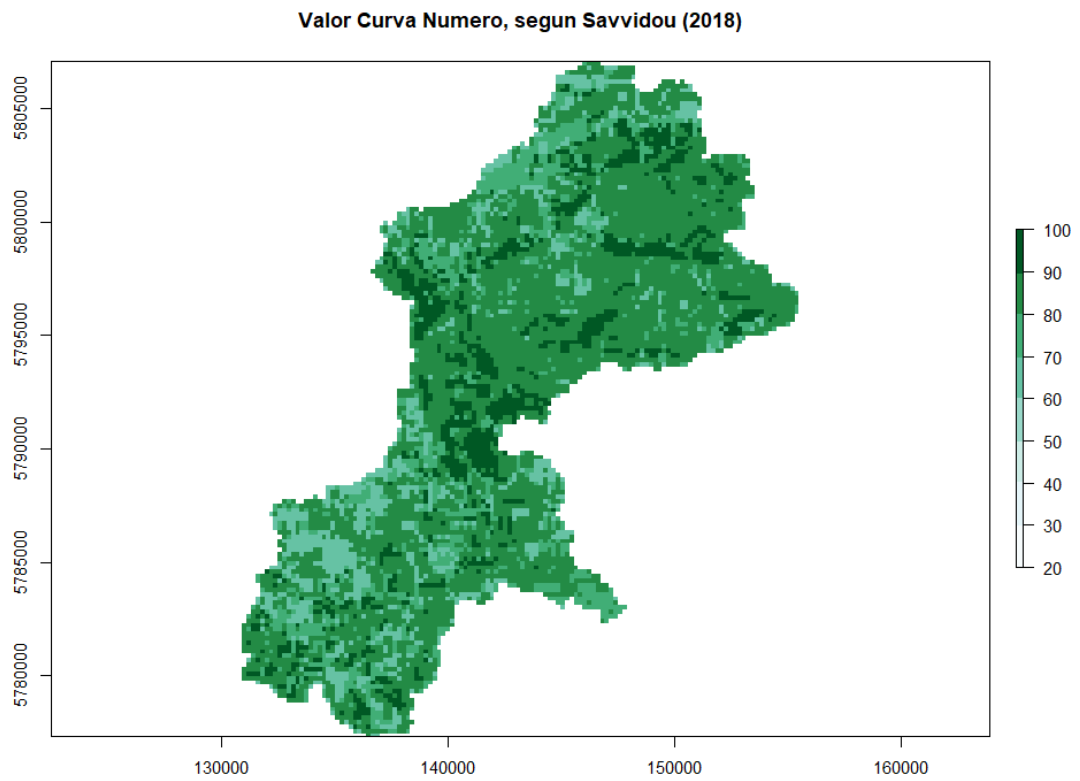


Figura 4.38. Distribución espacial del parámetro Curva Número (CN).

#### **4.5.3. Información meteorológica**

La distribución de la precipitación media anual sobre la cuenca se obtuvo por medio de la información disponible del Balance Hídrico Nacional [8]. Dado que la resolución del archivo NetCDF es considerablemente grande, se realiza un ajuste por medio de interpolación con Distancia Inversa Ponderada (IDW) [3], como muestra la Figura 4.39

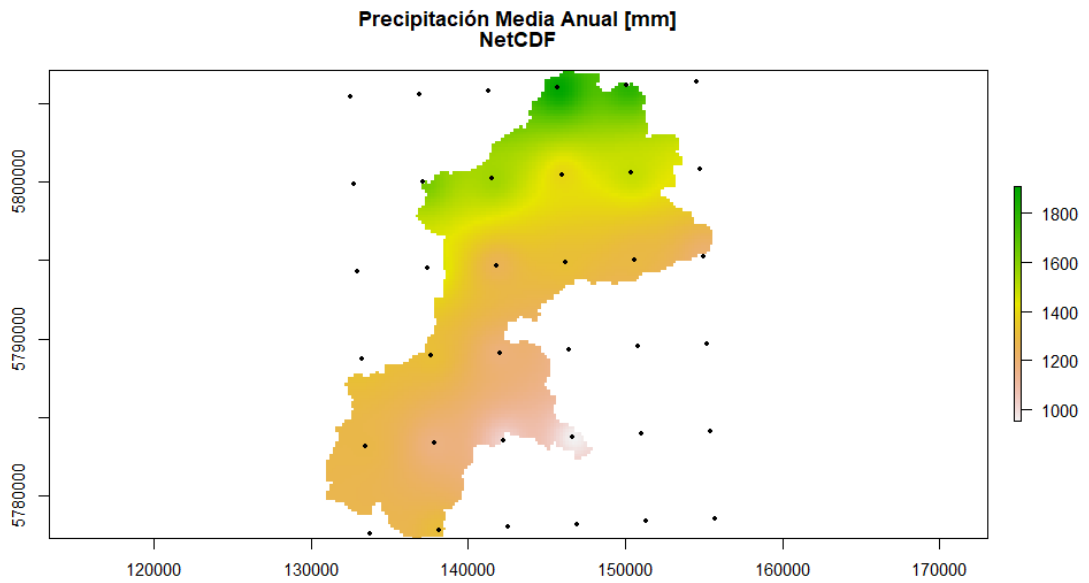


Figura 4.39. Distribución de precipitación media anual.

Similar con la zona de estudio N°1, se ajustan linealmente los valores con respecto a la variación de la cota dentro de la cuenca, de modo de incorporar un mayor grado de sensibilidad.

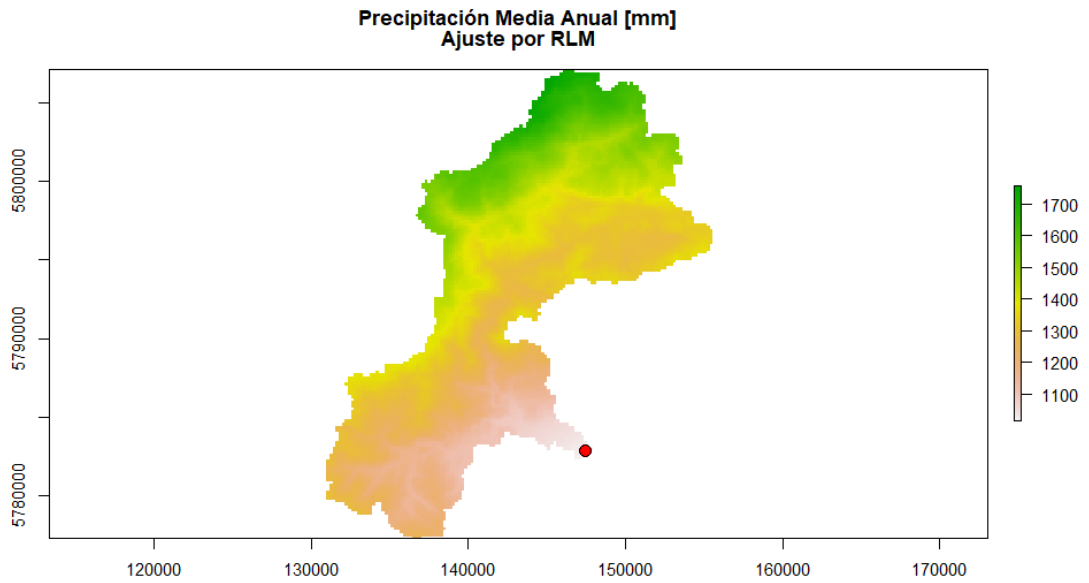


Figura 4.40. Distribución corregida de precipitación media anual.

De igual modo, se determina el promedio de temperaturas por medio del conjunto de datos NetCDF, para posteriormente realizar un ajuste lineal con respecto a la variación de las elevaciones en la cuenca.

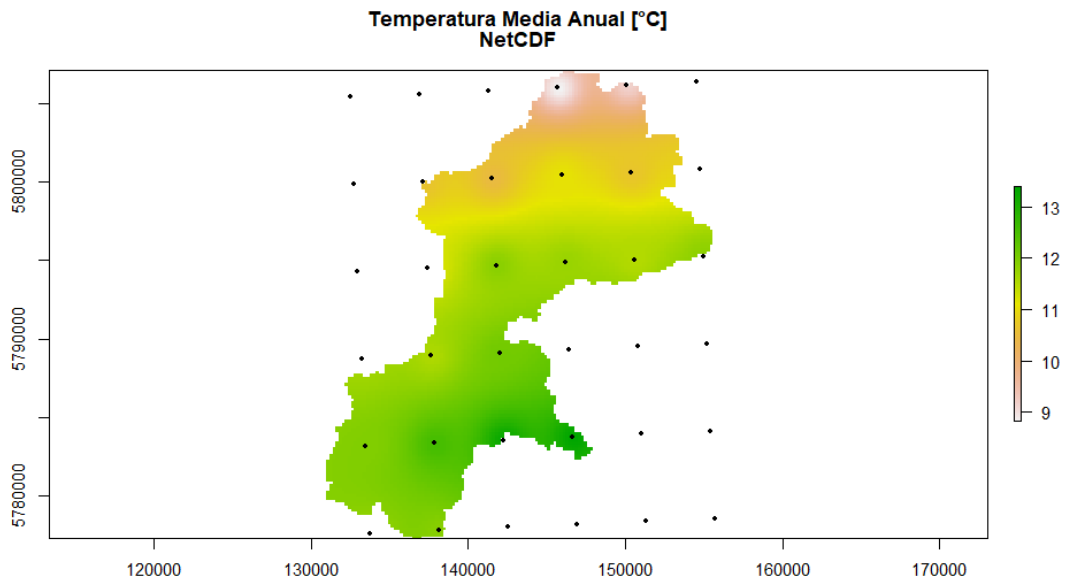


Figura 4.41. Distribución de temperatura media anual.

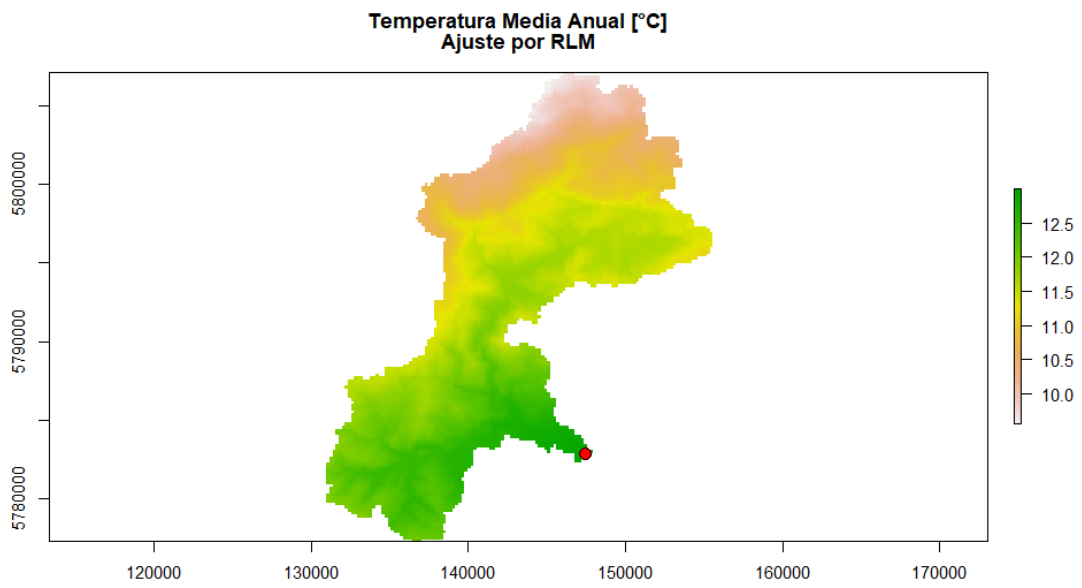


Figura 4.42. Distribución corregida de temperatura media anual.

## 4.6. Fenómenos meteorológicos de interés

### 4.6.1. Fenómeno de Mayo de 2019

La primera tormenta de interés es la observada entre los días 01 de Mayo del 2019 al 05 de Mayo del 2019. El hidrograma de crecida asociado a dicho fenómeno en la estación “Río Purén en Tranaman” se muestra en la Figura 4.43.

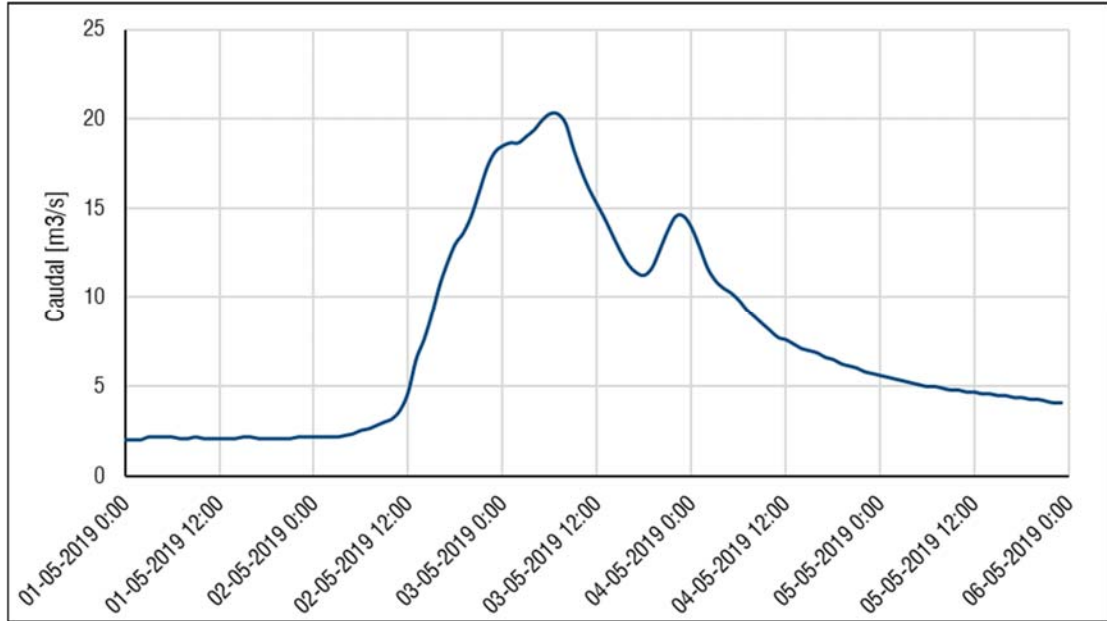


Figura 4.43. Hidrograma de crecida, estación “Río Purén en Tranaman”, evento de Mayo de 2019.

### 4.6.2. Fenómeno de Abril de 2018

La segunda tormenta de interés es la observada entre los días 10 de Abril del 2018 al 12 de Abril del 2018. El hidrograma de crecida asociado a dicho fenómeno en la estación se muestra en la Figura 4.44.

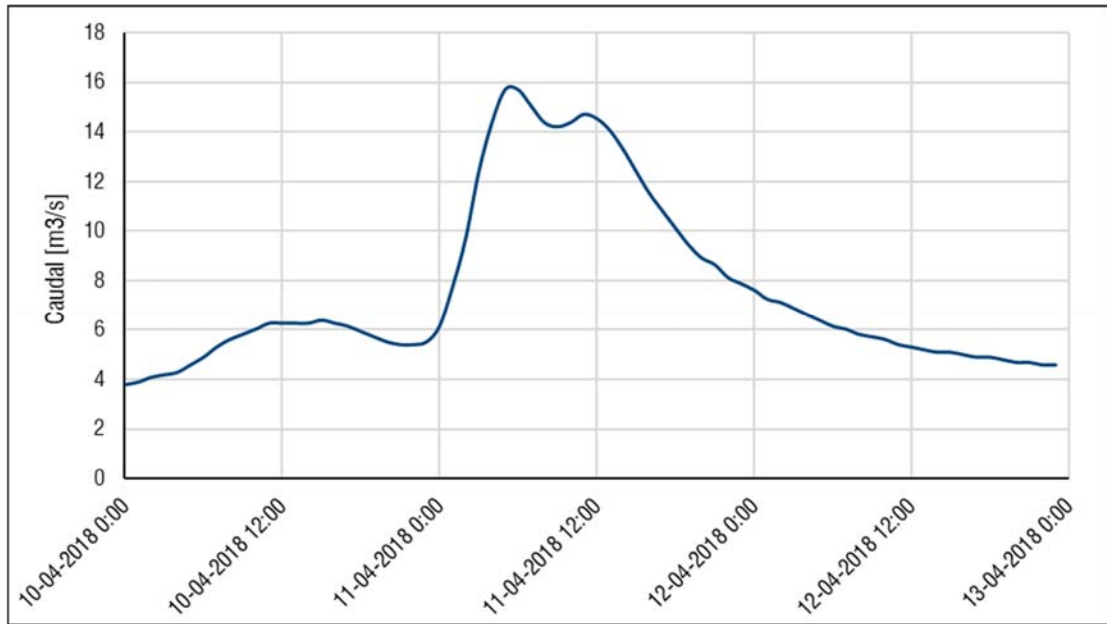


Figura 4.44. Hidrograma de crecida, estación "Río Purén en Tranaman", evento de Abril de 2018.

#### 4.6.3. Gestión de la información meteorológica a nivel local, evento de Mayo de 2019

Cabe indicar, que no se cuenta con información de carácter meteorológico (precipitación y temperatura) a nivel horario sobre la misma estación, por lo que es necesario recurrir a las estaciones meteorológicas aledañas, provenientes desde la Red Agroclimática Nacional (Agromet) [37] (disponibles a nivel horario), que se muestran en la Figura 4.45. Desde este conjunto, se tiene que la estación Agromet "La Isla", se encuentra en las cercanías de la estación fluviométrica "Río Purén en Tranaman", por lo que se considera aceptable tomar como referencia dicha estación. Por otra parte, dado que se trata de una cuenca cercana a la costa, la cual no está afectada por la geografía (Cordillera de la Costa) o por efectos de tipo nival, se desprecia la variabilidad de la temperatura dentro de la cuenca, por lo que se descarta del análisis.

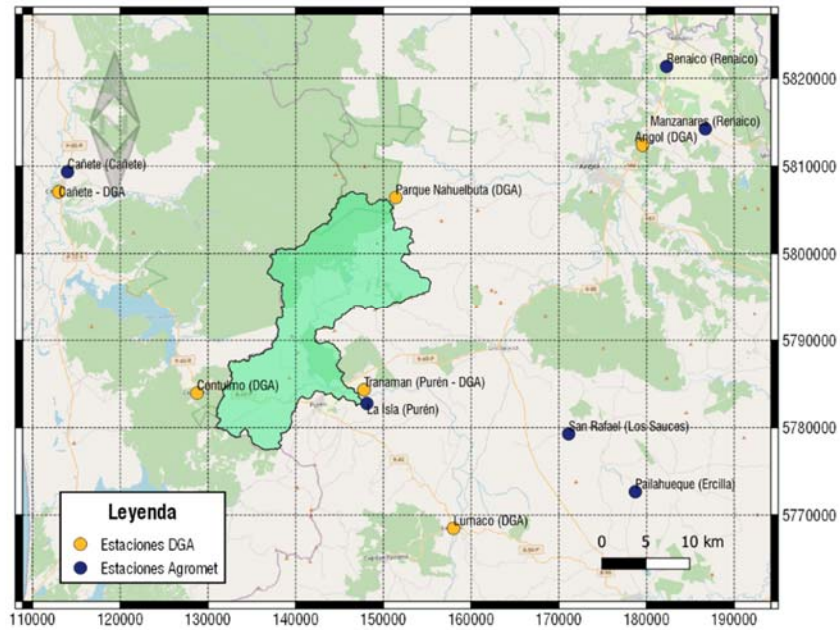


Figura 4.45. Ubicación de estaciones meteorológicas de Agromet y DGA.

Considerando sólo dicha estación, se tiene el hietograma de precipitaciones para el evento de Mayo de 2019.

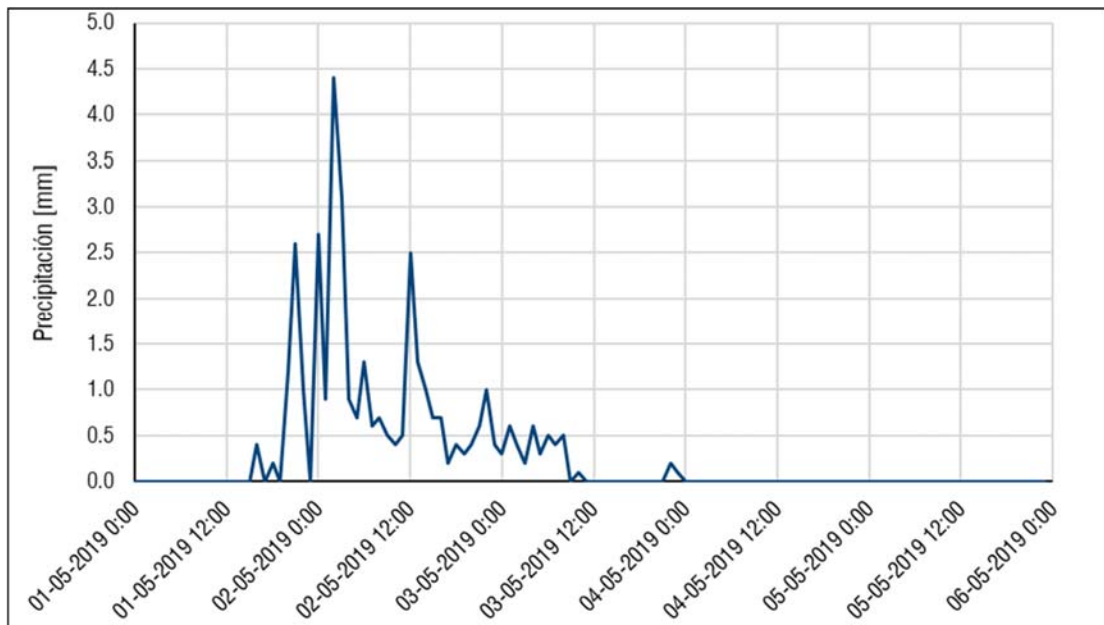


Figura 4.46. Hietograma de Precipitación, estación “La Isla – Agromet”, evento de Mayo de 2019.

Por su parte, las precipitaciones registradas a nivel diario en las tres estaciones DGA cercanas se muestran en la Tabla 4.8.

Tabla 4.8. Valores de precipitación a nivel diario, estaciones DGA, evento de Mayo de 2019.

	Estaciones		
	Tranaman	Contulmo	Parque Nahuelbuta
Valor	Pp	Pp	Pp
01-05-2019	0.00	12.00	50.00
02-05-2019	30.20	18.00	25.00
03-05-2019	20.90	24.00	0.00
04-05-2019	8.60	8.00	0.00
05-05-2019	0.00	0.00	0.00

#### 4.6.4. Gestión de la información meteorológica a nivel local, evento de Abril de 2018

De manera análoga al evento de Mayo de 2019, se obtiene el hietograma de precipitaciones de la estación Agromet “La Isla” para el evento de precipitaciones de Abril de 2018.

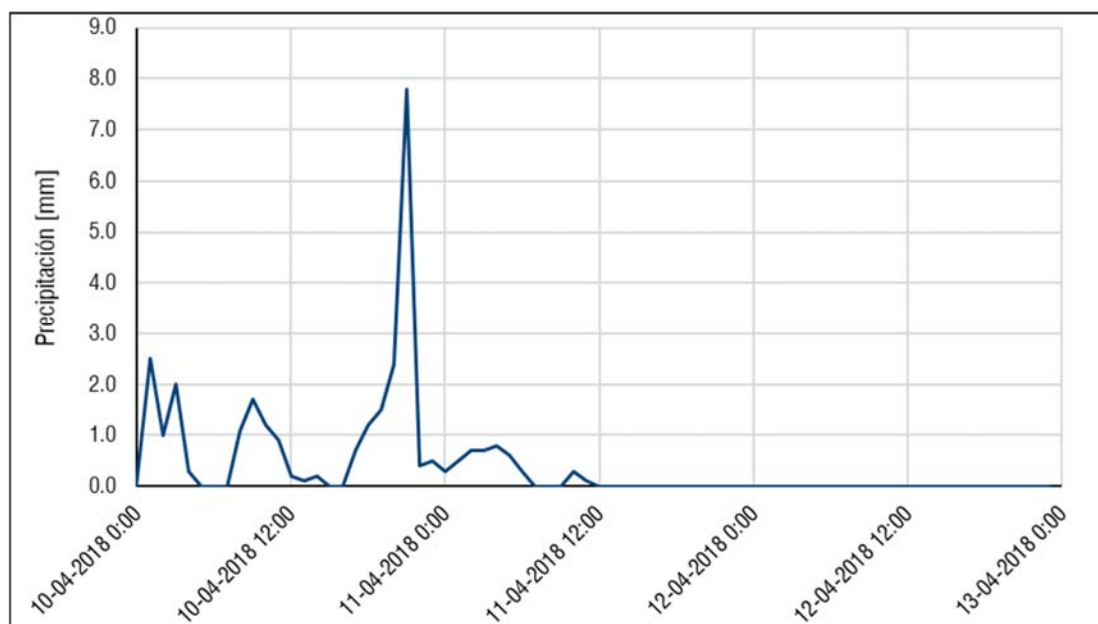


Figura 4.47. Hietograma de Precipitación, estación “La Isla – Agromet”, evento de Abril de 2018.

De igual modo, las precipitaciones a nivel diario registradas en las estaciones DGA cercanas a la cuenca se muestran en la Tabla 4.9.

Tabla 4.9. Valores de precipitación a nivel diario, estaciones DGA, evento de Abril de 2018.

	Estaciones		
	Tranamán	Contulmo	Parque Nahuelbuta
Valor	Pp	Pp	Pp
10-04-2018	31.40	22.00	51.00
11-04-2018	2.20	0.00	0.00
12-04-2018	0.10	0.00	0.00

#### 4.7. Consideraciones adicionales para el análisis

Para un correcto delineamiento de las HRU, así como una buena implementación del modelo, se establecen las siguientes consideraciones:

1. Las variables meteorológicas asociadas al Análisis de Componentes Principales (PCA) estarán asociadas al trimestre móvil Abril-Junio.
2. Para determinar el área pluvial efectiva, se establece una temperatura media mínima, la cual corresponde a la temperatura media diaria tal, que la temperatura mínima diaria asociada es de 0 [°C]. Dicho valor se obtiene restando a la temperatura media trimestral, la temperatura mínima media trimestral. Para la cuenca del Estero Pocuro, este valor corresponde a 5,52 [°C], mientras que, para la cuenca del Río Purén, corresponde 4,46[°C]. Para este último caso, dado que el menor valor de la temperatura media trimestral es mayor al umbral, se considera como área pluvial efectiva a la totalidad de la cuenca.

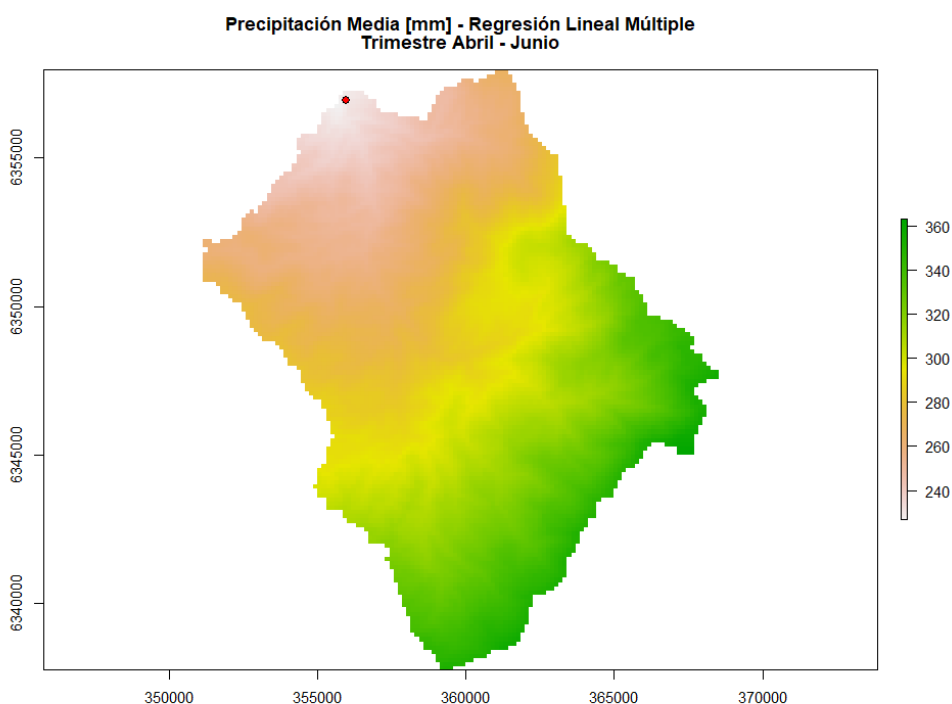


Figura 4.48. Distribución de Precipitación Media a nivel Trimestral, Estero Pocuro.

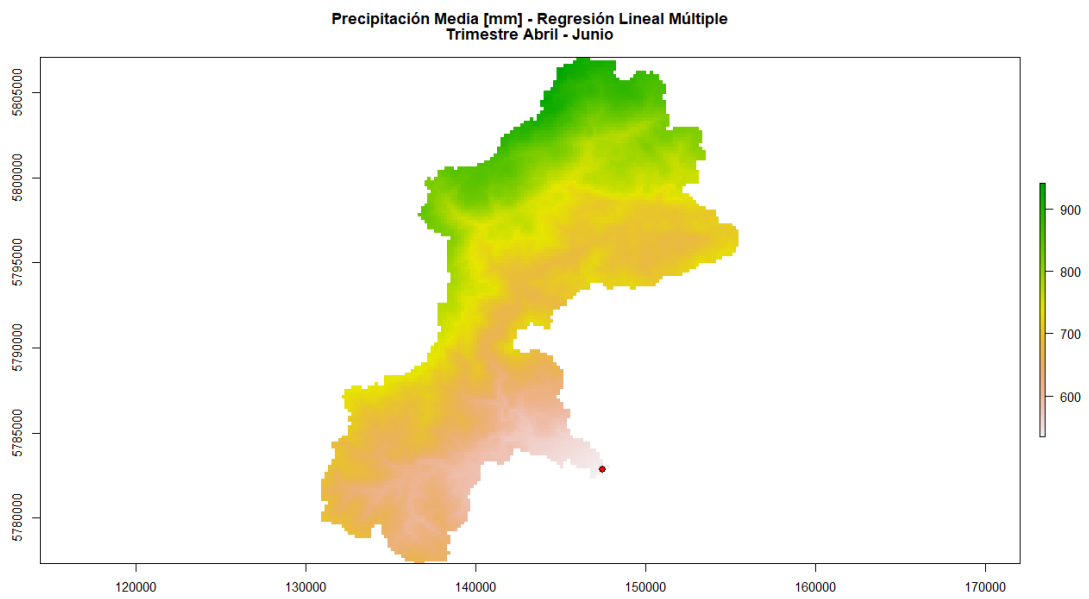


Figura 4.49. Distribución de Precipitación Media a nivel Trimestral, Río Purén.

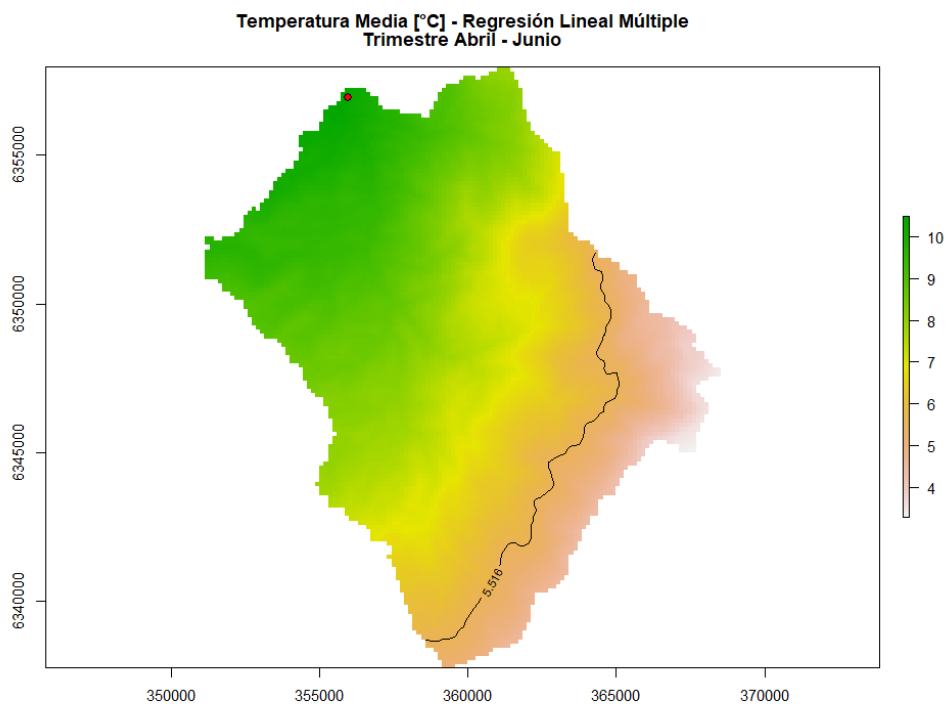


Figura 4.50. Distribución de Temperatura Media a nivel Trimestral, Estero Pocuro.

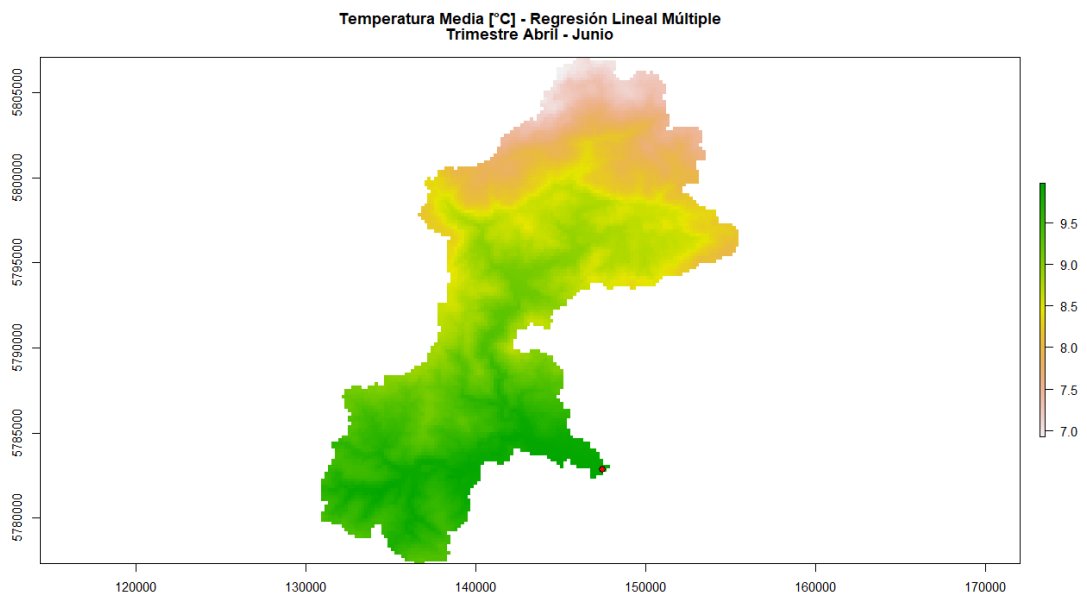


Figura 4.51. Distribución de Temperatura Media a nivel Trimestral, Río Purén.

## CAPÍTULO V

### 5. Modelación hidrológica

Para probar los resultados de la metodología propuesta, se implementarán en HEC-HMS un conjunto de escenarios para ambas cuencas. El escenario principal corresponde a la descomposición de las cuencas en un número óptimo de HRU (ver Sección 3.4.2), mientras que en los demás restantes escenarios, el número de unidades de respuesta difieren.

#### 5.1. Construcción del modelo principal (Pocuro)

Las variables a considerar dentro del proceso de delineamiento de HRU (Curva Número, tiempo de concentración, Precipitación y Temperatura a nivel Trimestral), y su distribución sobre la superficie de la cuenca se muestran en la Figura 5.1. En este punto del análisis, se descarta la región dentro de la cuenca que tenga una temperatura media trimestral menor o igual a 5,52 [°C].

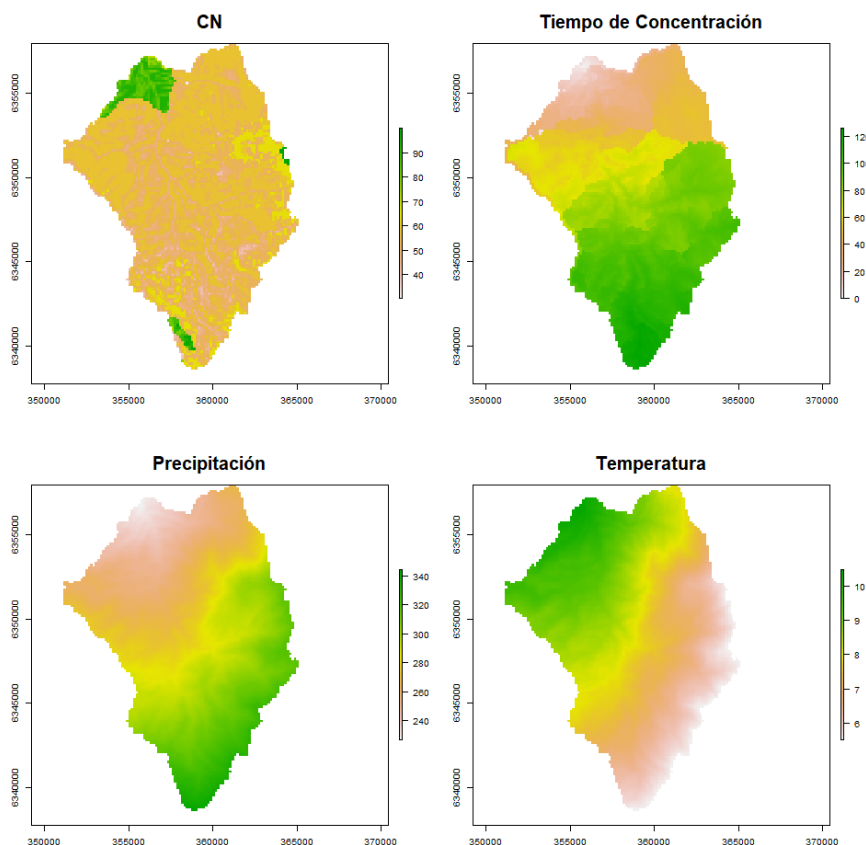


Figura 5.1. Mapa de parámetros cubriendo la cuenca del Estero Pocuro.

Por su parte, la correlación espacial entre las variables se muestra en la Figura 5.2. En dicho gráfico, los círculos de mayor tamaño y mayor color implican mayor correlación, ya sea positiva (en azul) o negativa (en rojo). El tiempo de concentración dentro de la cuenca aparece fuertemente correlacionado positivamente con la precipitación; mientras que está negativamente correlacionado

con la temperatura. Por su parte, la precipitación está negativamente correlacionada con la temperatura, lo cual se explica debido al hecho que la precipitación es más fuerte en zonas con temperaturas más bajas [2, 3]. Finalmente, el parámetro de Curva Número no está correlacionado fuertemente con ninguna de las demás variables.

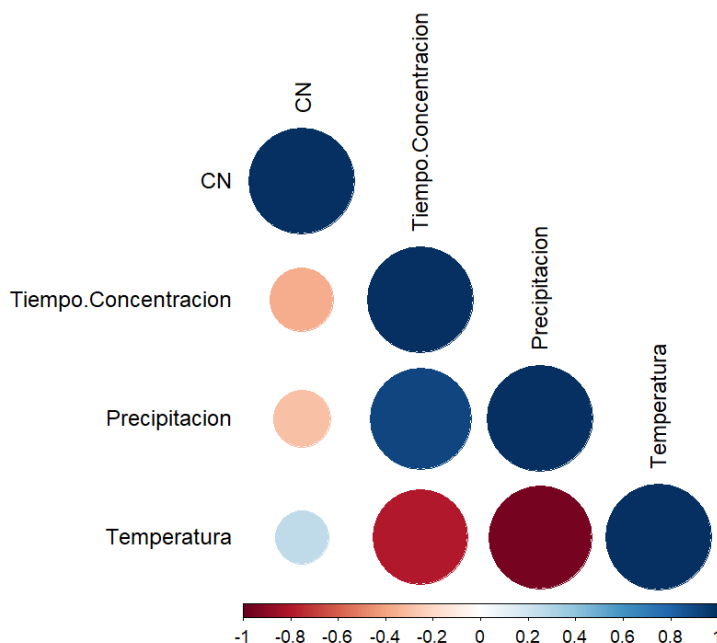


Figura 5.2. Gráfico de correlación entre variables.

### 5.1.2. Análisis de PCA sobre la cuenca

Se realiza el análisis de componentes principales (PCA) sobre el conjunto de variables hidrológicas (CN, tiempo de concentración) y meteorológicas (precipitación, temperatura), asignando para todas estas variables, el mismo peso. El primer resultado a destacar muestra que las primeras dos dimensiones resultantes del PCA concentran el 94,68% de la varianza total del conjunto de datos. La Tabla 5.1 muestra la varianza del conjunto de datos asociado a cada dimensión, y la contribución de cada variable a cada una de las dimensiones.

La primera dimensión (73% de la varianza total) está compuesta por las contribuciones de las variables meteorológicas y el tiempo de concentración. Por su parte, la segunda dimensión (alrededor del 20% de la varianza total), está compuesta casi en su totalidad por el parámetro Curva Número. Es importante señalar que las mayores contribuciones de las variables meteorológicas se asocian a las dimensiones con menor aporte a la varianza total.

La Figura 5.3 muestra la proyección de las variables sobre las primeras dos dimensiones, y a su vez, muestra cómo las variables contribuyen en términos de magnitudes y direcciones. Las primeras dos dimensiones del análisis expresan el 94% de la variabilidad total del conjunto de datos. Dicho porcentaje es muy alto, y, en consecuencia, el plano formado representa casi la totalidad de la variabilidad de datos. Desde dicho plano, se infiere que la precipitación y temperatura realizan grandes contribuciones a la primera dimensión, pero están negativamente correlacionadas, mientras que el parámetro Curva Número es el que hace la mayor contribución a la segunda dimensión. La información obtenida desde el PCA corrobora lo indicado por las correlaciones entre las variables (Figura 5.2), pudiendo sintetizar de modo satisfactorio la variabilidad de datos

Tabla 5.1. Resumen de datos del Análisis de Componentes Principales para todo el conjunto de dimensiones y variables.

	Dim 1	Dim 2	Dim 3	Dim 4
Varianza [%]	73,07	21,61	4,86	0,46
<i>Variables</i>	Contribución a cada dimensión [%]			
CN	7,04	91,55	1,35	0,06
T. Concentración	30,26	0,27	57,37	12,1
Precipitación	32,75	3,46	0,39	63,4
Temperatura	29,95	4,72	40,88	24,45

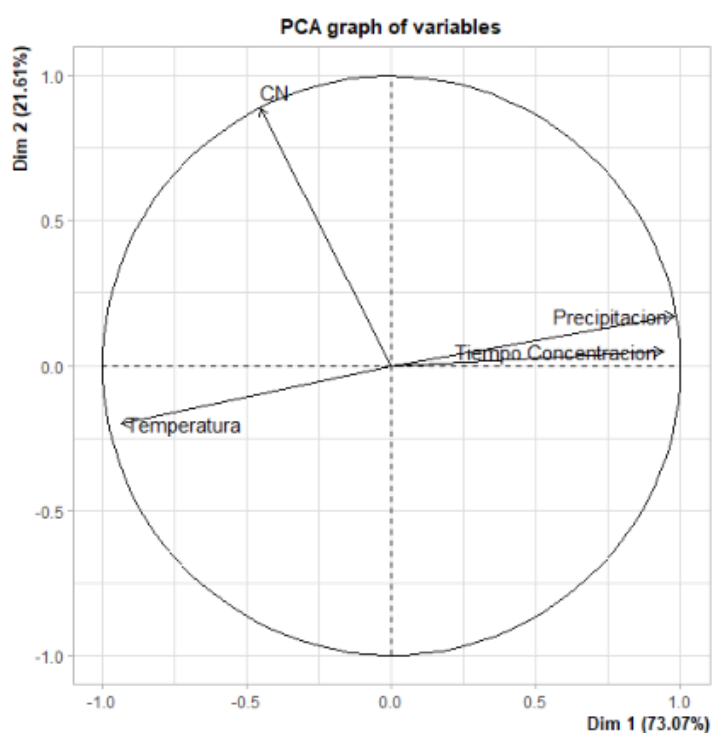


Figura 5.3. Variables utilizadas para realizar el Análisis de Componentes Principales, graficados sobre las primeras dos dimensiones.

Una vez realizado el PCA, se determina el número óptimo de HRU, o, en términos estadísticos, clusters. Dicho número se define por medio del índice de silueta, el cual se basa en la diferencia de varianzas internas y entre clusters [10]. Realizado dicho proceso, para un número de clusters entre 2 y 10, se obtienen los resultados de la Figura 5.4, donde el mayor índice de silueta se obtiene con tres clusters. Esta cantidad representa, matemáticamente, la cantidad óptima de HRU.

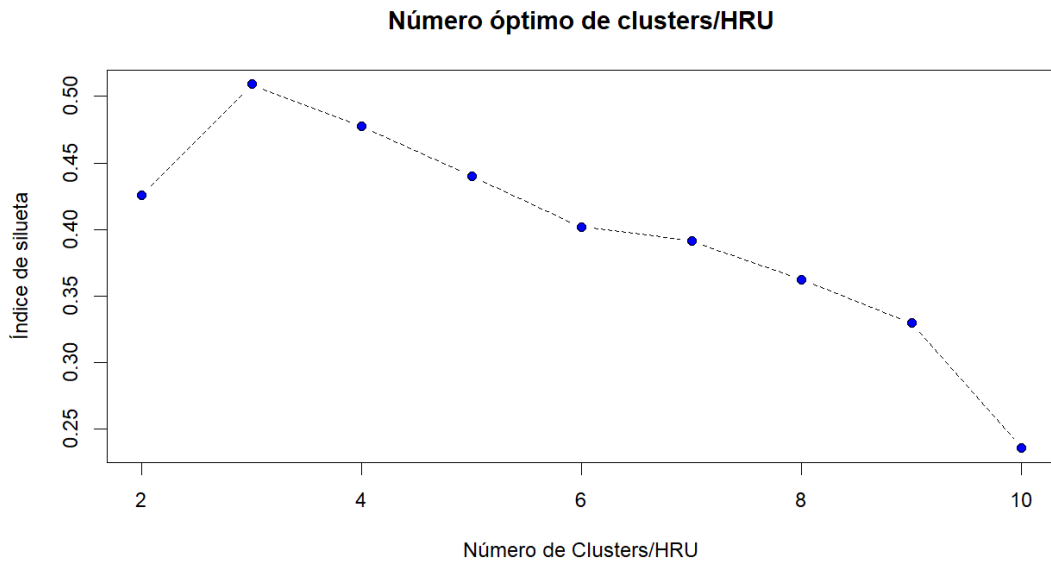


Figura 5.4. Número de clusters en función del índice de silueta.

### 5.1.3. Composición de las HRU en la cuenca

Una vez determinado el número óptimo de HRU en la cuenca, se procede a crear los clusters, de acuerdo al método señalado en la Sección 3.4.2. Los resultados de dicho proceso se muestran en la Figura 5.5.

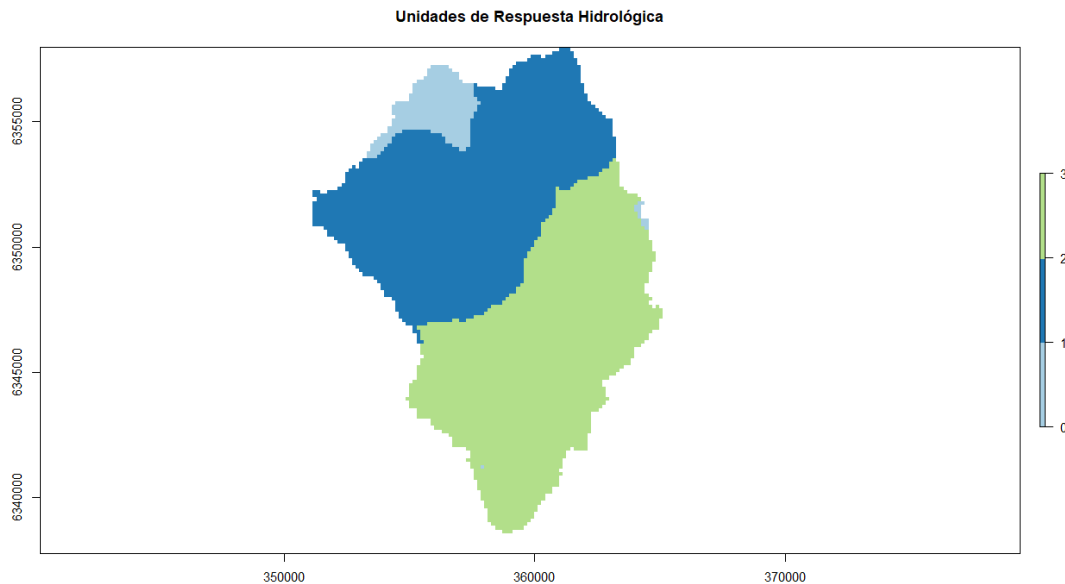


Figura 5.5. Representación de Unidades de Respuesta Hidrológica de la cuenca del Estero Pocuro.

De dicha figura se pueden describir tres regiones claramente definidas: la primera región, asociada al HRU N°1, se concentra en la parte baja de la cuenca, con la salvedad de una pequeña región en

la zona alta, la segunda región, asociada al HRU N°2, comprende la parte baja y media de la cuenca, mientras que la tercera región, asociada al HRU N°3 comprende las zonas altas de la cuenca.

#### 5.1.4. Descripción de los elementos dentro del modelo hidrológico

La descripción de cada uno de los HRU en términos de sus variables, se muestra en la Figura 5.6. Desde dichos gráficos se puede inferir que cada HRU posee rangos de características propias, y que, en términos de las variables meteorológicas, están bien definidos, con la salvedad del HRU N°1 (el cual posee una región en la parte alta de la cuenca). El HRU N°1 corresponde a la parte baja de la cuenca, cuyo valor de CN es alto en comparación con el resto de la cuenca. Por otra parte, los HRU N°2 y N°3 representan a las partes media y alta de la cuenca, respectivamente, con valores de CN relativamente bajos, salvo por una zona dentro del HRU N°3 (ver Figura 5.1).

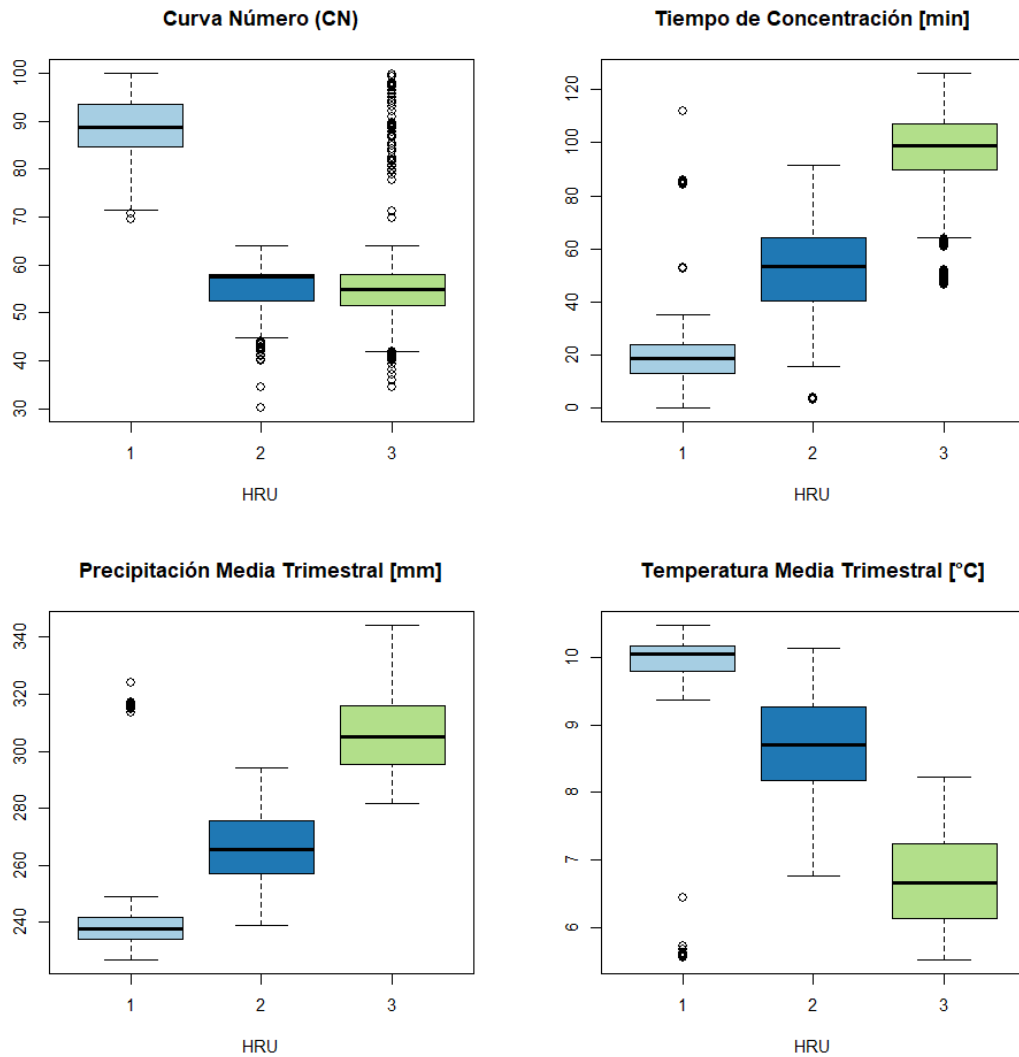


Figura 5.6. Descripción de HRU por medio de Gráficos de caja.

## 5.2. Modelos comparativos (Pocuro)

A modo de establecer una comparación, se plantean dentro del análisis, paralelamente, tres modelos hidrológicos, los cuales se describen a continuación.

### 5.2.1. Modelo integrado

Este modelo (también llamado Modelo Agregado) se basa en describir la cuenca como un elemento único [1, 2, 4], donde cada uno de los parámetros asociados a ella se definen por medio del promedio de la cuenca. Con estas consideraciones, se obtienen los valores tipo para el modelo integrado de la cuenca.

Tabla 5.2. Parámetros de Modelo Integrado.

Área [km <sup>2</sup> ]	153,76
CN Medio	56,94
Tiempo de concentración [min]	73,22
Prec. Media Trimestral [mm]	284,34
Temp. Media Trimestral [°C]	7,79

### 5.2.2. Modelos semi distribuidos

En este caso, se procederá a delinear dos modelos semi distribuidos sobre la cuenca, por medio del método de agrupamiento jerárquico de componentes principales (HCPC) [10, 9]. Este método es el mismo que se utiliza para delinear las HRU en la sección 5.1. En este caso, se delinearán dos modelos con distintos números de HRU: un primer caso con una unidad menos que el número óptimo de HRU, mientras que el segundo caso considera una unidad más que el número óptimo.

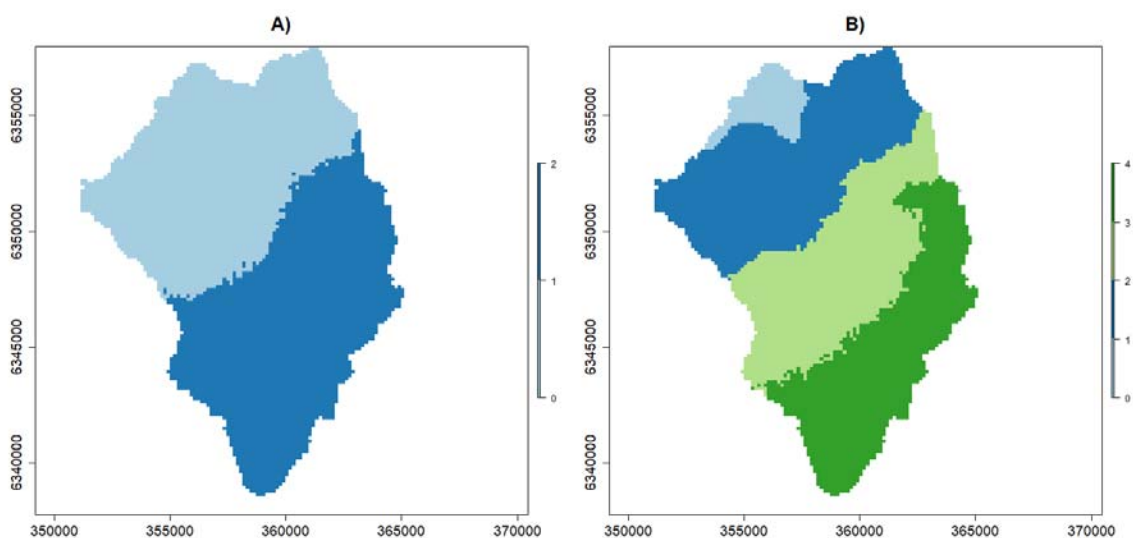


Figura 5.7. Representación de la cuenca del Estero Pocuro por medio de: A) 2 HRU; B) 4 HRU.

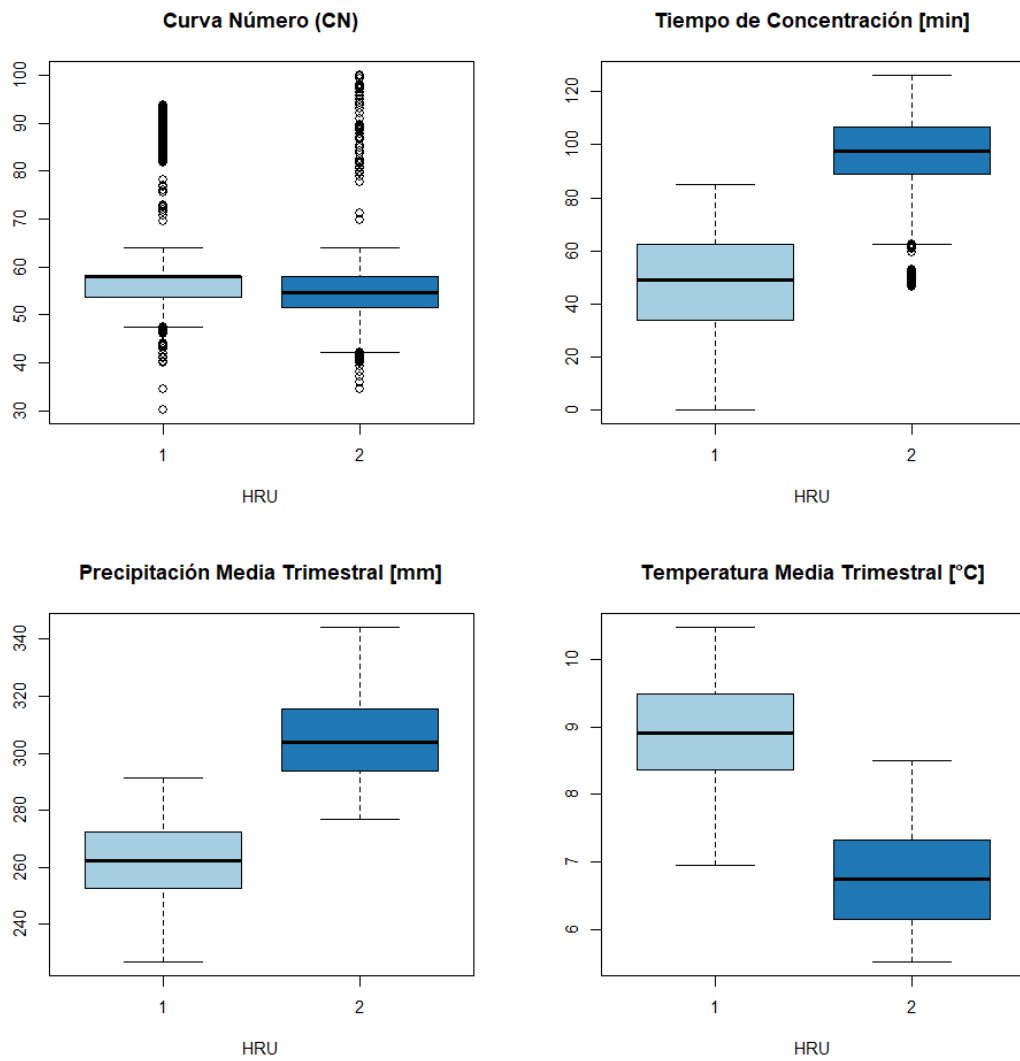


Figura 5.8. Descripción de modelo de 2 HRU por medio de gráficos de caja.

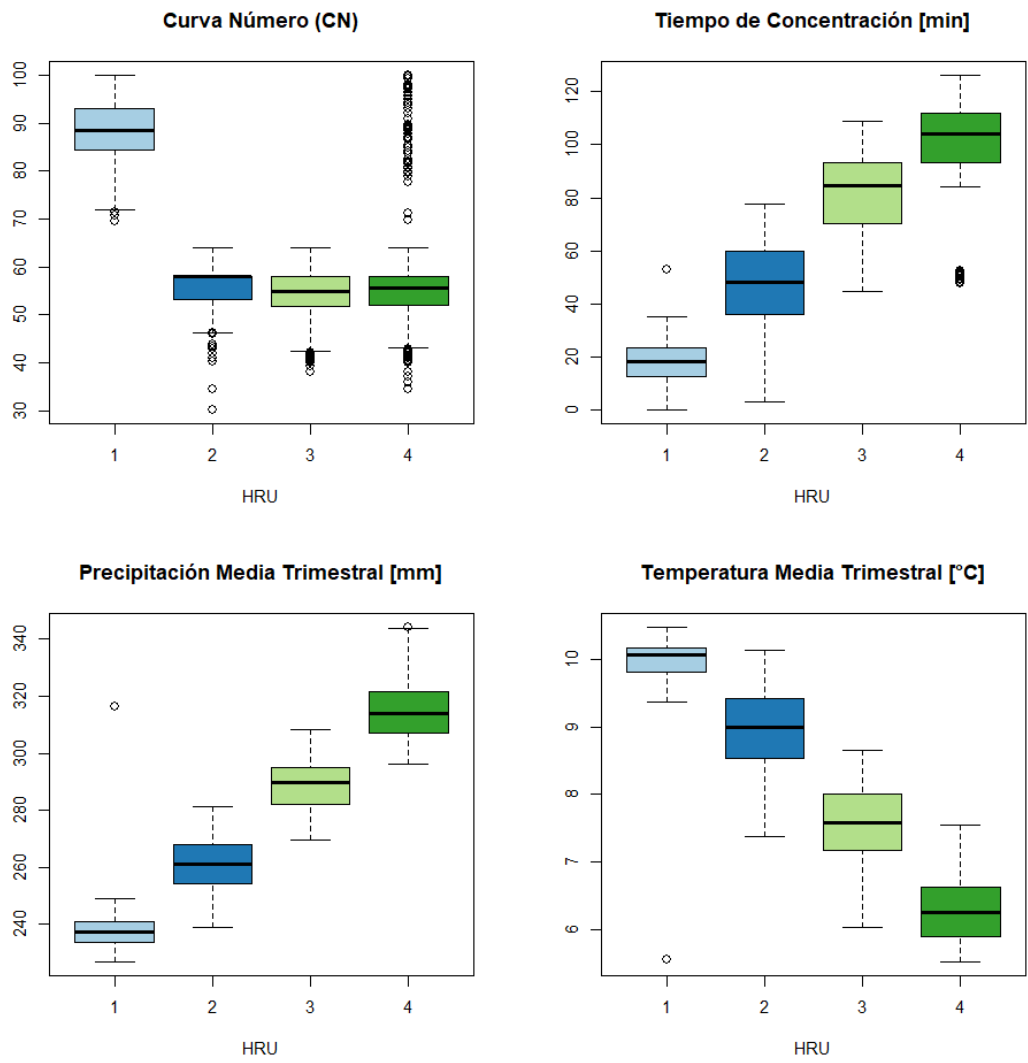


Figura 5.9. Descripción de modelo de 4 HRU por medio de gráficos de caja.

### 5.3. Construcción del modelo principal (Purén)

Las variables a considerar dentro del proceso de delineamiento de HRU (Curva Número, tiempo de concentración, Precipitación y Temperatura a nivel Trimestral), y su distribución sobre la superficie de la cuenca se muestran en la Figura 5.10. En este punto del análisis, se descarta la región dentro de la cuenca que tenga una temperatura media trimestral menor o igual a 4.46 [°C].

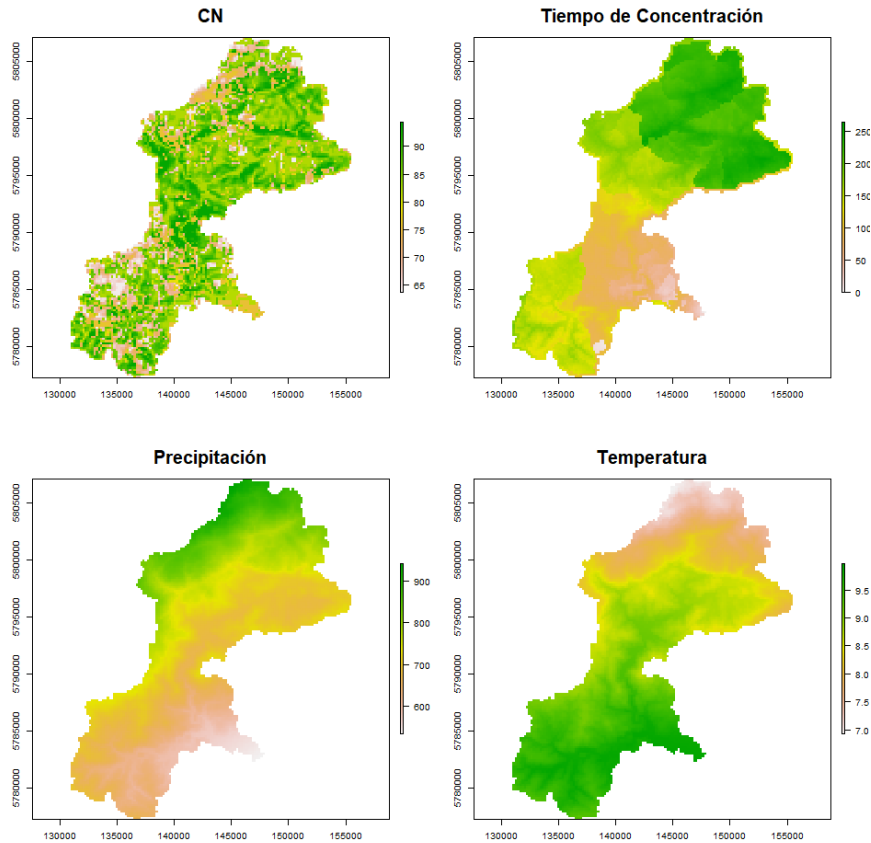


Figura 5.10. Mapa de parámetros cubriendo la cuenca del Río Purén.

Por su parte, la correlación espacial entre las variables se muestra en la Figura 5.11. Desde dicha figura, se tiene que la variable de tiempo de concentración tiene una alta correlación positiva con respecto a la distribución de precipitación, y una alta correlación negativa con respecto a la distribución de temperatura dentro de la cuenca. Por su parte, el parámetro de Curva Número (CN) no tiene una correlación significativa con las demás variables.

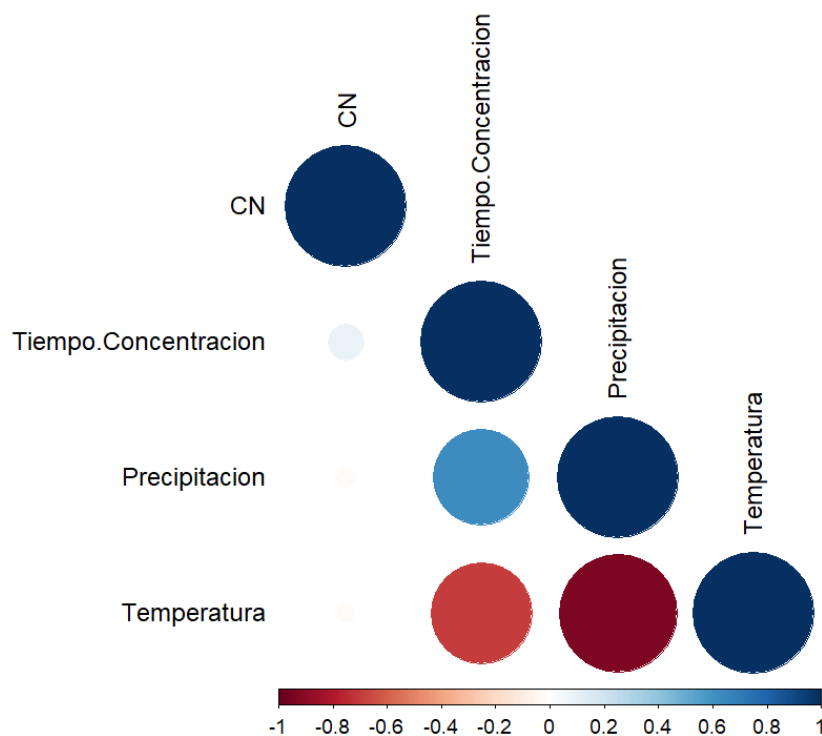


Figura 5.11. Gráfico de correlación entre variables.

### 5.3.2. Análisis de PCA sobre la cuenca

Se realiza el análisis de componentes principales (PCA) sobre el conjunto de variables hidrológicas (CN, tiempo de concentración) y meteorológicas (precipitación, temperatura), asignando para todas estas variables, el mismo peso. El primer resultado a destacar muestra que las primeras dos dimensiones resultantes del PCA concentran el 88% de la varianza total del conjunto de datos, por lo que la representación de la variabilidad del conjunto de datos es aceptable.

A partir de la información recopilada en la Tabla 5.3, se tiene que, en la primera dimensión, las variables de precipitación y temperatura realizan aportes similares, pero en direcciones opuestas. Por su parte, la variable del CN concentra casi la totalidad de los aportes que se realizan sobre la segunda dimensión.

Tabla 5.3. Resumen de datos del Análisis de Componentes Principales para todo el conjunto de dimensiones y variables.

	Dim 1	Dim 2	Dim 3	Dim 4
Varianza [%]	62,89	25,28	10,48	1,35
<i>Variables</i>	Contribución a cada dimensión [%]			
CN	0,1	97,81	2,01	0,08
T. Concentración	27,59	1,01	70,4	~1
Precipitación	35,18	1,02	19,27	44,54
Temperatura	37,33	0,16	8,33	54,38

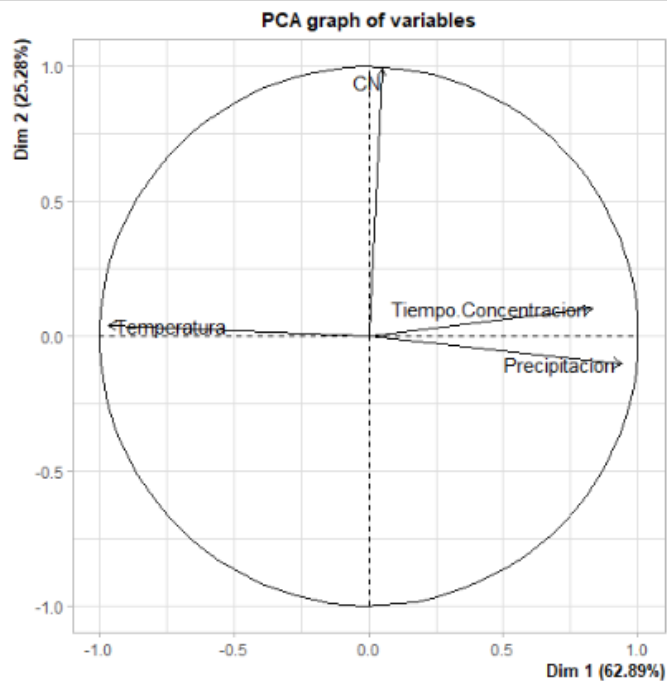


Figura 5.12. Variables utilizadas para realizar el Análisis de Componentes Principales, graficados sobre las primeras dos dimensiones.

Una vez realizado el PCA, se determina el número óptimo de HRU, o, en términos estadísticos, clusters. Dicho número se define por medio del índice de silueta, el cual se basa en la diferencia de varianzas internas y entre clusters [10]. Para un rango entre 2 y 10 clústers, el óptimo se alcanza con sólo 2 Unidades de Respuesta. Este valor tiene sentido, considerando que la variabilidad del parámetro CN sobre la cuenca es relativamente baja, así como la correlación entre las demás variables es fuerte. Cabe destacar la existencia de un segundo "peak" del índice de silueta cuando se simulan con 7 Unidades de Respuesta, el cual será analizado en más detalle en la Sección 6.1.

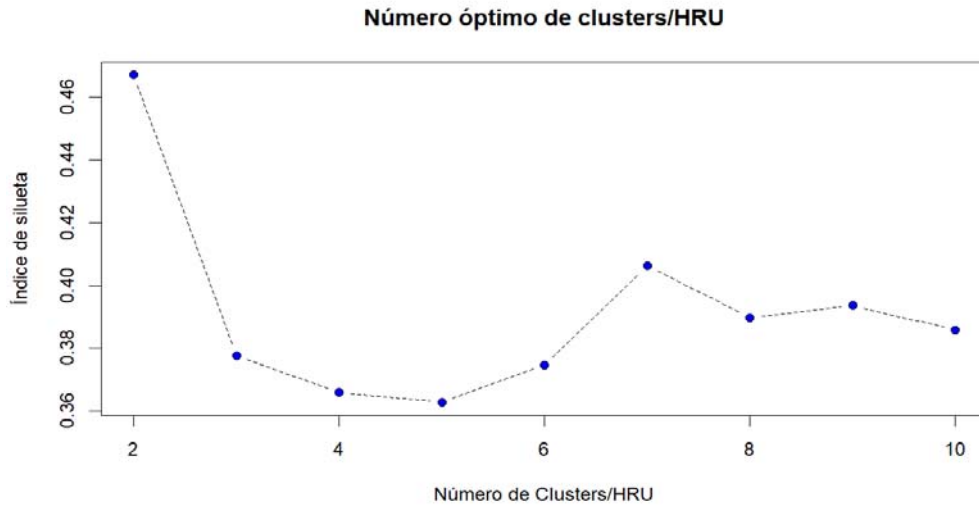


Figura 5.13. Número de clusters en función del índice de silueta.

### 5.3.3. Composición de las HRU en la cuenca

Una vez determinado el número óptimo de HRU en la cuenca, se procede a crear los clusters, de acuerdo al método señalado en la Sección 3.4.2. Los resultados de dicho proceso se muestran en la Figura 5.14. En este se tienen definidas claramente dos regiones, asociadas tanto la distribución del tiempo de concentración, como de las variables meteorológicas.

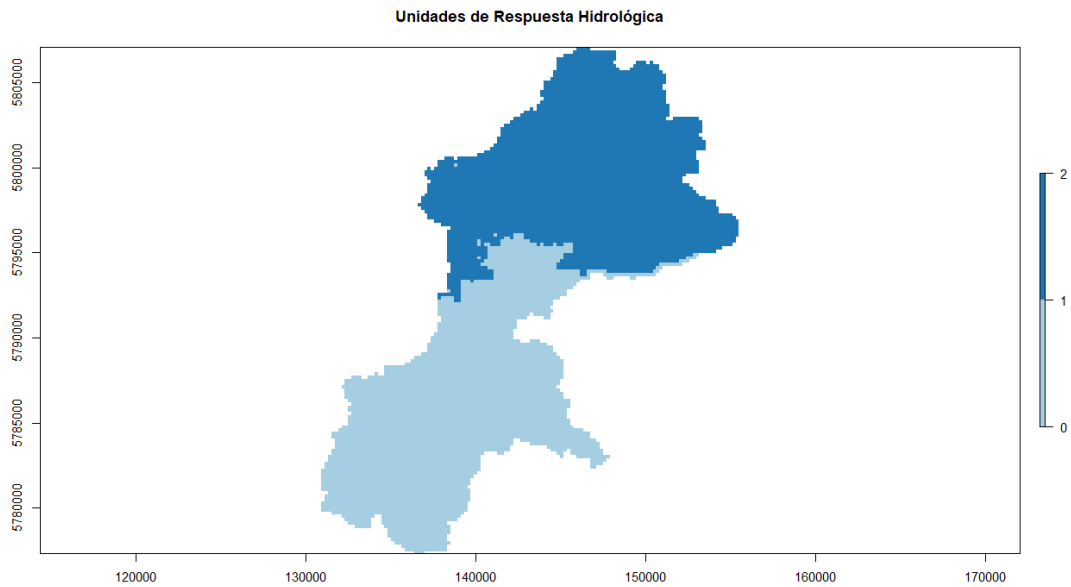


Figura 5.14. Representación de Unidades de Respuesta Hidrológica de la cuenca del Río Purén.

### 5.3.4. Descripción de los elementos dentro del modelo hidrológico

La descripción de cada uno de los HRU en términos de las variables que los definen se muestra en la Figura 5.15. Desde este gráfico se indica, que si bien ambos HRU están bien definidos en términos de las variables meteorológicas y del tiempo de concentración, comparten el mismo rango de valores para el parámetro de CN, con una alta dispersión en el HRU N°2. Esto se debe, a que el valor de CN sobre la cuenca es relativamente homogéneo .

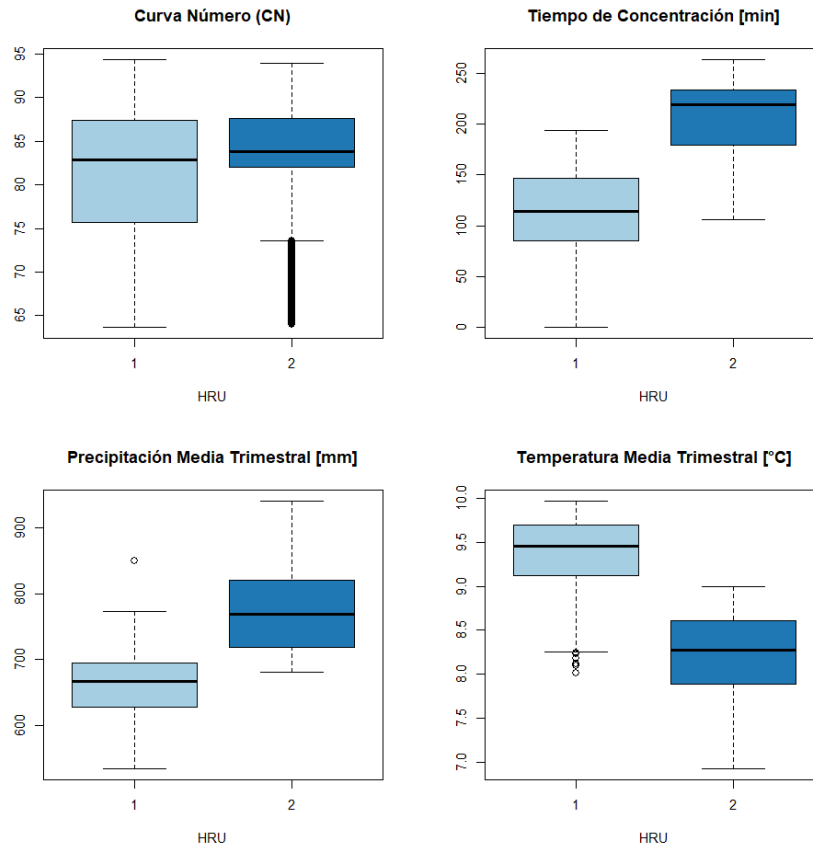


Figura 5.15. Descripción de HRU por medio de Gráficos de caja.

## 5.4. Modelos comparativos (Purén)

A modo de establecer una comparación, se plantean dentro del análisis, paralelamente, dos modelos hidrológicos, los cuales se describen a continuación.

### 5.4.1. Modelo integrado

Este modelo describe a la cuenca como un elemento único [1, 2, 4], donde cada uno de los parámetros asociados a ella se definen por medio del promedio total de la cuenca. Con estas consideraciones, se obtienen los valores tipo para el modelo integrado de la cuenca.

Tabla 5.4. Parámetros de Modelo Integrado.

Área [km <sup>2</sup> ]	294,99
CN Medio	81,91
Tiempo de concentración [min]	161,01
Prec. Media Trimestral [mm]	718,63
Temp. Media Trimestral [°C]	8,8

#### 5.4.2. Modelo semi-distribuido

Se delinea un modelo semi-distribuido por medio de las herramientas de agrupamiento jerárquico de componentes principales (HCPC) [9]. Dado que el número óptimo de clusters corresponde al mínimo admisible, sólo se delinearán un modelo con una unidad más.

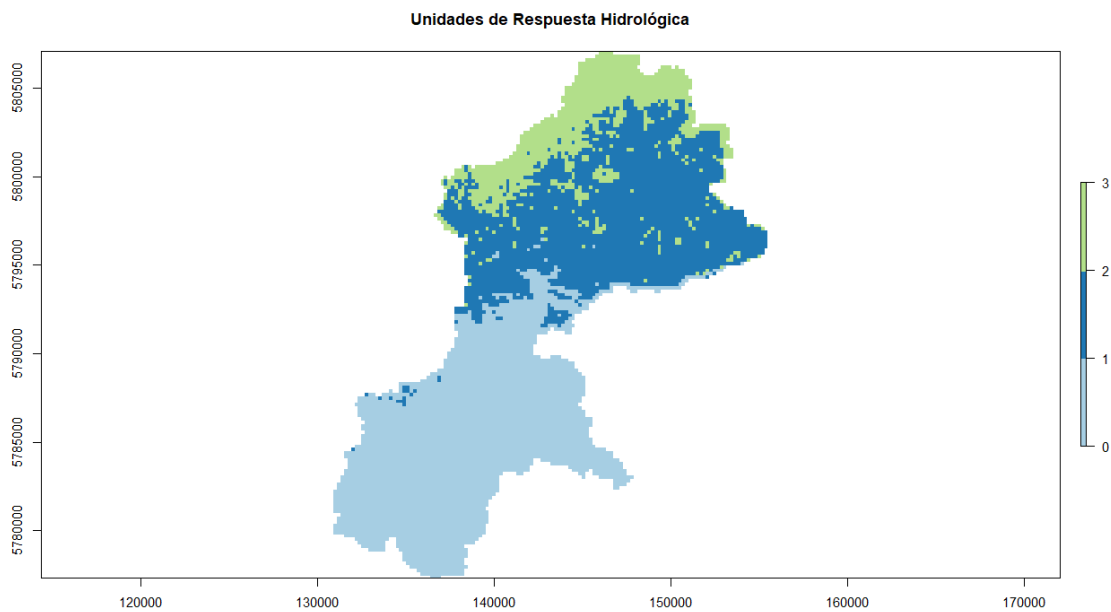


Figura 5.16. Representación de la cuenca del Río Purén por medio de 3 HRU.

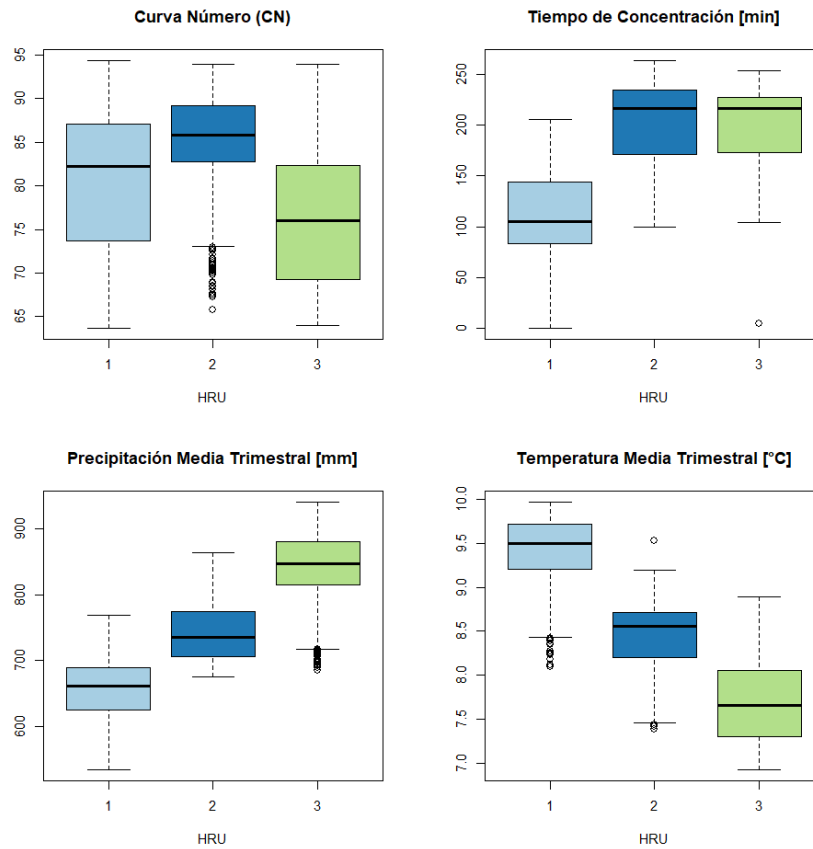


Figura 5.17. Descripción de modelo de 3 HRU por medio de gráficos de caja.

## 5.5. Calibración y validación del conjunto de modelos

El proceso de calibración de los modelos se lleva a cabo maximizando el parámetro de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) [1]. Dicho parámetro está definido por medio de:

$$NSE = 1 - \frac{\sum(Q_o(t) - Q_s(t))^2}{\sum(Q_o(t) - \bar{Q}_o)^2} \quad (59)$$

Donde  $Q_o(t)$  y  $Q_s(t)$  son los caudales observado y simulado, respectivamente, para el tiempo  $t$ , mientras que  $\bar{Q}_o$  corresponde ser al caudal observado promedio.

Junto con ello, se complementa dicho valor con el coeficiente de correlación de Pearson ( $R^2$ ), así como el coeficiente de eficiencia de Kling-Gupta [40]:

$$KGE = 1 - \sqrt{(CC - 1)^2 + \left(\frac{D_m}{D_o} - 1\right)^2 + \left(\frac{M_m}{M_o} - 1\right)^2} \quad (60)$$

Donde  $CC$  corresponde al coeficiente de correlación de Pearson [1, 2],  $D_m$  es la desviación estándar de los valores modelados,  $D_o$  es la desviación estándar de los valores observados,  $M_m$  es el promedio de los valores modelados, y  $M_o$  es el promedio de los valores observados.

### 5.5.1. Parámetros de calibración

Para el proceso de calibración de cada uno de los modelos se recurrirá a la manipulación de las siguientes variables:

- Coeficiente de Recesión ( $K$ )
- Porcentaje del Peak (*Ratio to Peak*)

Ambas variables están asociadas al fenómeno de flujo basal (ver Sección 2.4.3) y a la ecuación (44), que gobierna dicho fenómeno en HEC-HMS [15]. La variable *Ratio to Peak* se asocia a la constante  $Q_0$  dentro de (44).

Para calibrar el modelo es necesario tener en cuenta un rango de valores para cada parámetro. Los valores que se tienen en consideración se obtienen de las modelaciones en cada uno de los cuatro escenarios, dentro de los rangos delimitados por HEC-HMS. Para ambas variables, los valores fluctúan entre 0 y 1.

### 5.5.2. Calibración y validación de los modelos

Los procesos de calibración y validación del conjunto de modelos, para ambas cuencas, se detalla en la Tabla 5.5. Cabe indicar que, para ambas cuencas en el intervalo Abril-Junio, no se contaba con un mayor número de tormentas, o con tormentas que tuviesen información fehacientemente registrada.

Tabla 5.5. Eventos de crecidas asociados a procesos de calibración y validación.

Cuenca	Evento calibración	Evento validación
Estero Pocuro	19-04-2017 al 23-04-2017	26-05-2012 al 29-05-2012
Río Purén.	01-05-2019 al 05-05-2019	10-04-2018 al 12-04-2018

El proceso de calibración es un proceso iterativo, donde el primer paso es utilizar un valor dentro del rango para cada una de las variables, para luego modificarlos automáticamente, por medio de la herramienta *Optimization Trial*, disponible en HEC-HMS. El modelo se considera calibrado cuando se cumple:

$$(N_{i-1} - N_i) < 0,001 \quad (61)$$

Donde  $N_{i-1}$  y  $N_i$  corresponden al coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe, para las iteraciones  $i-1$  e  $i$ .

### 5.5.3. Resultados de la calibración, Estero Pocuro

Los resultados de la calibración se muestran en la Tabla 5.6. Los hidrogramas de crecida modelados considerando los valores de las variables definidas en dicha tabla se muestran en la Figura 5.18. En la Figura 5.19 se presentan las correlaciones y dispersión entre los caudales observados y cada uno de los modelos.

Los resultados de los indicadores de eficiencia para cada uno de los modelos se muestran en la Tabla 5.7.

Tabla 5.6. Valores de parámetros calibrados, cuenca Estero Pocuro.

Modelo	K	RP ( <i>Ratio to Peak</i> )
Modelo Integrado	K=0.391	RP=0.55
Modelo 2 HRU	K <sub>1</sub> =0.199	RP <sub>1</sub> =0.703
	K <sub>2</sub> =0.781	RP <sub>2</sub> =0.26
Modelo 3 HRU	K <sub>1</sub> =0.531	RP <sub>1</sub> =0.581
	K <sub>2</sub> =0.473	RP <sub>2</sub> =0.609
	K <sub>3</sub> =0.87	RP <sub>3</sub> =0.032
Modelo 4 HRU	K <sub>1</sub> =0.425	RP <sub>1</sub> =0.891
	K <sub>2</sub> =0.446	RP <sub>2</sub> =0.553
	K <sub>3</sub> =0.384	RP <sub>3</sub> =0.583
	K <sub>4</sub> =0.906	RP <sub>4</sub> =0.126

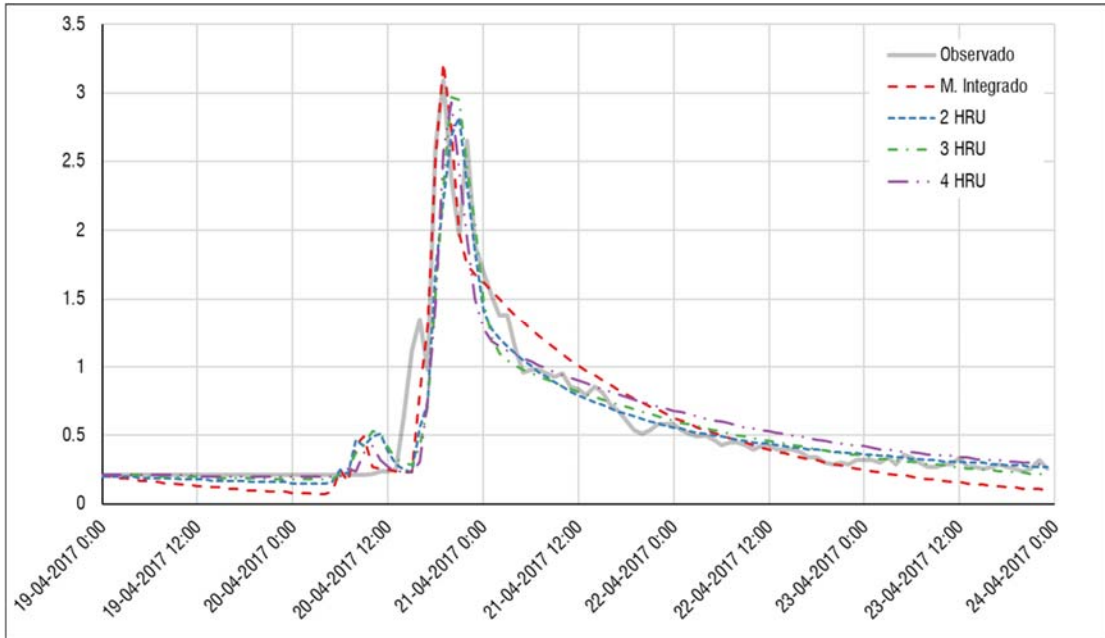


Figura 5.18. Resultados de proceso de calibración (Pocuro), hidrogramas de crecida, evento de Abril de 2017.

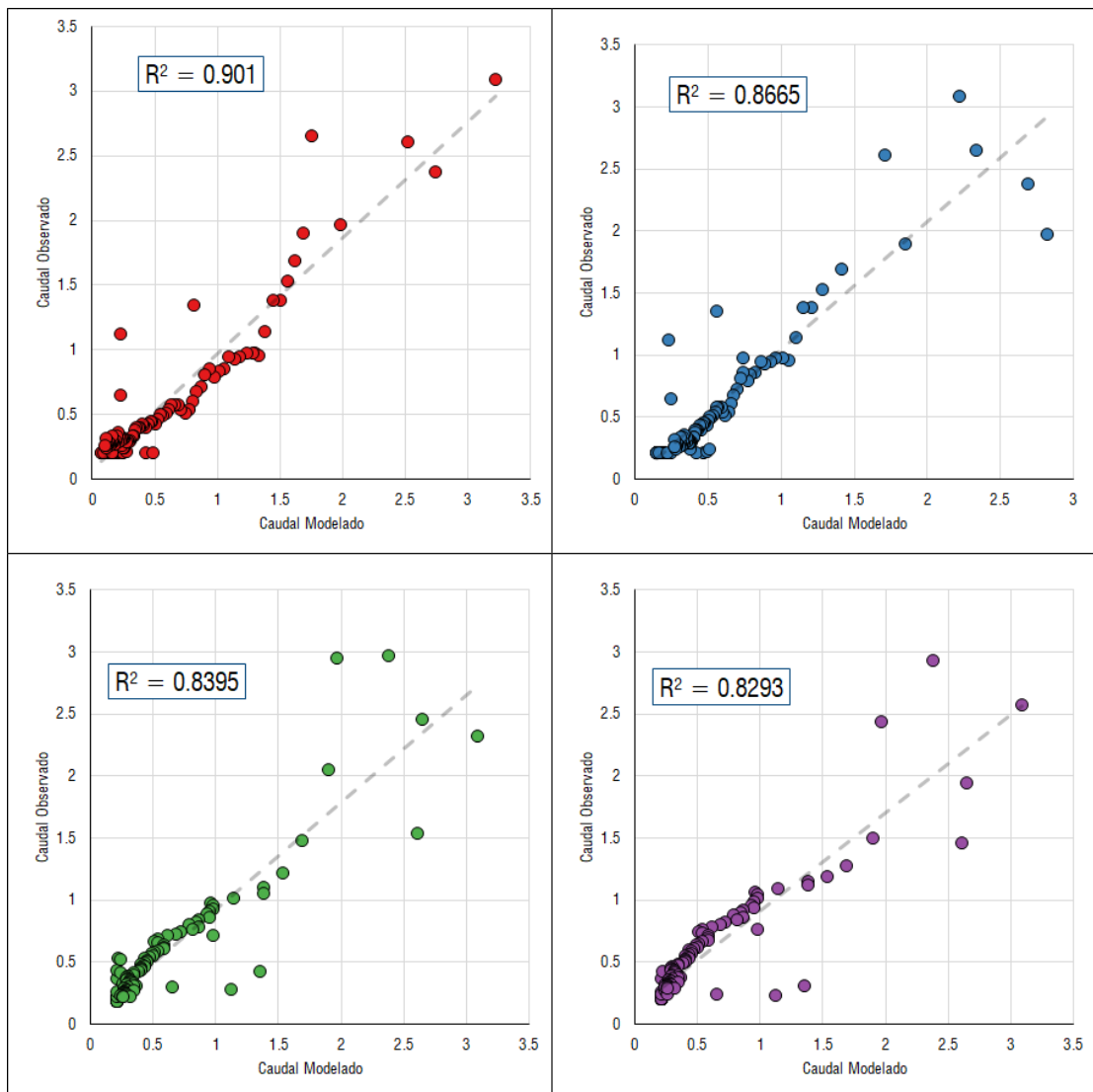


Figura 5.19. Resultados de proceso de calibración (Pocuro), correlaciones entre modelos y observaciones, evento de Abril de 2017.

Arriba, de izquierda a derecha: Modelo integrado y Modelo de 2 HRU. Abajo, de izquierda a derecha: Modelo de 3 HRU y Modelo de 4 HRU.

Tabla 5.7. Indicadores de eficiencia para modelos calibrados (Pocuro).

Modelo	NSE	PBias (%)	Correlación ( $R^2$ )	KGE
Integrado	0.89	-4.63	0.90	0.91
2 HRU	0.86	-4.37	0.86	0.87
3 HRU	0.84	-2.75	0.83	0.89
4 HRU	0.83	1.37	0.82	0.84

#### 5.5.4. Resultados de la validación, Estero Pocuro.

Los resultados de la validación se muestran en la Figura 5.20. La correlación y dispersión de los datos observados y cada uno de los modelos se describe en la Figura 5.21, mientras que los indicadores de eficiencia se muestran en la Tabla 5.8. Cabe destacar, que, en estos últimos dos apartados, se descartó del análisis los datos (observados y modelados) registrados entre las 12:00 y 13:00 del 27 de Mayo de 2012.

Tabla 5.8. Indicadores de eficiencia para modelos validados (Pocuro).

Modelo	NSE	PBias (%) <sup>24</sup>	Correlación (R <sup>2</sup> )	KGE
Integrado	0.76	15.89	0.83	0.76
2 HRU	0.75	-1.58	0.85	0.82
3 HRU	0.78	3.13	0.84	0.82
4 HRU	0.65	-19.52	0.80	0.72

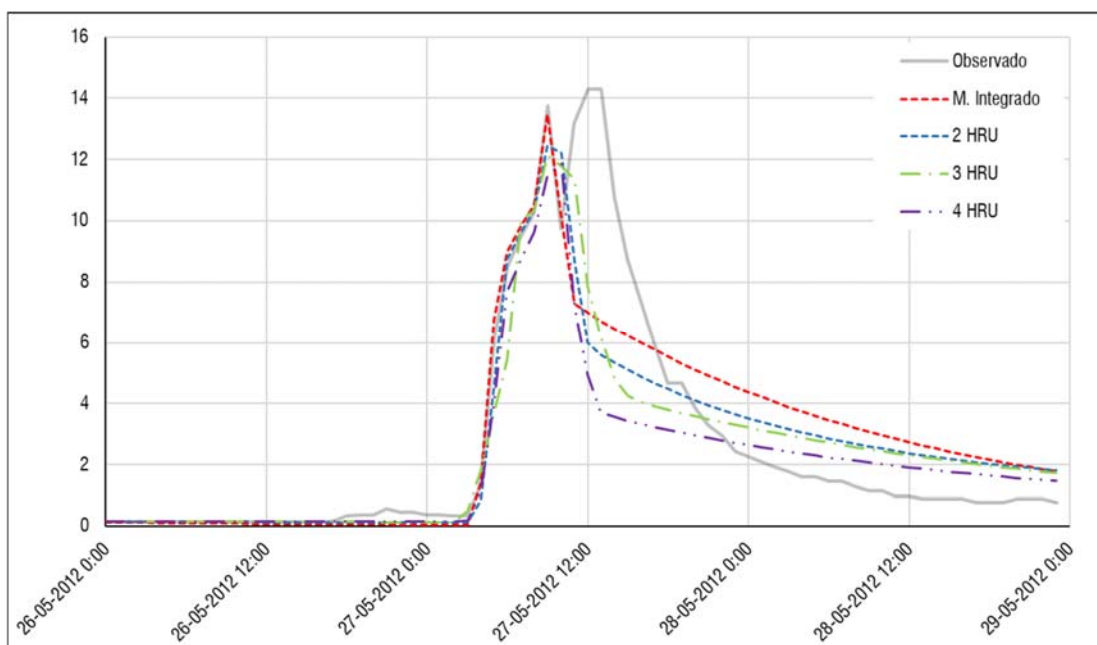


Figura 5.20. Resultados de proceso de validación (Pocuro), hidrogramas de crecida, evento de Mayo de 2012.

<sup>24</sup> En la determinación de este porcentaje se consideró el intervalo entre las 12:00 a las 13:00 del 27 de Mayo de 2012.

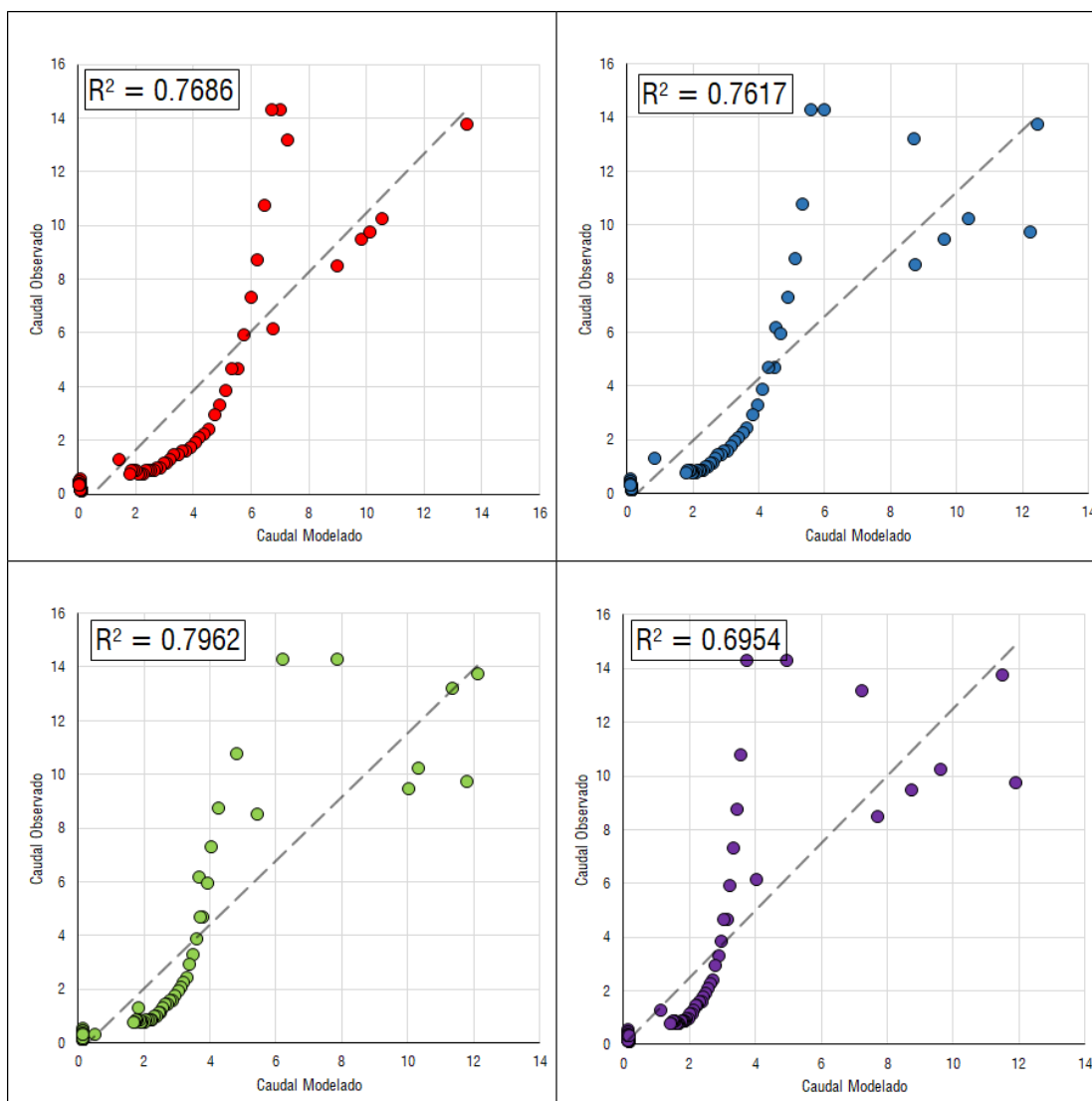


Figura 5.21. Resultados de proceso de validación (Pocuro), correlaciones entre modelos y observaciones, evento de Mayo de 2012.

Arriba, de izquierda a derecha: Modelo integrado y Modelo de 2 HRU. Abajo, de izquierda a derecha: Modelo de 3 HRU y Modelo de 4 HRU.

### 5.5.5. Resultados de la calibración, Río Purén

Los resultados de la calibración se muestran en la Tabla 5.9. Los hidrogramas de crecida considerando los valores de las variables definidas en dicha tabla se muestran en la Figura 5.22. En la Figura 5.23 se presentan las correlaciones y dispersión entre los caudales observados y cada uno de los modelos.

Los resultados de los indicadores de eficiencia para cada uno de los modelos se muestran en la Tabla 5.10.

Tabla 5.9. Valores de parámetros calibrados, cuenca Río Purén.

Modelo	K	RP ( <i>Ratio to Peak</i> )
Modelo Integrado	K=0.324	RP=0.879
Modelo 2 HRU	K <sub>1</sub> =0.661	RP <sub>1</sub> =0.655
	K <sub>2</sub> =0.322	RP <sub>2</sub> =0.54
Modelo 3 HRU	K <sub>1</sub> =0.514	RP <sub>1</sub> =0.594
	K <sub>2</sub> =0.486	RP <sub>2</sub> =0.569
	K <sub>3</sub> =0.434	RP <sub>3</sub> =0.481

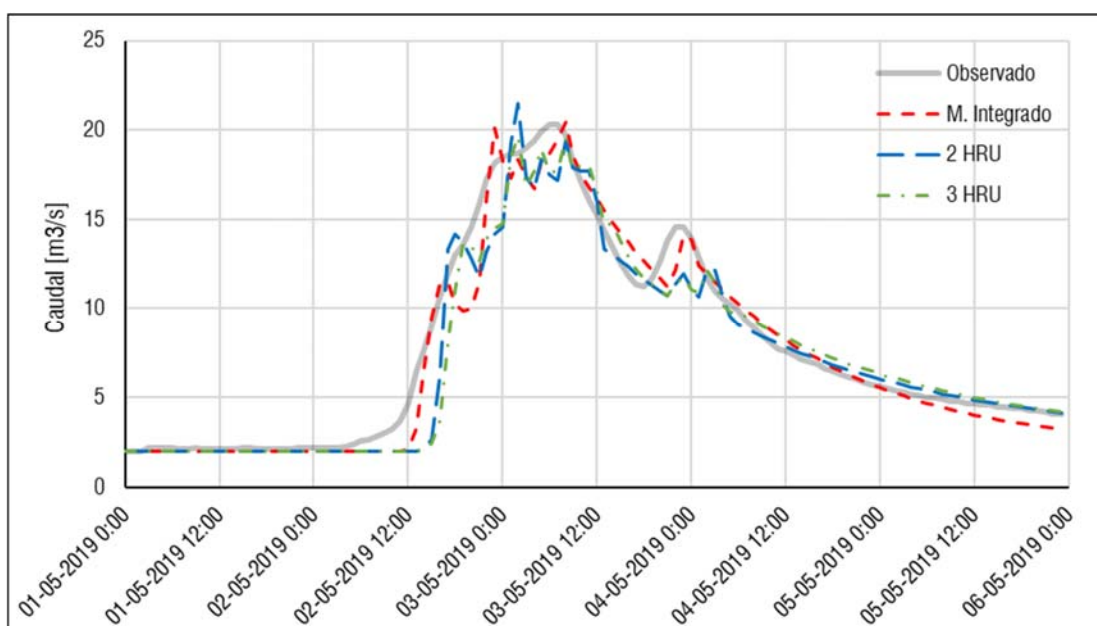


Figura 5.22. Resultados de proceso de calibración (Purén), hidrogramas de crecida, evento de Mayo de 2019.

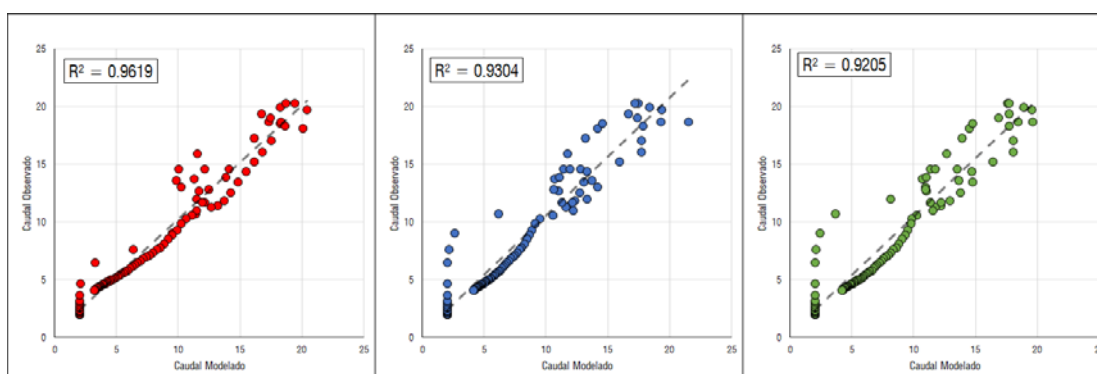


Figura 5.23. Resultados del proceso de calibración (Purén), correlaciones entre modelos y observaciones, evento de Mayo de 2019.

De izquierda a derecha: Modelo Integrado, 2 HRU, 3 HRU.

Tabla 5.10. Indicadores de eficiencia para modelos calibrados (Purén).

Modelo	NSE	PBias (%)	Correlación (R <sup>2</sup> )	KGE
Integrado	0.96	-4.22	0.96	0.95
2 HRU	0.92	-6.49	0.93	0.91
3 HRU	0.91	-5.64	0.92	0.91

### 5.5.6. Resultados de la validación, Río Purén

Los resultados de la validación se muestran en la Figura 5.24. La correlación y dispersión de los datos observados y cada uno de los modelos se describe en la Figura 5.25, mientras que los indicadores de eficiencia se muestran en la Tabla 5.11.

Tabla 5.11. Indicadores de eficiencia para modelos validados (Purén).

Modelo	NSE	PBias (%)	Correlación (R <sup>2</sup> )	KGE
Integrado	0.82	-1.68	0.83	0.91
2 HRU	0.74	-1.03	0.75	0.87
3 HRU	0.67	0.72	0.70	0.78

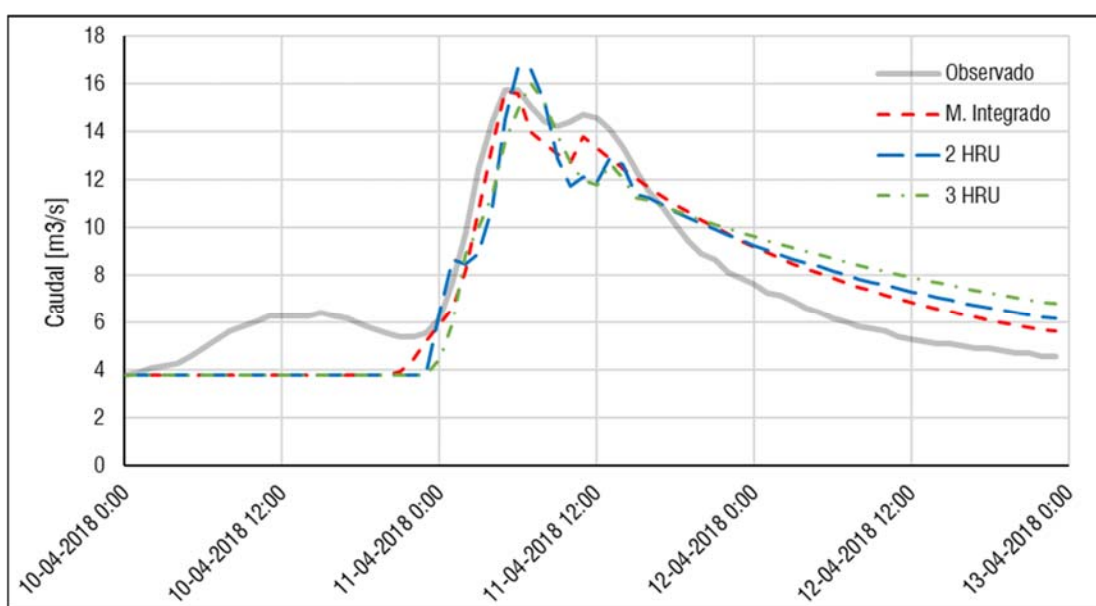


Figura 5.24. Resultados de proceso de validación (Purén), hidrogramas de crecida, evento de Abril de 2018.

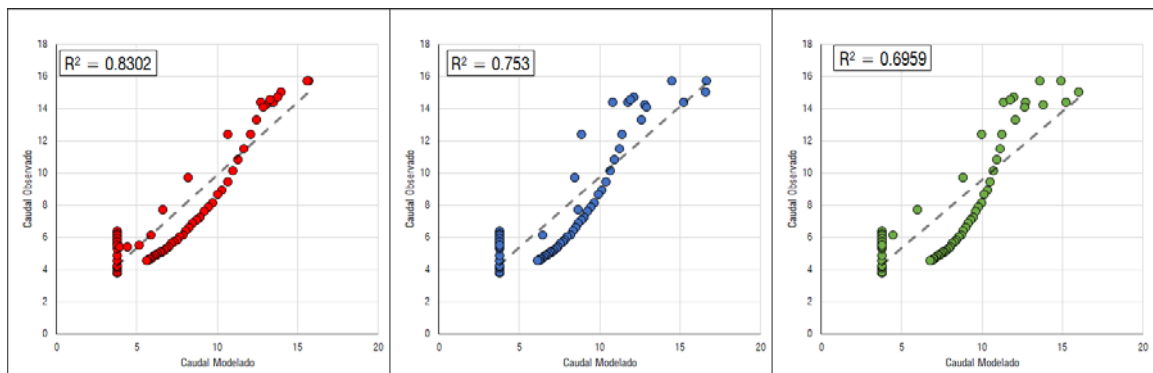


Figura 5.25. Resultados del proceso de calibración (Purén), correlaciones entre modelos y observaciones, evento de Abril de 2018.

De izquierda a derecha: Modelo Integrado, 2 HRU, 3 HRU.

## CAPÍTULO VI

### 6. Análisis de resultados

En este capítulo se presentan la descomposición de los resultados de calibración y validación de cada cuenca (Pocuro y Purén), en términos de la cantidad óptima de HRU que los representa y cómo estas aportan a cada crecida de interés.

Asimismo, se plantea un análisis de sensibilidad con respecto a las variables que representen mayor incertidumbre. Este análisis se realizó sobre la cuenca del Río Purén, debido a la poca variabilidad de sus parámetros (en especial el parámetro CN), lo cual implicó un mínimo de HRU delineados.

#### 6.1. Análisis crítico

##### 6.1.1. Comportamiento de los HRU sobre las crecidas, cuenca del Estero Pocuro

Los caudales de salida del conjunto de modelos, para los eventos de calibración y validación, se muestran en la Figura 5.18 y Figura 5.20.

El aporte de cada HRU al caudal aportante de salida, para los eventos de calibración y validación, en el modelo óptimo, se muestran en la Figura 6.2 y Figura 6.4, respectivamente. Desde estas figuras se pueden realizar las siguientes observaciones:

1. Los aportes de caudal que realiza cada HRU a la salida de la cuenca son proporcionales tanto en superficie como en magnitud de precipitaciones (ver Figura 5.6).
2. Los aportes son de tipo secuencial, es decir, cada unidad aporta a la salida primero en la medida de que esté mas cerca de la salida de la cuenca. La excepción a este orden ocurre en la tormenta de Abril de 2017, donde el HRU N°1 es el último en aportar. Esto puede tener sentido si se consideran las abstracciones iniciales asociadas al CN de dicho HRU.
3. Los peaks de flujo de cada HRU ocurren, de igual modo, de forma secuencial, siendo el HRU N°3 el último en alcanzar su peak en la salida, debido a la influencia de su respectivo canal.
4. El HRU N°3, posee una recesión muy baja, siendo su caudal base aportante (*baseflow*) relativamente bajo. Por otro lado el aporte al flujo base del HRU N°1 es considerablemente alto si se mide con respecto a su caudal peak (*Ratio to Peak*). Esta característica puede intervenir sobre el tramo final de cada crecida, donde en el evento de Mayo de 2012, el caudal modelado total está sobreestimado, una vez alcanzado el peak.

Para el caso del modelo de 2 HRU, los aportes de cada unidad en los eventos de calibración y validación se muestran en la Figura 6.5 y Figura 6.6. Desde estas figuras, sólo se puede observar un aumento en la magnitud de la precipitación del HRU N°2, así como la influencia del canal sobre dicha unidad. Por otra parte, la calibración de los parámetros asociados al *baseflow* producen cambios abruptos en las curvas de descarga de cada HRU.

En el modelo de 4 HRU, los aportes para los eventos de calibración y validación se muestran en la Figura 6.7 y la Figura 6.8. En ellos se observa que los HRU N°2 y N°3 aportan caudales similares, incluso la tasa de decaimiento  $K$  del *baseflow* es similar, por lo que, en términos hidrológicos, se comportan como una misma región.

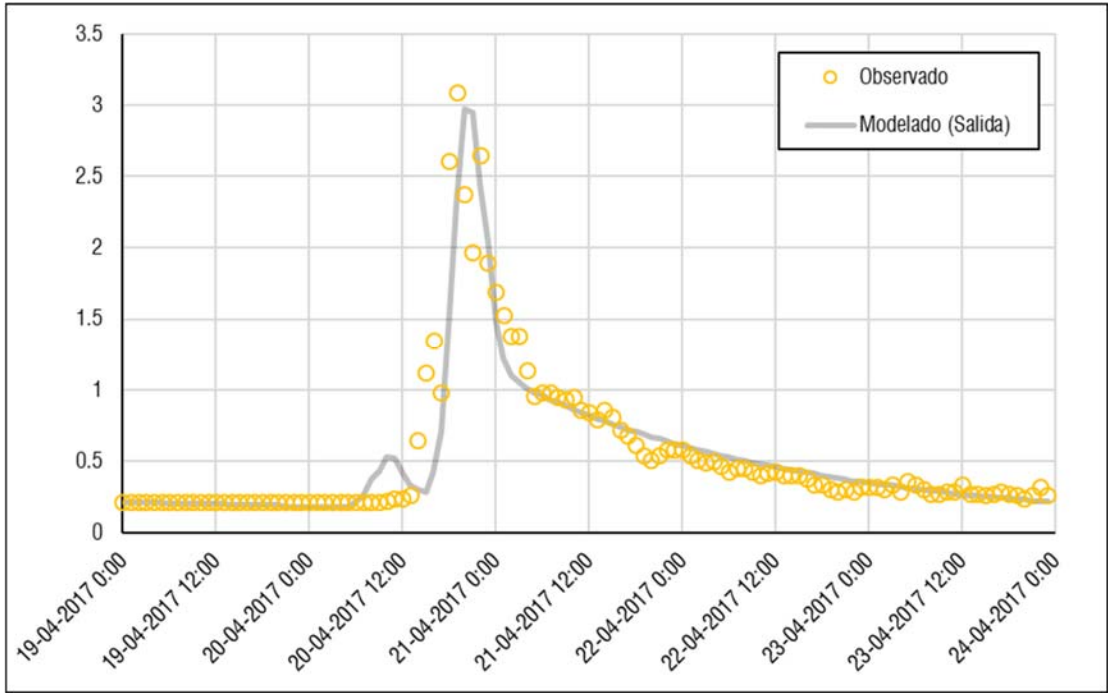


Figura 6.1. Comparación entre caudales observados y modelados, Modelo de 3 HRU, Cuenca del Estero Pocuro, Evento de Abril de 2017.

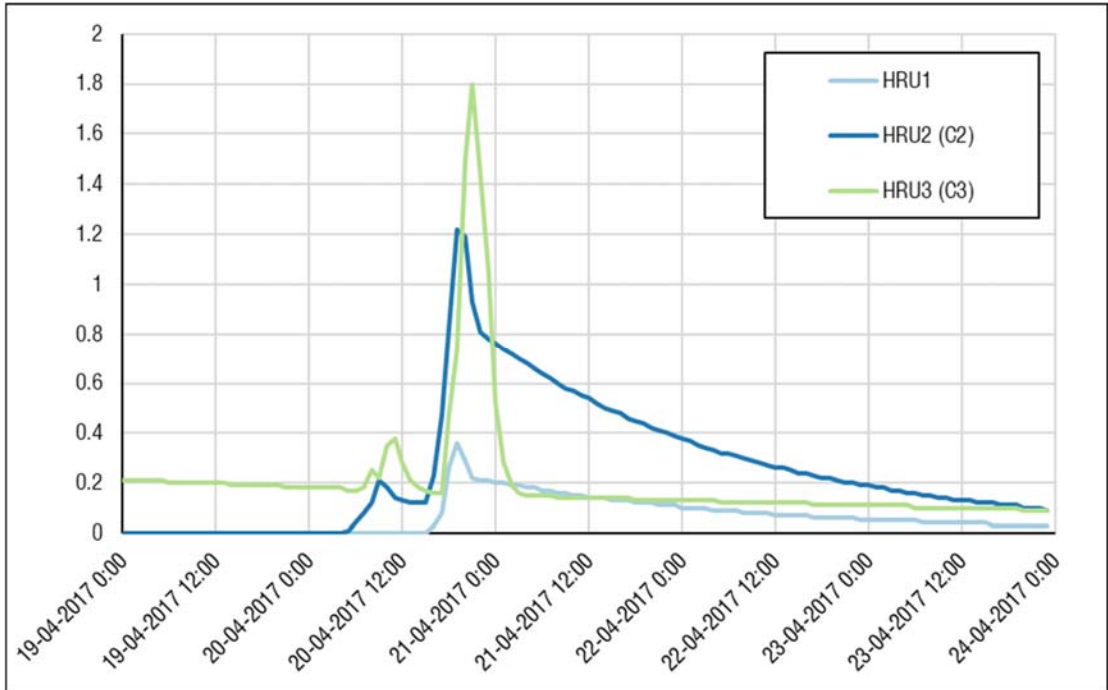


Figura 6.2. Caudales aportados por cada HRU, Modelo de 3 HRU, Cuenca del Estero Pocuro, Evento de Abril de 2017.

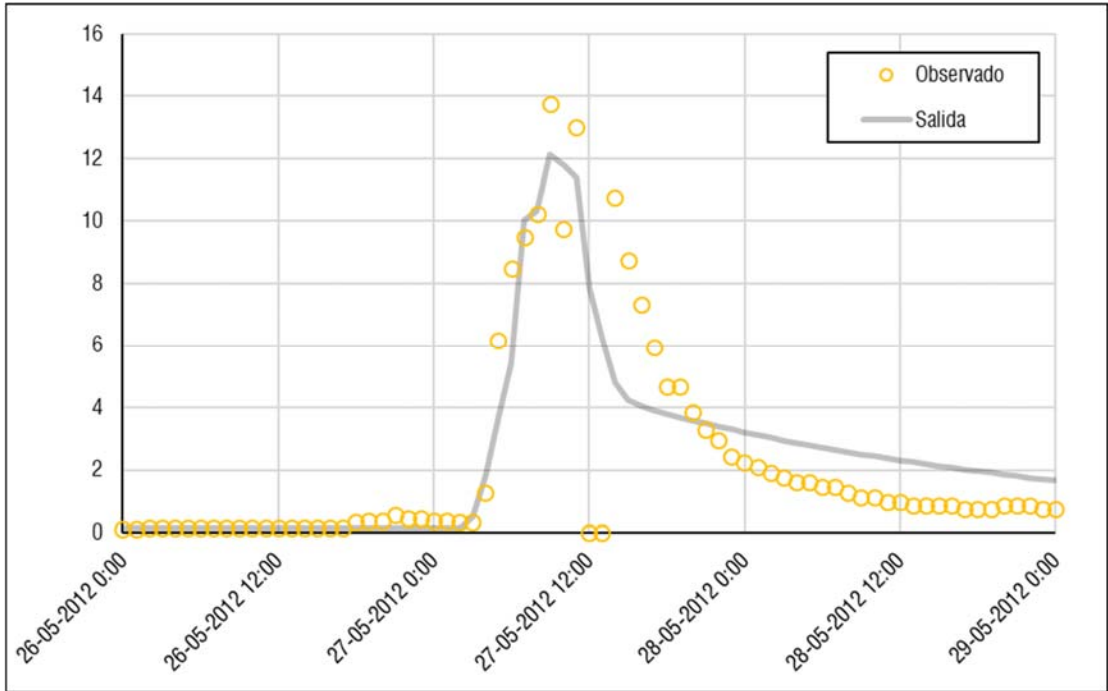


Figura 6.3. Comparación entre caudales observados y modelados, Modelo de 3 HRU, Cuenca del Estero Pocuro, Evento de Mayo de 2012.

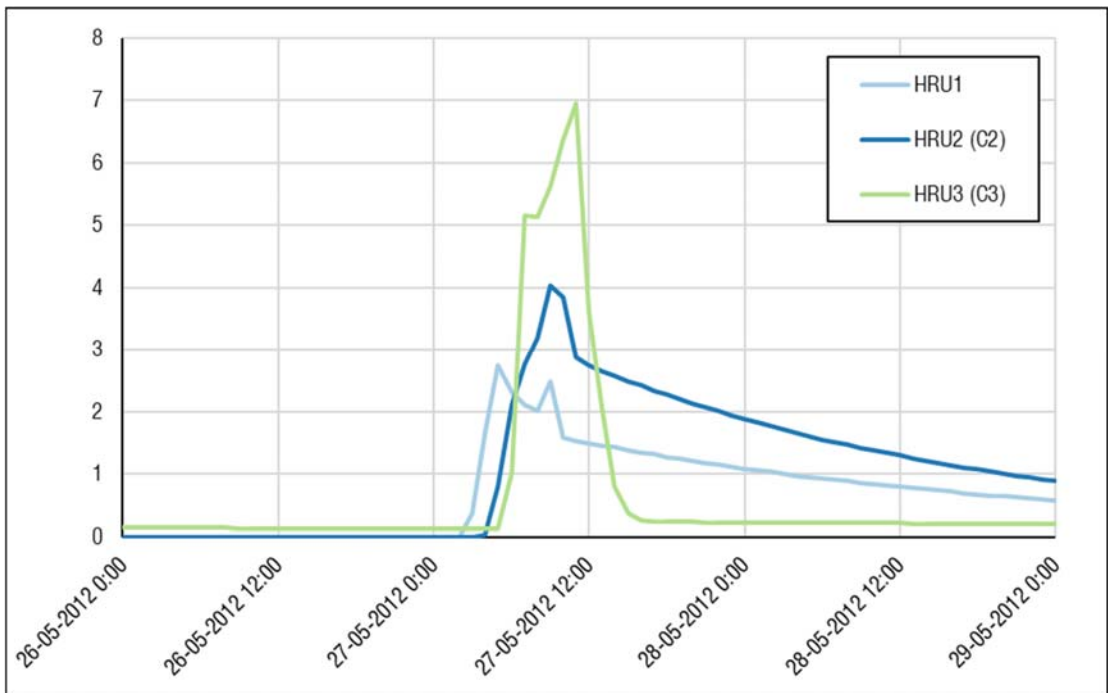


Figura 6.4. Caudales aportados por cada HRU, Modelo de 3 HRU, Cuenca del Estero Pocuro, Evento de Mayo de 2012.

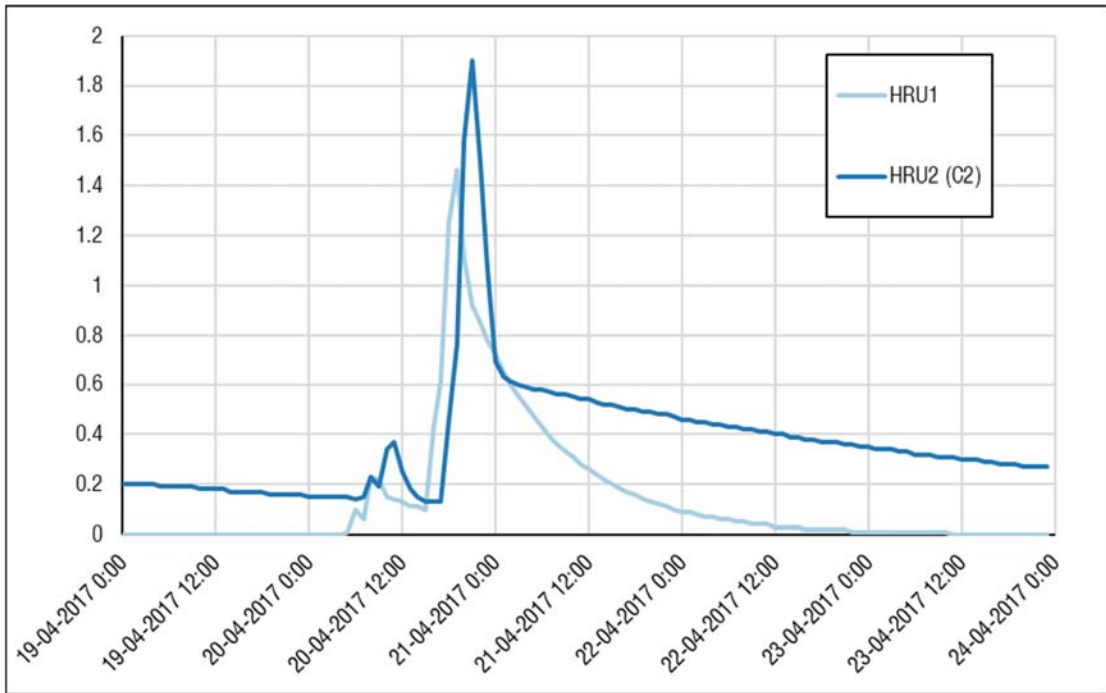


Figura 6.5. Caudales aportados por cada HRU, Modelo de 2 HRU, Cuenca del Estero Pocuro, Evento de Abril de 2017.

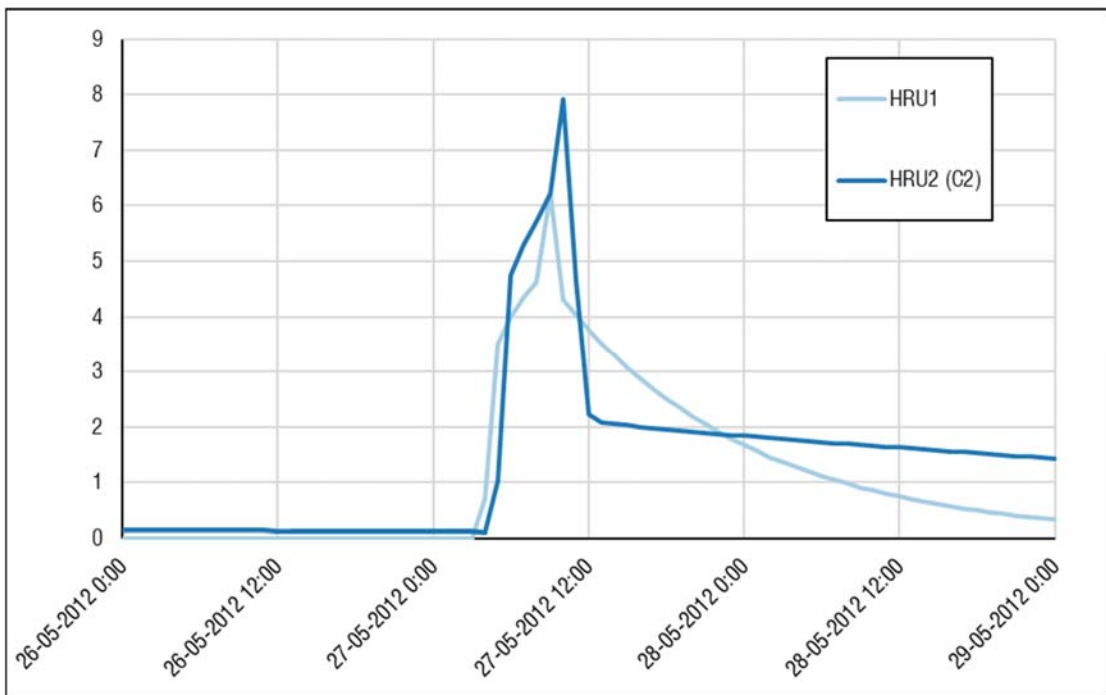


Figura 6.6. Caudales aportados por cada HRU, Modelo de 2 HRU, Cuenca del Estero Pocuro, Evento de Mayo de 2012.

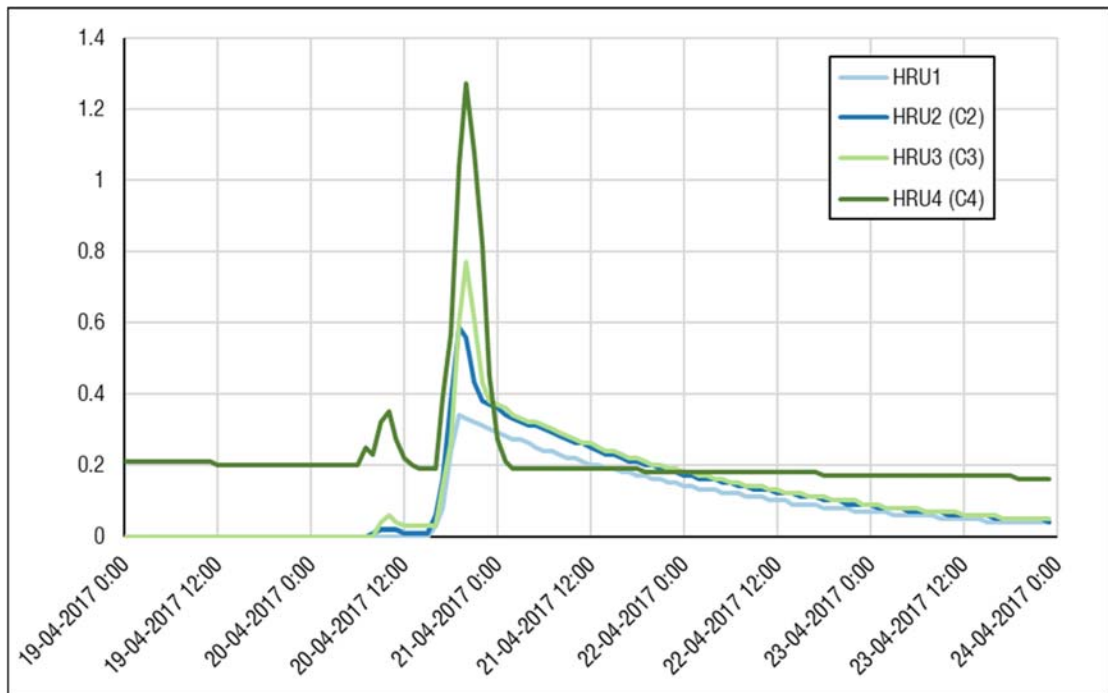


Figura 6.7. Caudales aportados por cada HRU, Modelo de 4 HRU, cuenca del Estero Pocuro, Evento de Abril de 2017.

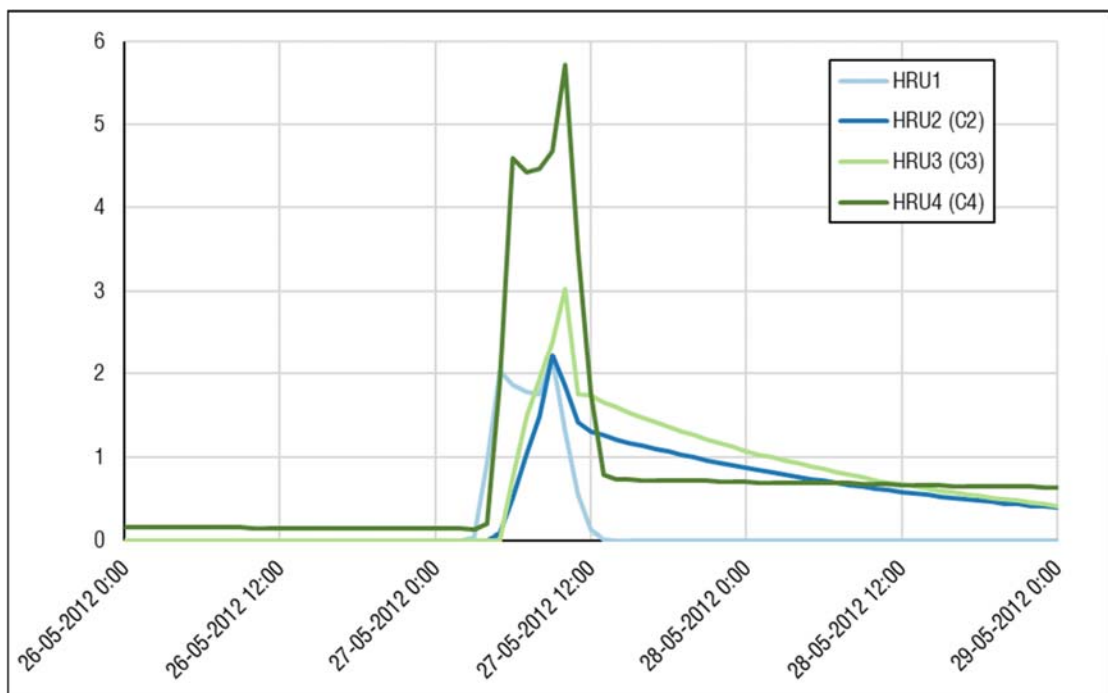


Figura 6.8. Caudales aportados por cada HRU, Modelo de 4 HRU, cuenca del Estero Pocuro, Evento de Mayo de 2012.

### 6.1.2. Comportamiento de los HRU sobre las crecidas, cuenca del Río Purén

Los caudales de salida del conjunto de modelos, para los eventos de calibración y validación, se muestran en la Figura 5.22 y Figura 5.24.

El aporte de cada HRU al caudal aportante de salida, para los eventos de calibración y validación, se muestran en la Figura 6.9 y Figura 6.11, respectivamente. Desde estas figuras se pueden realizar las siguientes observaciones:

1. Se incorporó al modelo en HEC-HMS un elemento *Source*, el cual aporta, durante toda la tormenta, un caudal constante. Este caudal constante está descrito en cada figura, bajo el término "BASE".
2. Dado que, en esta cuenca, el óptimo de unidades sólo son dos, no se puede declarar algún tipo de orden para cada HRU. En el proceso de calibración, ambas HRU empiezan a aportar al mismo tiempo, mientras que en el proceso de validación, el HRU N°2 es el primero en aportar. En este aspecto se pueden considerar las abstracciones iniciales de cada HRU, y cómo estas pueden afectar la precipitación efectiva.
3. No obstante lo anterior, se puede evidenciar un "desfase" entre los caudales aportados por cada unidad, evidenciando el tránsito del HRU N°2 por un canal.
4. En el evento de validación (tormenta de Abril de 2018), existe un caudal (entre las 00:00 del 10 de Abril, y las 20:00 del 11 de Abril) que no está asociado a un evento de precipitación en particular que haya sido registrado por las estaciones meteorológicas, incidiendo de manera negativa en los parámetros de correlación y eficiencia. Esta singularidad afecta a todos los modelos desarrollados sobre la cuenca de Purén.

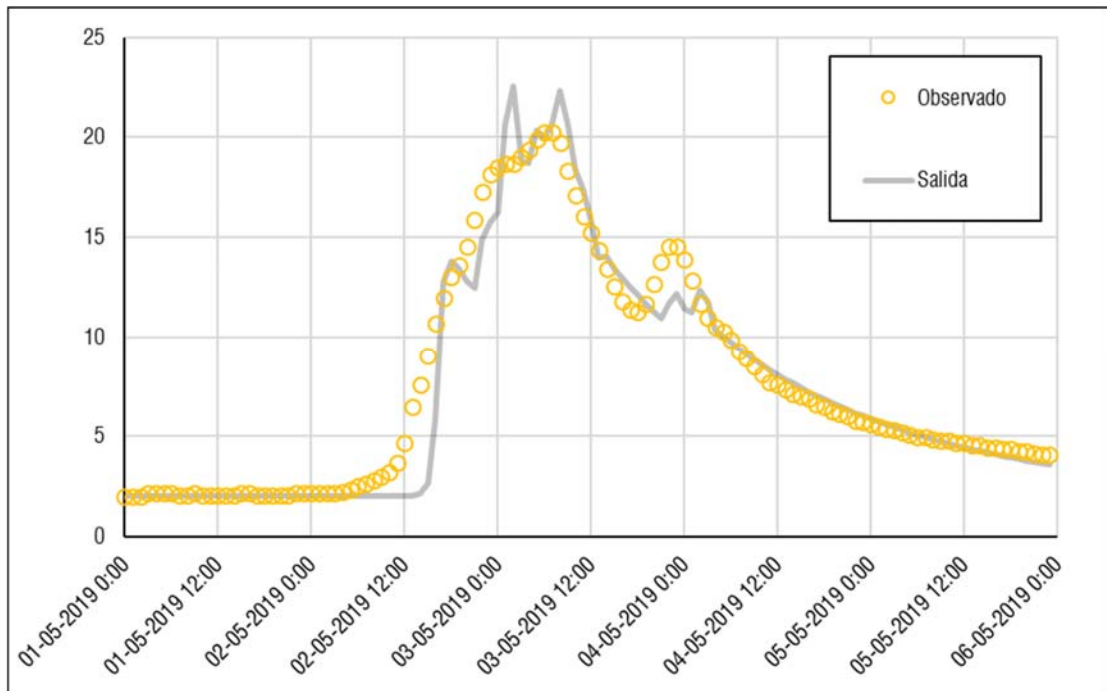


Figura 6.9. Comparación entre caudales observados y modelados, Modelo de 2 HRU, Cuenca del Río Purén, Evento de Mayo de 2019.

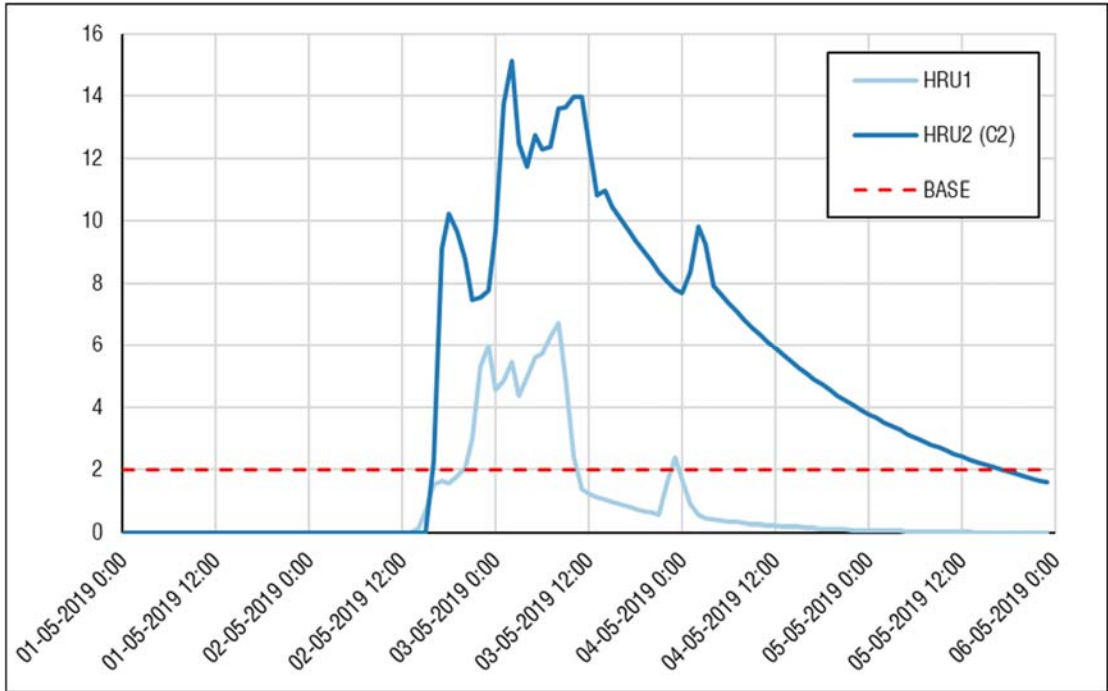


Figura 6.10. Caudales aportados por cada HRU, Modelo de 2 HRU, cuenca del Río Purén, Evento de Mayo de 2019.

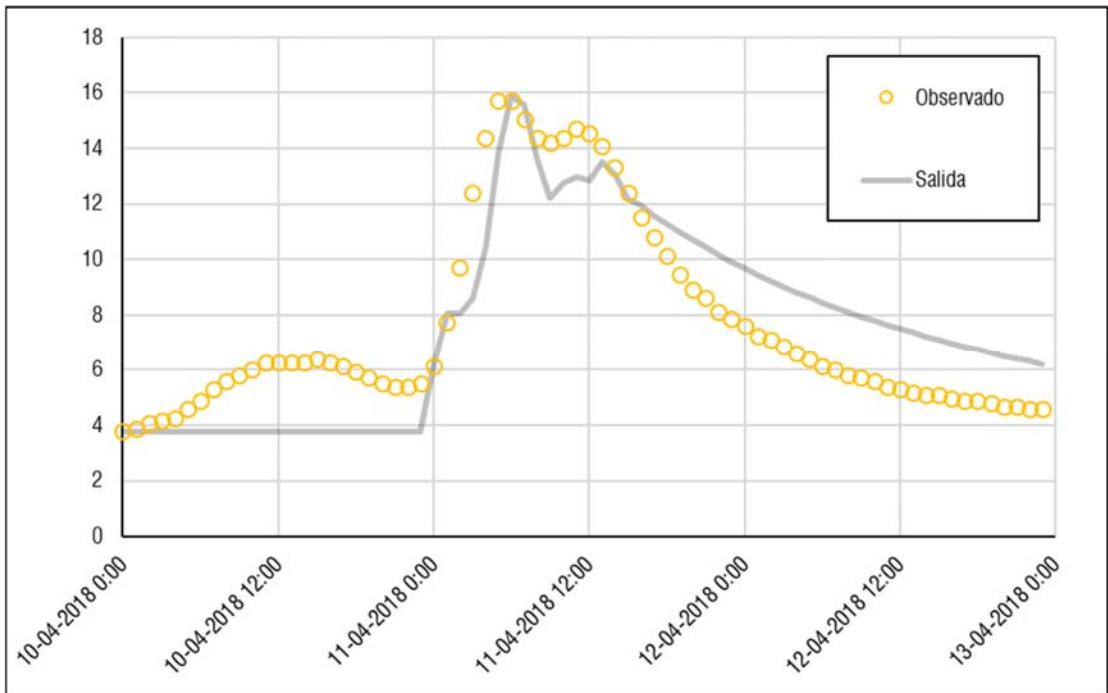


Figura 6.11. Comparación entre caudales observados y modelados, Modelo de 2 HRU, cuenca del Río Purén, Evento de Abril de 2018.

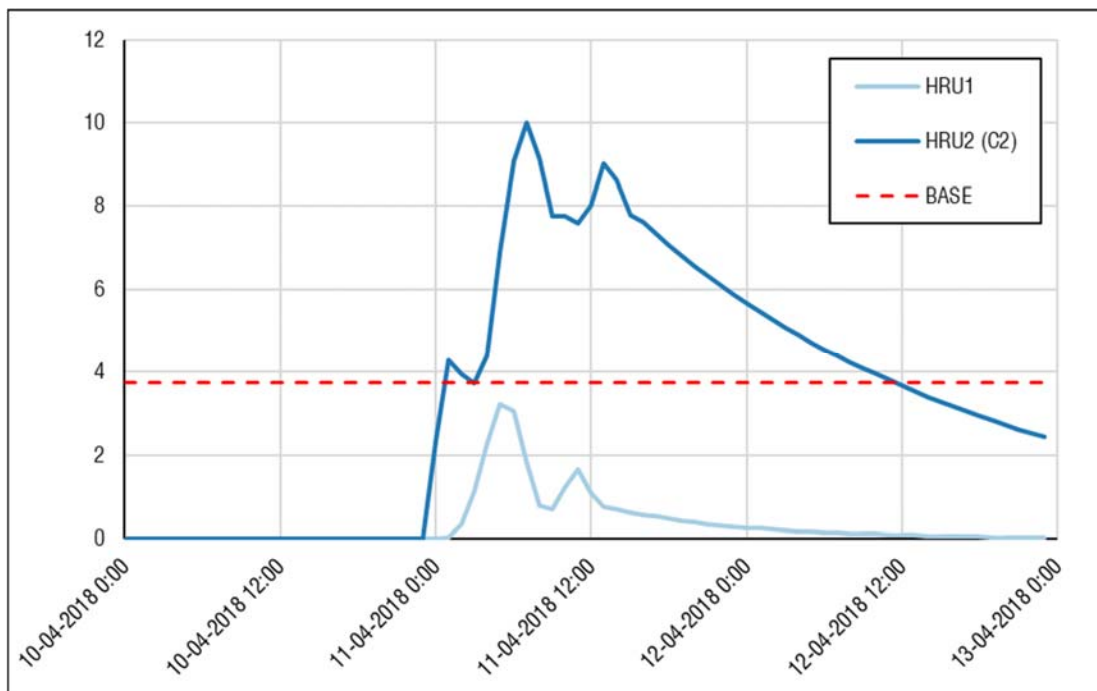


Figura 6.12. Caudales aportados por cada HRU, Modelo de 2 HRU, cuenca del Río Purén, Evento de Abril de 2018.

### 6.1.3. Análisis sobre el Índice de Silueta

Desde la Sección 5.3.2 se obtiene que, para la cuenca del Río Purén, el número óptimo de Unidades de Respuesta es dos. No obstante, se alcanza un segundo peak, (ligeramente menor al valor máximo) cuando se analiza con siete unidades (Ver Figura 5.13). Teniendo en cuenta esta particularidad, se delimitan los siete HRU sobre la cuenca del Río Purén. La distribución de estos HRU sobre la cuenca se muestran en la Figura 6.13, mientras que la descripción de cada una de estas unidades en términos de sus parámetros se muestra en la Figura 6.14.

Desde estas figuras se puede deducir que la cuenca se divide en cinco regiones principales: La primera región definida por el HRU N°1; la segunda región, definida por los HRU N°2 y 3; la tercera, definida por el HRU N°4; la cuarta, definida por el HRU N°5; y la quinta, definida por los HRU N°6 y 7. Si bien, cada una de las unidades definidas previamente está correctamente delimitada en términos de sus parámetros, incluso cuando se tienen unidades compartiendo una región, resulta poco práctico implementar tal cantidad de unidades sobre el software HEC-HMS, tanto por la cantidad de parámetros a calibrar así como la incertidumbre asociada a una descomposición muy extensa de la cuenca.

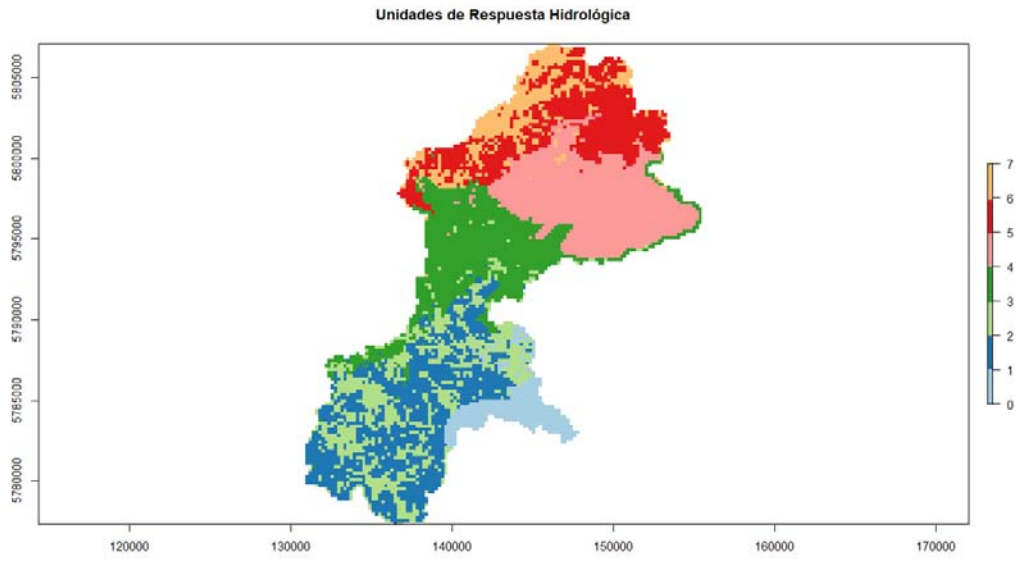


Figura 6.13. Distribución de siete HRU sobre la cuenca del Río Purén.

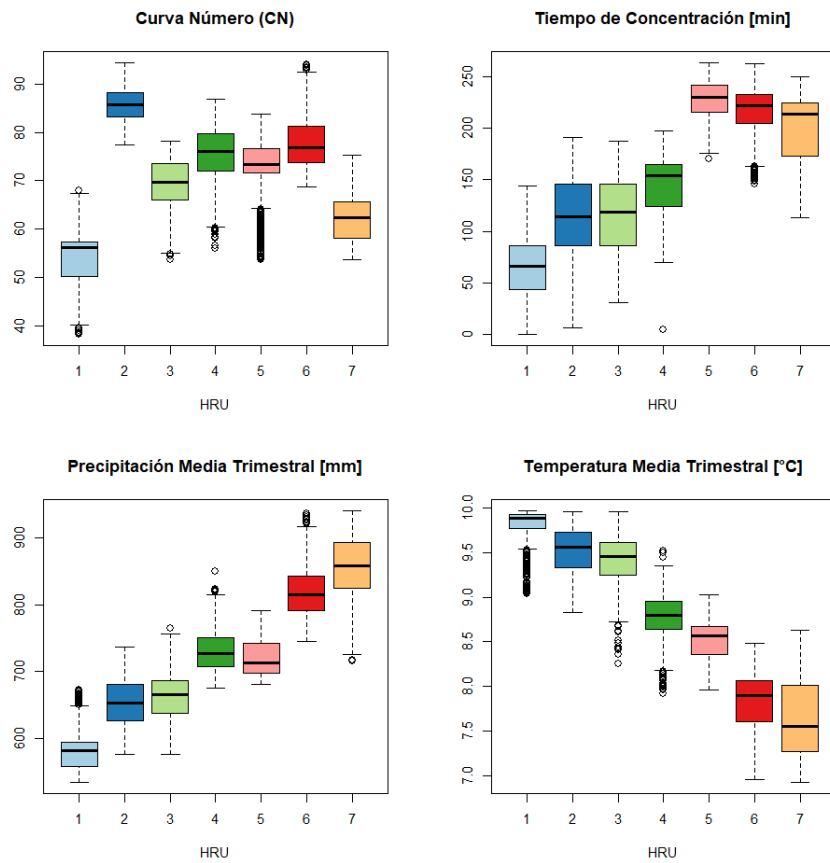


Figura 6.14. Descripción de los HRU en términos de sus parámetros, Cuenca del Río Purén, caso de siete unidades.

## 6.2. Análisis de sensibilidad

El propósito del análisis de sensibilidad realizado consistió en observar cómo cambian las HRU, tanto en forma, como en su descripción en función de las variables que las componen, en la medida de que modifiquen aquellos parámetros que presenten una alta incertidumbre. Para efectos del presente trabajo, dichos parámetros son el tiempo de concentración y la Curva Número. Asimismo, dado que el proceso de delineamiento de las HRU depende del Análisis de Componentes Principales (PCA), se realizará un análisis de sensibilidad sobre dicho proceso.

### 6.2.1. Sensibilidad sobre el Análisis de Componentes Principales (PCA, Purén)

El objetivo clave al realizar el Análisis de Componentes Principales consiste en poder sintetizar un conjunto de datos con múltiples variables en grupos de datos con características principales en común, de acuerdo a cómo se correlacionan las variables que los componen, descartando aquellas variables que tengan poca o nula importancia. En la Tabla 3.5 se definen cuatro variables para realizar el PCA sobre cada cuenca, asumiendo que dichas variables son suficientes para delinear correctamente las HRU sobre cada cuenca. No obstante, es posible incorporar más variables al análisis, en especial aquellas que se consideran para determinar otras variables. Teniendo en cuenta esto, se procede a realizar un Análisis de Componentes Principales, para el conjunto de datos asociados a la cuenca del Río Purén, considerando las siguientes variables:

- Coordenada X, UTM
- Coordenada Y, UTM
- Elevación (Cota)
- Pendientes
- Longitudes de Cauce
- Curva Número (CN)
- Tiempo de Concentración
- Precipitación Media Trimestral
- Temperatura Media Trimestral

Las correlaciones entre cada una de estas variables se muestran en la Figura 6.15, desde la cual se puede inferir que:

1. Existe una fuerte correlación entre las coordenadas X e Y con respecto a las longitudes de cauce, y esta última, a su vez, está fuertemente correlacionada con el tiempo de concentración, lo cual tiene sentido, dado la forma en que se define dicha variable [2, 3].
2. La variable pendiente sólo tiene una fuerte correlación con respecto al parámetro Curva Número (CN), dado la fórmula de definición de esta variable realizada por Savvidou *et al.* [7].
3. Las elevaciones poseen una fuerte correlación con respecto a el tiempo de concentración y las variables meteorológicas.

Los resultados del Análisis de Componentes Principales y las contribuciones de cada variable a cada dimensión se muestran en las Figura 6.16 y Tabla 6.1, respectivamente. Dichos resultados muestran que las primeras dos dimensiones del PCA concentran, aproximadamente, el 77% de la varianza total de datos, por lo que la representación se puede considerar aceptable.

Desde la Figura 6.16 se infiere que las coordenadas UTM, elevaciones, longitudes de cauce y tiempo de concentración aportan de manera positiva a la primera dimensión. Por otra parte, los parámetros de pendiente y Curva Número (CN) son las que más aportes realizan a la segunda dimensión, y ambas de forma positiva. Dado que la forma en que se agrupan todas las variables en el PCA es similar a la que se muestra, para la misma cuenca, en la Figura 5.12, es posible descartar del Análisis

de Componentes Principales, a aquellas variables que puedan ser representadas por medio de otras variables, o que estén implícitamente expresadas dentro de ellas, por ejemplo, la pendiente, la cual está asociada al parámetro de Curva Número por medio de una fórmula [7].

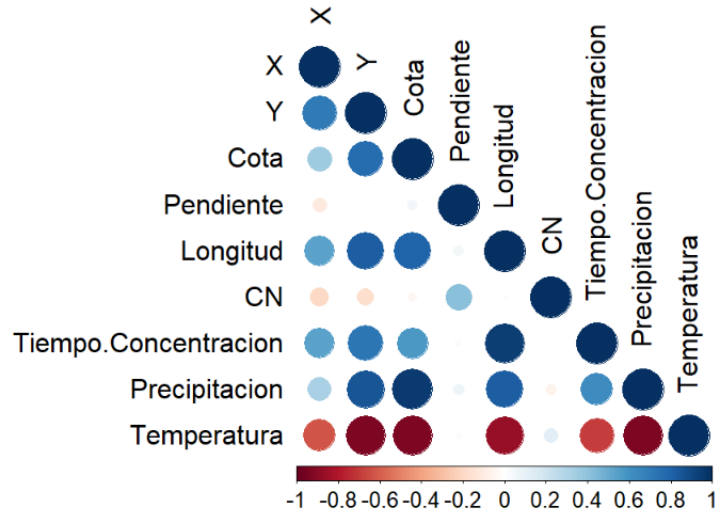


Figura 6.15. Gráfico de correlaciones para conjunto expandido de variables (Purén).

Tabla 6.1. Resumen de datos del Análisis de Componentes Principales para el conjunto expandido de variables, primeras 5 dimensiones (Purén).

	Dim 1	Dim 2	Dim 3	Dim 4	Dim 5
Varianza [%]	60,75	16,59	9,15	6,85	1,49
<i>Variables</i>	Contribución a cada dimensión [%]				
X	7,47	6,95	42,99	6,81	17,48
Y	16,34	0,45	0,62	2,44	2,48
Cota	14,42	1,02	17,16	0,04	3,31
Pendiente	0,01	44,54	1,25	48,49	5,4
Longitud	16,29	0,68	1,14	4,64	11,56
CN	0,25	45,05	5,82	27,29	20,96
Tiempo Conc.	12,4	0,22	12,67	9,52	33,41
Precipitación	15,27	1,08	16,9	0,03	0,43
Temperatura	17,55	0,01	1,45	0,74	4,97

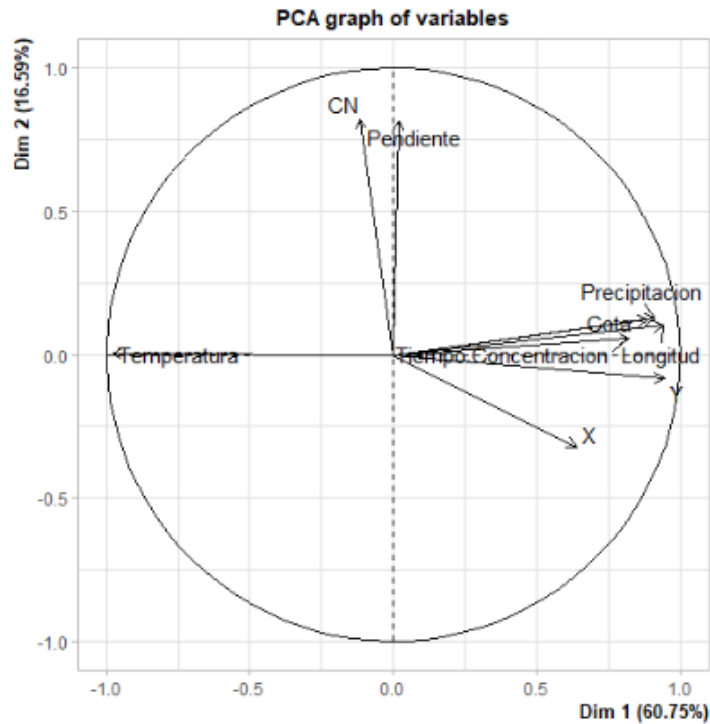


Figura 6.16. Variables utilizadas para realizar el Análisis de Componentes Principales, graficados sobre las primeras dos dimensiones.

### 6.2.2. Sensibilidad con respecto al tiempo de concentración (Purén)

Existen diversas fórmulas para determinar el valor del tiempo de concentración, con distintos parámetros de entrada y/o limitaciones, en la mayoría de los casos, asociadas a la superficie de la cuenca o longitudes de cauces [2]. En primera instancia, se utilizó en este trabajo una abstracción de la fórmula de Kirpich, descrita en (50). A modo comparativo, se definen en la Tabla 6.2 tres fórmulas distintas para el cálculo del tiempo de concentración.

Tabla 6.2. Fórmulas para el tiempo de concentración.

Autor	Fórmula	Consideraciones
Témez [41]	$t_c = 18 \left( \frac{L}{S^{0.25}} \right)^{0.75}$	$L$ en [km], $S$ en [m/m], $t_c$ en [min].
Velocidad de Onda <sup>25</sup> 26 [2, 42, 43]	$t_c = \frac{2.784 \cdot L^{0.6} \cdot n^{0.6}}{S^{0.3}}$	$L$ en [m], $S$ en [m/m] y $n$ adimensional (Coef. De Manning)
Bransby-Williams [43]	$t_c = \frac{0,05013 \cdot L}{A^{0.1} \cdot S^{0.2}}$	$L$ en [m], $S$ en [m/m], $A$ en [km <sup>2</sup> ]

<sup>25</sup> La fórmula considera una componente asociada a intensidad de precipitación. Para simplificar el proceso se asumió una intensidad constante de 1 [mm/hr].

<sup>26</sup> Para efectos de simplificación de variables, y dadas las características de la cuenca, se asumió un coeficiente de rugosidad de Manning de 0.035 [33, 35].

La distribución de rangos de valores obtenidos para cada una de las fórmulas descritas previamente se indican en la Figura 6.17. Por su parte, la correlación entre los resultados obtenidos por cada fórmula con respecto a los obtenidos en primera instancia con la fórmula de Kirpich, sobre la cuenca de Río Purén se muestran en la Figura 6.18. Finalmente, la distribución de cada uno de los parámetros sobre dicha cuenca se muestran en la Figura 6.19.

Desde estas figuras se infiere que si bien, los rangos de valores del tiempo de concentración varían de manera considerable para cada fórmula por separado, conservan una alta correlación con respecto al parámetro obtenido por medio de Kirpich, con la salvedad de la fórmula de Bransby-Williams. La alta variabilidad entre cada fórmula se debe a que cada fórmula es efectiva para cierto rango de áreas y/o longitudes de cauce. A modo de ejemplo, si se considera el punto más lejano a la salida de la cuenca ( $L: 37809,47$  [m],  $\Delta h=1211$  [m]), por medio de la fórmula de Kirpich se obtiene un tiempo de concentración de 245 [min], mientras que ese mismo punto, por medio de la fórmula de Témez, se obtiene un tiempo de concentración de 523 [min], aproximadamente.

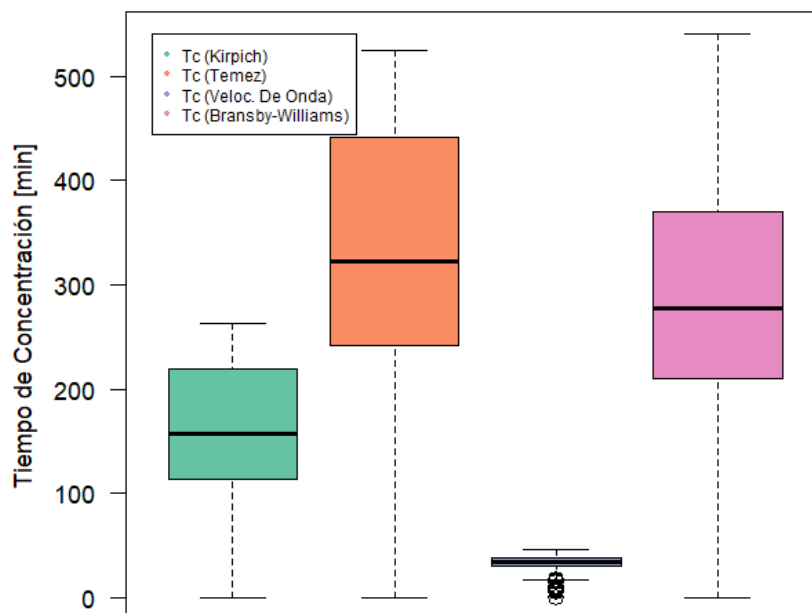


Figura 6.17. Rangos de valores de tiempos de concentración.

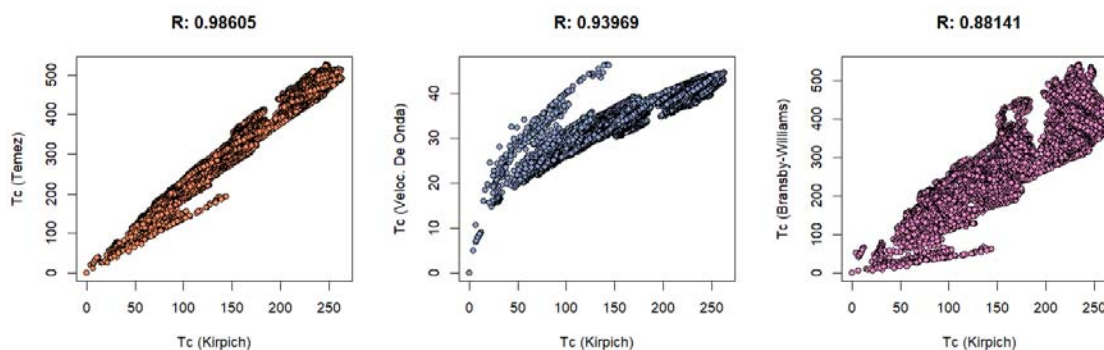


Figura 6.18. Correlación entre valores de tiempos de concentración con respecto a fórmula de Kirpich.

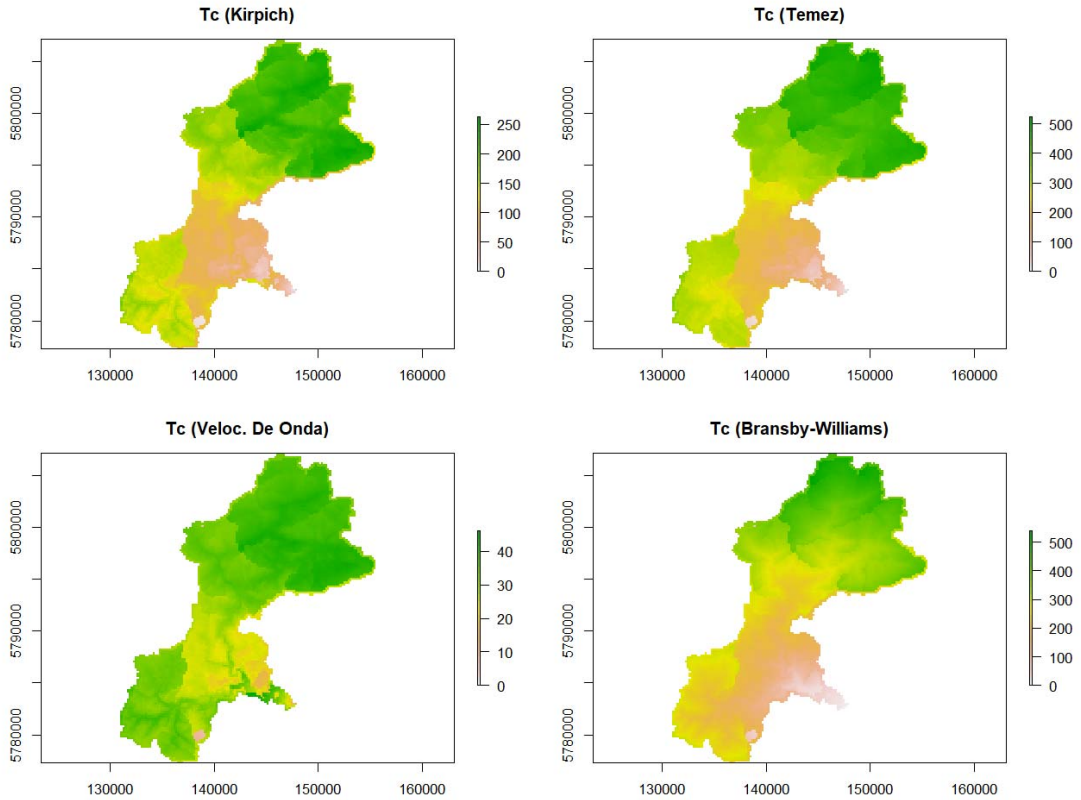


Figura 6.19. Distribución del tiempo de concentración para cada fórmula, sobre la cuenca del Río Purén.

Considerando la distribución del tiempo de concentración creado por la fórmula de velocidad de onda, se procede a determinar un óptimo de HRU por medio de la herramienta de Agrupamiento Jerárquico de Componentes Principales (HCPC). Para este nuevo escenario, el número óptimo de HRU sigue siendo dos unidades, las que se distribuyen como se muestra en la Figura 6.20. La descripción de los HRU en términos de sus parámetros se describen desde la Figura 6.21 a la Figura 6.24. Desde dichas figuras se puede inferir que, en primera instancia, un cambio en la forma en la cual se pueda definir el tiempo de concentración dentro de la cuenca no afecta de modo significativo el cómo se delinean, y describen los HRU sobre la superficie de la cuenca.

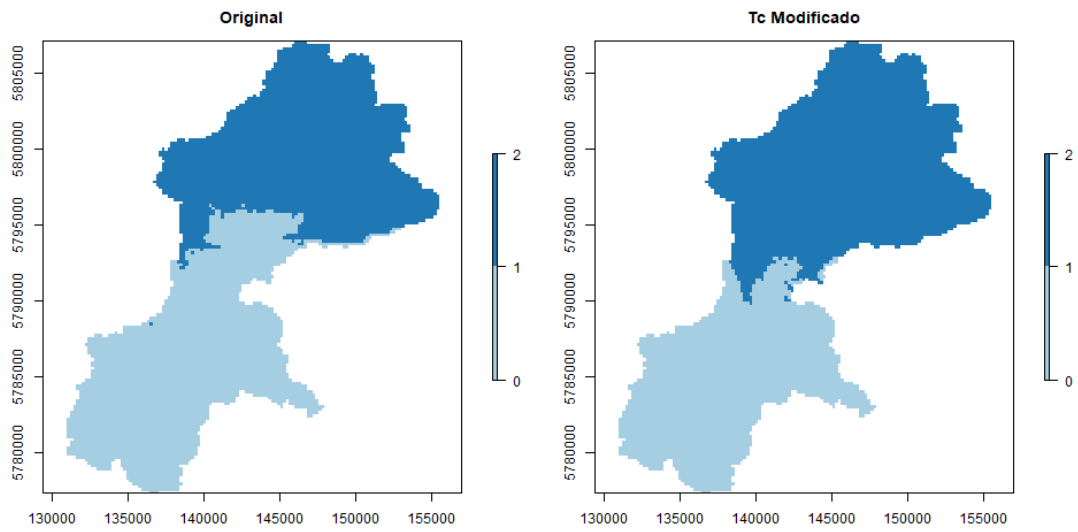


Figura 6.20. Variación en la distribución de los HRU sobre la cuenca del Río Purén debido a cambios en la fórmula de tiempo de concentración.

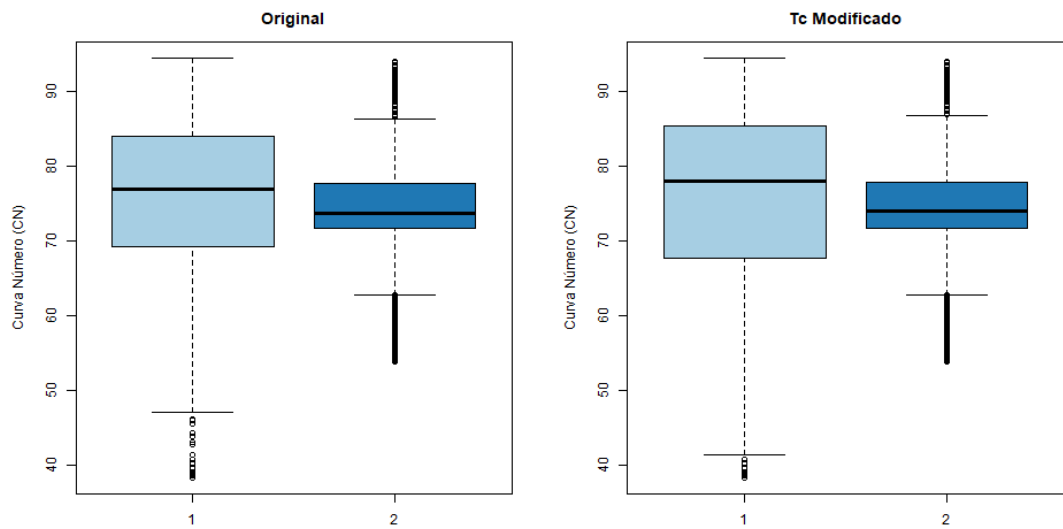


Figura 6.21. Descripción de los HRU para escenarios A) Original; B) Modificado, por medio de la distribución del parámetro CN.

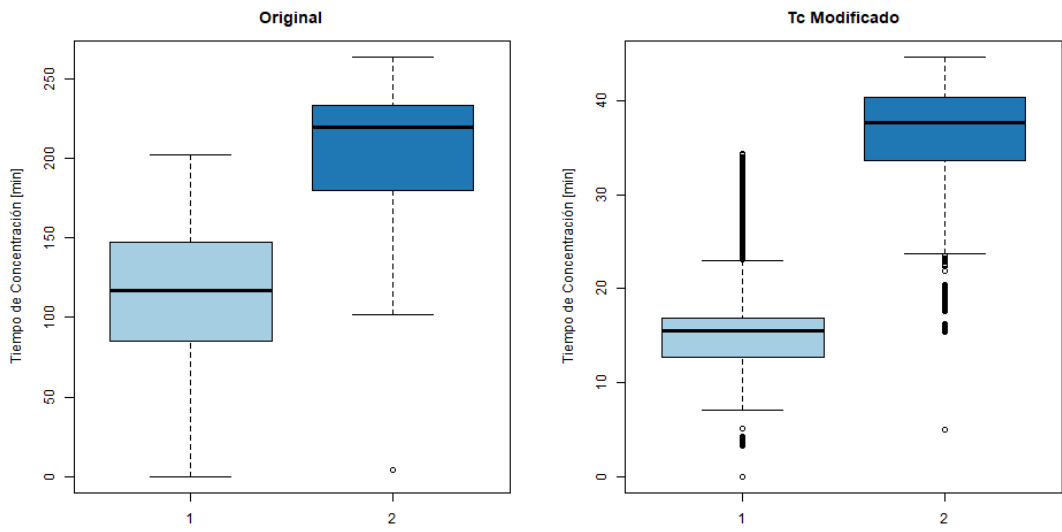


Figura 6.22. Descripción de los HRU para escenarios A) Original; B) Modificado, por medio de la distribución del tiempo de concentración.

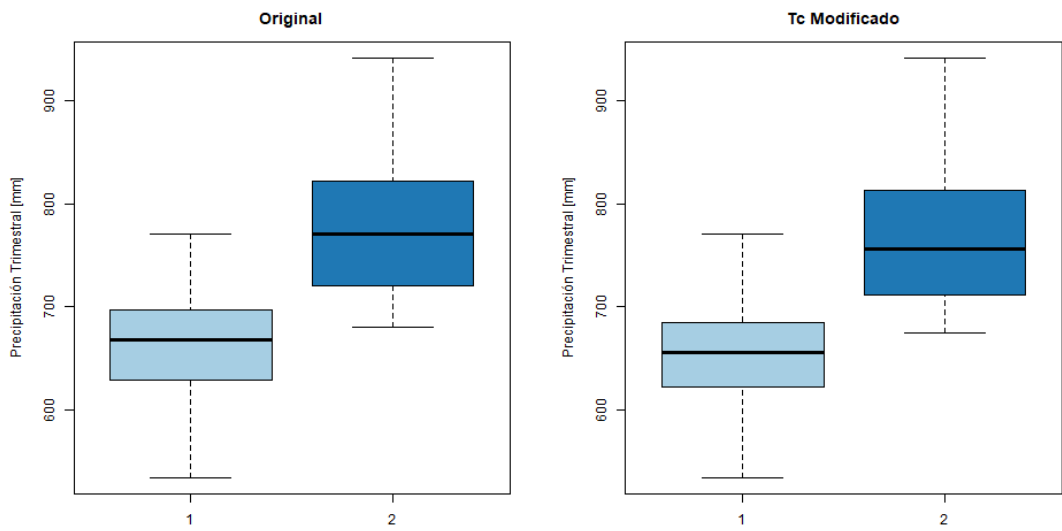


Figura 6.23. Descripción de los HRU para escenarios A) Original; B) Modificado, por medio de la distribución de Precipitación.

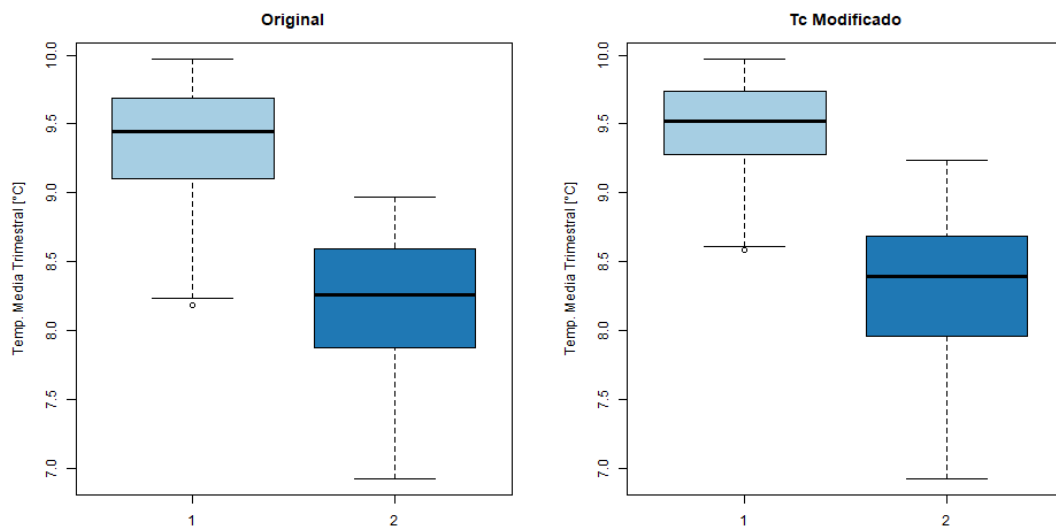


Figura 6.24. Descripción de los HRU para escenarios A) Original; B) Modificado, por medio de la distribución de Temperatura.

### 6.2.3. Sensibilidad con respecto al valor de Curva Número (CN, Purén)

Otro factor asociado a una alta incertidumbre corresponde al valor de Curva Número. De acuerdo a la fórmula (51) definida por Savvidou *et al.* [7], dicho valor es dependiente de las características geológicas, topográficas, y de vegetación de la cuenca.

Este último apartado concentra el interés de este análisis, ya que las observaciones realizadas en el Mapa de Cobertura de Suelos [13] se remiten a un intervalo de tiempo acotado, y puede obviarse algún comportamiento en particular (vegetación perenne, por ejemplo). Junto con ello, pueden ocurrir procesos *a posteriori* que puedan afectar considerablemente las coberturas vegetales, como lo son el manejo de plantaciones forestales (talas sectorizadas de bosque), así como la ocurrencia de incendios forestales.

Estos eventos en particular, no solo alteran la vegetación de modo abrupto [44], sino que provocan a nivel local, fenómenos de erosión del suelo, con sus respectivos cambios al escurrimiento e infiltración [45].

Bajo esta premisa, se plantea un escenario en la cuenca del Río Purén, donde se “reemplaza” la totalidad de la vegetación de matorrales (65% de la superficie), por tierras desnudas. La Figura 6.25 muestra la distribución de las categorías vegetales asociadas a matorrales y pastizales. Por su parte, la Figura 6.26 muestra las variaciones en el parámetro de Curva Número antes y después del reemplazo de categoría.

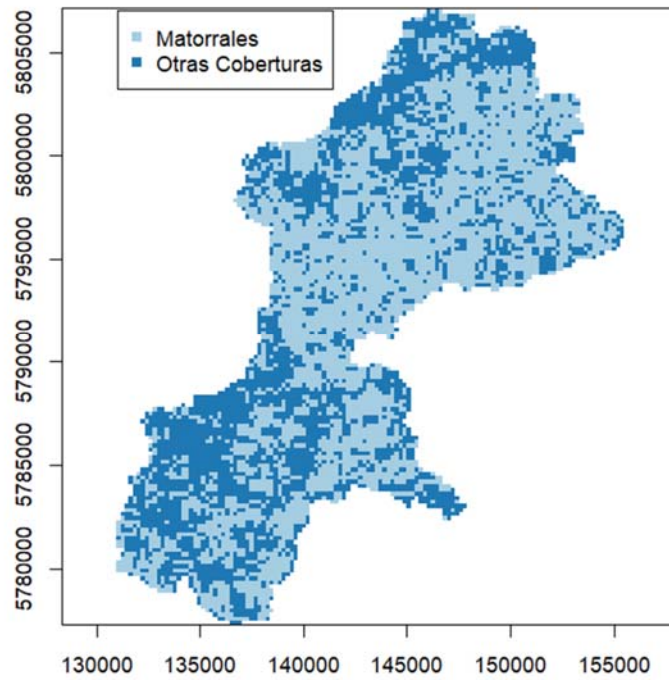


Figura 6.25. Distribución de matorrales sobre la cuenca del Río Purén.<sup>27</sup>

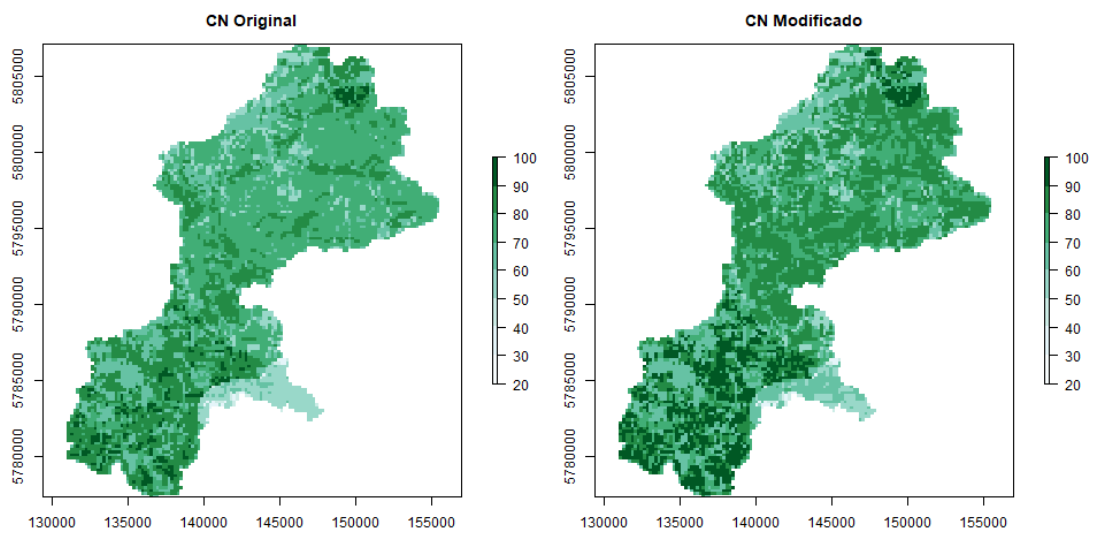


Figura 6.26. Variaciones sobre la distribución del parámetro CN sobre la cuenca del Río Purén debido a cambios en la cobertura vegetal.

<sup>27</sup> Fuente: [11]

Con esta variación del parámetro CN se procede a delinear los HRU, del mismo modo y en el mismo número de unidades definido en la sección 5.3. La descripción de los HRU sobre la superficie de la cuenca se indica en la Figura 6.27, mientras las descripciones de cada HRU en términos de los parámetros que los componen, para ambos casos, se describen desde la Figura 6.28 hasta la Figura 6.31.

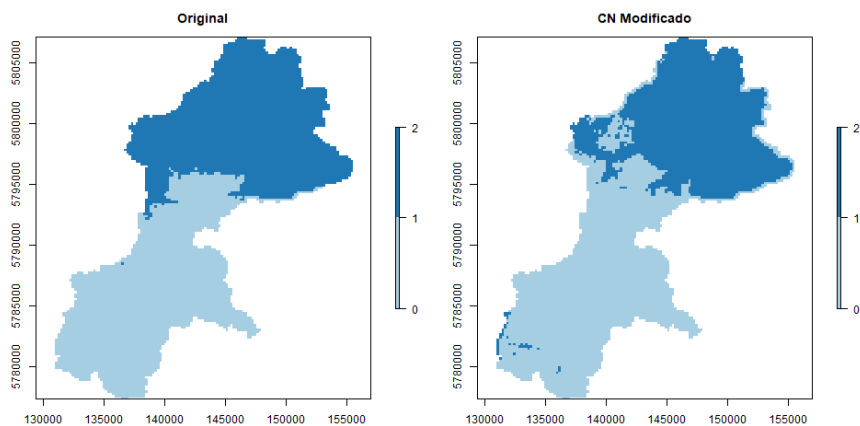


Figura 6.27. Variación sobre la distribución de los HRU sobre la cuenca del Río Purén debido a cambios en la cobertura vegetal.

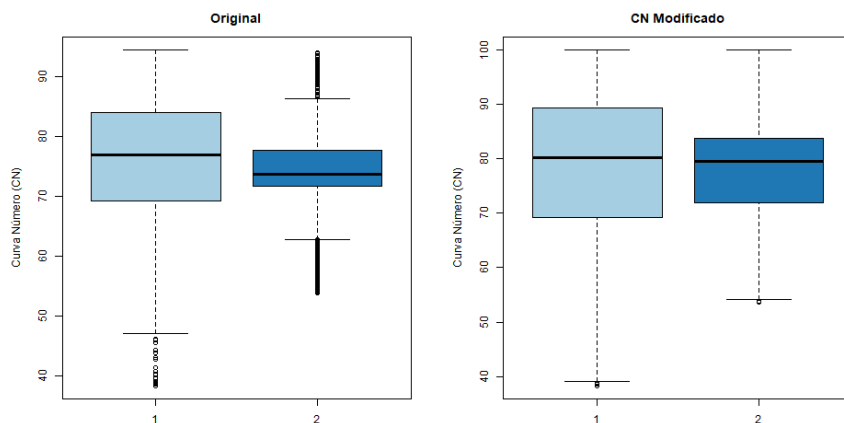


Figura 6.28. Descripción de los HRU para escenarios A) Original; B) Modificado, por medio de la distribución del parámetro CN.

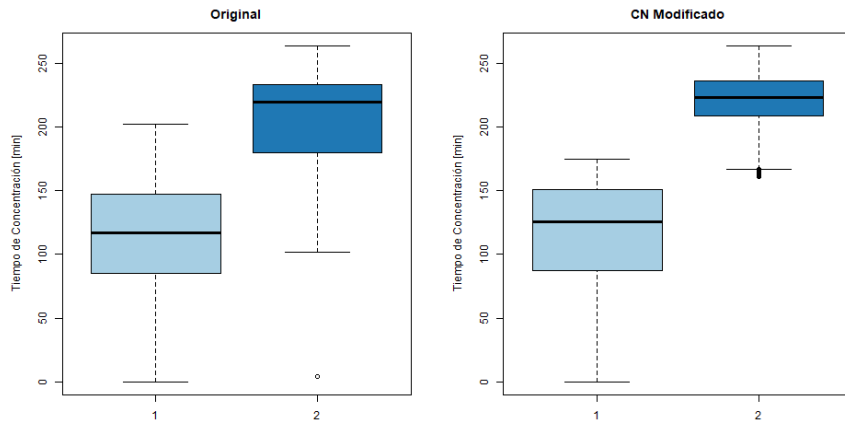


Figura 6.29. Descripción de los HRU para escenarios A) Original; B) Modificado, por medio de la distribución del tiempo de concentración.

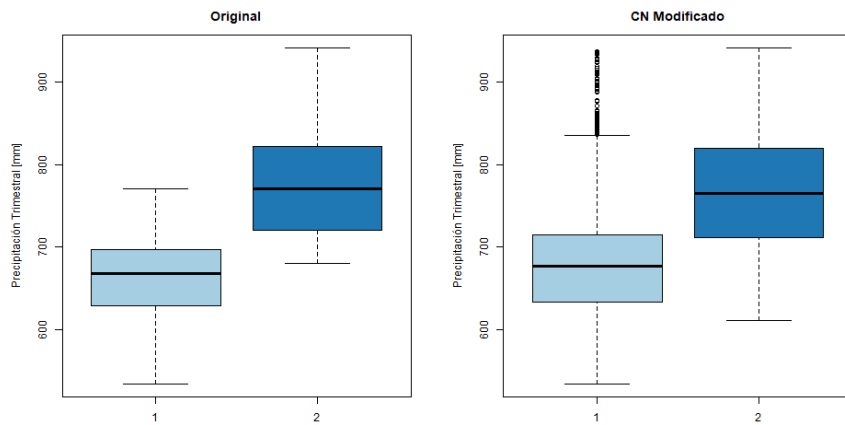


Figura 6.30. Descripción de los HRU para escenarios A) Original; B) Modificado, por medio de la distribución de Precipitación.

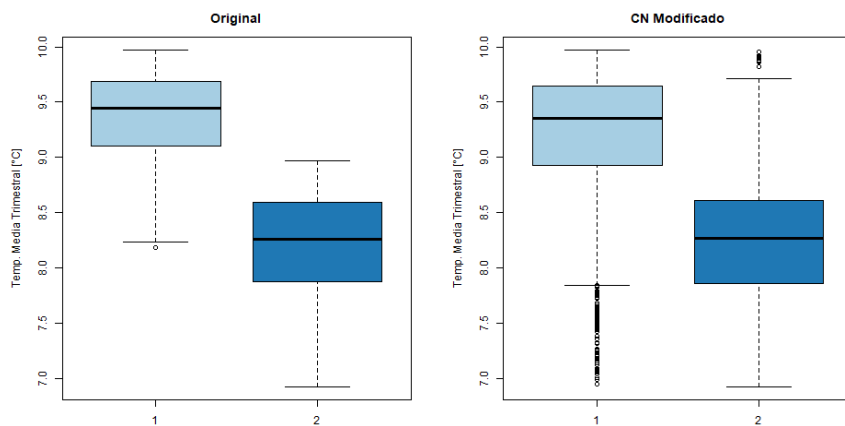


Figura 6.31. Descripción de los HRU para escenarios A) Original; B) Modificado, por medio de la distribución de Temperatura.

Desde el conjunto de gráficos mostrados, se infiere que, en primera instancia, la variación en el delineamiento de los HRU sobre la cuenca, mostrado en la Figura 6.27, no implica, de modo significativo, una variación en la forma en que los HRU son descritos por medio del conjunto de sus parámetros, con la salvedad de un aumento de dispersión en las variables meteorológicas (ver Figura 6.30 y Figura 6.31). No obstante, para este proceso de delineamiento se asumió que el número óptimo de HRU era el mismo en ambos casos. En el escenario con modificaciones al CN, se determinó que el número óptimo de HRU corresponde a tres unidades, las cuales se describen en la cuenca como muestra en la Figura 6.32, mientras que la descripción de cada HRU en términos de sus parámetros se muestra en la Figura 6.33.

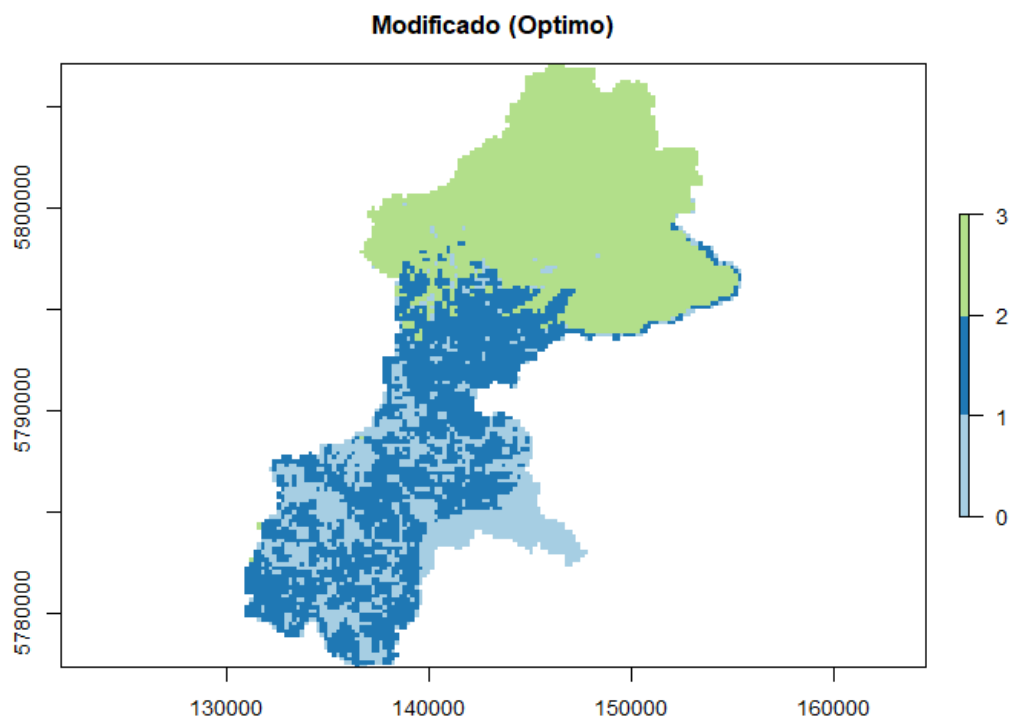


Figura 6.32. Distribución de cantidad óptima de HRU sobre la cuenca del Río Purén para escenario de variación de coberturas vegetales.

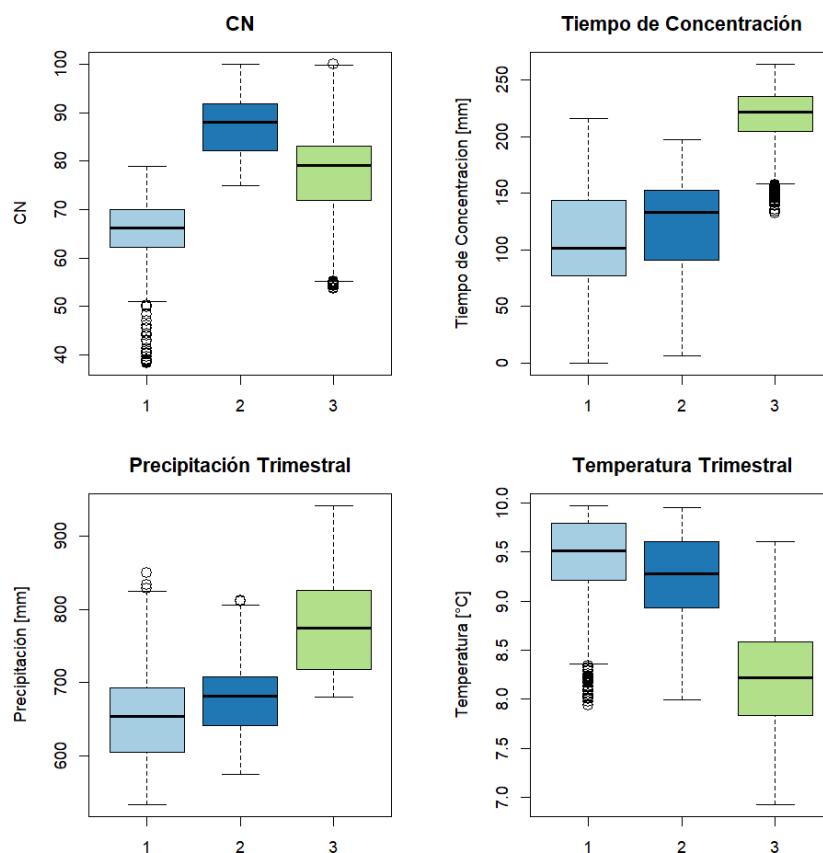


Figura 6.33. Descripción de cantidad óptima de HRU para escenario de cambio de coberturas vegetales, en términos de sus parámetros.

A) CN; B) Tiempo de Concentración; C) Precipitación; D) Temperatura.

#### 6.2.4. Escenario especial: Variaciones sobre CN y tiempo de concentración (Purén)

Se considera, como parte del análisis de sensibilidad, un escenario donde se distorsionan en simultáneo, los parámetros de Curva Número y de tiempo de concentración, de modo de observar potenciales cambios en la cantidad y forma de los HRU dentro de la cuenca. Para ello, se considera:

- La modificación de la distribución del parámetro CN será la misma que la definida en la sección 6.2.3: Se reemplazan las superficies cubiertas por matorrales por tierras desnudas.
- El tiempo de concentración queda definido por la fórmula de Velocidad de Onda (ver Tabla 6.2).

Tomando en cuenta estas variables, se determina un nuevo valor óptimo de HRU, correspondiente a cuatro unidades. La distribución de cada HRU sobre la cuenca se muestra en la Figura 6.34, mientras que la descripción de cada HRU en términos de las variables que lo componen se muestra en la Figura 6.35. Desde esta última figura, se tiene que cada HRU está bien definido con respecto a los demás; habiendo al menos un parámetro con el cual no comparte rangos con las demás unidades.

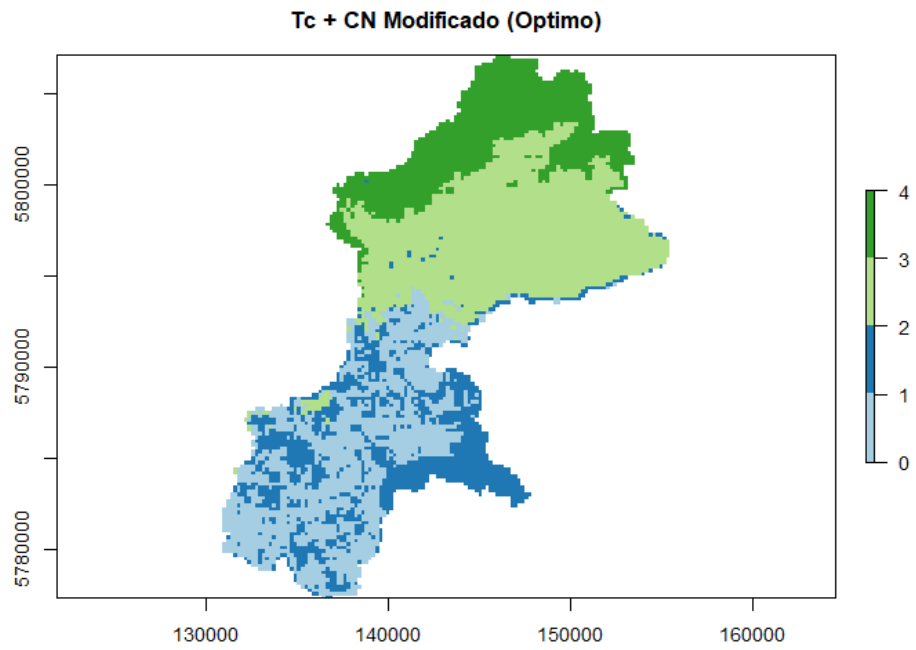


Figura 6.34. Distribución de los HRU sobre la cuenca del Río Purén debido a cambios de los parámetros de CN y tiempo de concentración.

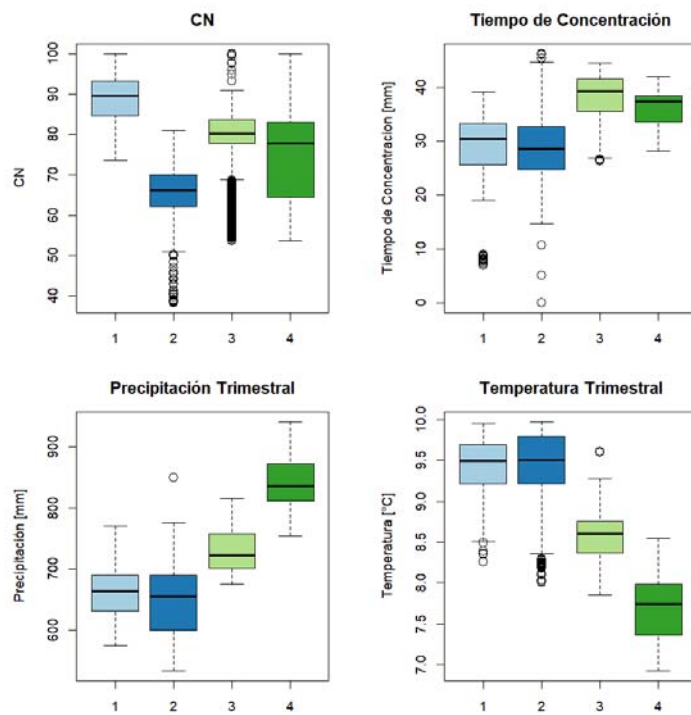


Figura 6.35. Descripción de cantidad óptima de HRU para escenario especial, en términos de sus parámetros.

## CAPITULO VII

### 7. Conclusiones

#### 7.1. Sobre los modelos, métodos y resultados

Del conjunto de modelos ejecutados para ambas tormentas de interés, y del conjunto de resultados obtenidos, se establecen las siguientes conclusiones:

Se logró definir de modo satisfactorio un conjunto de modelos hidrológicos, considerando las características geomorfológicas, meteorológicas y de vegetación de las cuencas. Asimismo, el proceso de delineamiento de HRU por medio de PCA/HCPD [8], es igualmente satisfactorio, obteniendo unidades correctamente delimitadas y descritas por medio de sus parámetros. Una recomendación a futuro sobre este apartado consistiría en distribuir un peso mayor sobre aquellos parámetros que puedan considerarse más decisivos.

Con respecto a los resultados de los procesos de calibración y validación, en general, los valores de los indicadores de eficiencia son buenos (mayores a 0.6 en todos los casos). Si bien en ambas cuencas, los modelos con cantidades óptimas de HRU tienen eficiencias levemente menores en comparación con un modelo integrado, considerando los índices de Nash-Sutcliffe [1] y Kling-Gupta [40]. No obstante, estas variaciones se compensan a nivel cualitativo, es decir, se puede describir el aporte de cada zona con características particulares (por medio de su respectiva HRU) a la crecida resultante. Por otra parte, en los modelos con unidades distintas, la eficiencia, en general, disminuye de modo considerable.

Especial atención se puso sobre el método de escorrentía y precipitación efectiva del SCS [2, 15]. Dicho método, es, en la práctica, muy simple, por lo que existe un conjunto de sub-procesos hidrológicos que no son representados correctamente. La mayor desventaja de este método se da en la incapacidad del método de trabajar con cuencas que tengan una importante componente nival, ya sea temporal o permanente (glaciares), lo cual, junto con la falta de información consistente, redujo considerablemente el espectro de cuencas disponibles a utilizar.

No obstante, dicho método es altamente sensible a cambios a nivel de coberturas vegetales, sobre todo si se considera el planteamiento realizado por Savvidou *et al.* [7] para la definición del parámetro Curva Número. Teniendo esto en cuenta, se pueden plantear escenarios donde se registren variaciones en la cobertura vegetal de la cuenca, ya sea a modo estacional, o por factores antrópicos, como lo son las talas de bosque, cambios de uso de suelo agrícola, urbanizaciones o incendios forestales [44]. Estos escenarios pueden influir en la forma en la cual se delimitan los HRU, describiendo nuevas unidades con comportamientos diferentes.

#### 7.2. Comentarios finales

Se debe considerar que en el presente estudio no fue posible representar las cuencas de Pocuro y Purén con un mayor número de tormentas. Esto se debe a que el conjunto de estaciones meteorológicas y pluviométricas utilizadas durante el estudio contienen vacíos de información, o información que no fue observada correctamente, debido a extrapolaciones en curvas de caudales o problemas en la sensibilidad de los instrumentos de medición (en especial, pluviógrafos).

Asimismo, la información meteorológica disponible en la salida de cada cuenca (o en sus cercanías) no es, necesariamente, representativa de toda la cuenca, sobre todo si la superficie de la cuenca es considerablemente grande. Se recomienda, para estos casos, contar con alguna estación dentro de la cuenca, que cuente con información meteorológica continua y consistente, o, en otro caso, recurrir al uso de productos grillados (NetCDF) a nivel horario.

Es necesario destacar que previo a la modelación hidrológica en HEC-HMS, se requirió manipular en RStudio, un conjunto de datos e información desde múltiples fuentes, como el Balance Hídrico Nacional, Mapa Geológico de Chile, Mapa de Cobertura de Suelos, entre otros [11, 12, 13, 27, 38, 39], cada uno de ellos con cierto grado de incertidumbre, lo cual generó un nivel de incertidumbre complejo de cuantificar, lo cual repercute a su vez en los resultados finales.

Finalmente, para trabajos posteriores se recomienda trabajar con un procesador que posea una mayor capacidad al momento de manipular gran cantidad de datos en la calibración del modelo.

## CAPÍTULO VIII

### 8. Referencias

- [1] B. Hingray, C. Picouet y A. Musy, *Hydrology: A science for engineers*, Boca Raton, FL: CRC Press, 2015.
- [2] V. Chow, D. Maidment y L. Mays, *Hidrología Aplicada*, Bogotá: McGraw-Hill, 1993.
- [3] D. Maidment, *Handbook of Hydrology*, New York, NY: McGraw-Hill, 1997.
- [4] A. Musy y C. Higy, *Hydrology: A Science of Nature*, New York, NY: CRC Press, 2011.
- [5] G. H. Leavesley, R. Lichty, B. M. Troutman y L. G. Saindon, *Precipitation-runoff modeling system; User's manual*, 1983.
- [6] 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, nº 3-4, pp. 423-436, 1995.
- [7] 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.
- [8] D. Poblete, J. Arevalo, O. Nicollis y F. Figueroa, «Optimization of the Hydrologic Response Units (HRU) using gridded meteorological data and spatially varying parameters,» *Water*, vol. 12, pp. 1-19, 2020.
- [9] F. Husson, S. Lê y J. Pagès, *Análisis de Datos con R*, Escuela Colombiana de Ingeniería, 2013.
- [10] F. Fouedjio, «A hierarchical clustering method for multivariate geostatistical data,» *Spatial Statistics*, vol. 18, pp. 333-351, 2016.
- [11] 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.
- [12] U. A. S. Team, «ASTER Global Digital Elevation Model v003,» [En línea]. Available: <https://lpdaac.usgs.gov/products/astgtmv003/>. [Último acceso: 2020 Junio 01].
- [13] J. Hernández, M. Galleguillos y C. Estades, *Mapa de Cobertura de Suelos de Chile 2014*, Laboratorio de Geomática y Ecología del Paisaje, Facultad de Ciencias Forestales y Conservación de la Naturaleza, Universidad de Chile, 2016.
- [14] C. A. Young, M. I. Escobar-Arias, M. Fernandes, B. Joyce, M. Kiparsky, J. F. Mount, V. K. Mehta, D. Purkey, J. H. Viers y D. Yates, «Modeling the hydrology of climate change in California's Sierra Nevada for subwatershed scale adaptation,» *Journal of the American Water Resources Association*, vol. 45, nº 6, pp. 1409-1423, 2009.
- [15] A. Feldman, *Hydrologic Modeling System HEC-HMS: Technical Reference Manual*, Davis, CA: U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center (HEC), 2000.

- [16] J. Strikwerda, *Finite Difference Schemes and Partial Differential Equations*, Philadelphia, PA: Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM), 2004.
- [17] A. Akan, *Open Channel Hydraulics*, Burlington, MA: Butterworth-Heinemann, 2006.
- [18] B. S. Barnes, «The structure of discharge recession curves,» *Trans. Am. Geophys. Union*, n° 20, pp. 721-725, 1939.
- [19] M. D. Bako y A. Owoade, «Field Application of a Numerical Method for the derivation of Baseflow Recession Constant,» *Hydrological Processes*, vol. 2, pp. 331-336, 1988.
- [20] R. M. Vogel y C. N. Kroll, «Estimation of Baseflow Recession Constants,» *Water Resources Management*, vol. 10, n° 4, pp. 303-320, 1996.
- [21] T. Davie, *Fundamentals of Hydrology*, New York, NY: Routledge, 2008.
- [22] CR2, «Productos Grillados: NetCDF,» [En línea]. Available: <http://www.cr2.cl/datos-productos-grillados/>. [Último acceso: 23 Octubre 2020].
- [23] C. Taylor y W. Alley, «Ground-water-level monitoring and the importance of long-term water data,» *Geological Survey (USGS)*, vol. 1217, 2001.
- [24] H. Beck, A. van Dijk, V. Levizzani, J. Schellekens, D. Miralles, B. Martens y A. de Roo, «MSWEP: 3-hourly 0.25 global gridded precipitation (1979-2015) by merging gauge, satellite, and reanalysis data.,» *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 21, n° 1, 2017.
- [25] DGA, «Manual de Cálculo de Crecidas y Caudales Mínimos en Cuencas Sin Información Fluviométrica,» 1995.
- [26] MINVU, *Guía de Diseño y Especificaciones de Elementos Urbanos de Infraestructura de Aguas Lluvias*, Santiago, 2005.
- [27] SERNAGEOMIN, «Mapa Geológico de Chile: Versión Digital,» Servicio Nacional de Geología y Minería, Oublicación Geológica Digital No. 4, Santiago, 2003.
- [28] H. H. Dürr, M. Meybeck y S. H. Dürr, «Lithologic composition of the Earth's continental surfaces derived from a new digital map emphasizing riverine material transfer,» *Global Biochemical Cycles*, vol. 19, 2005.
- [29] T. Gleeson, L. Smith, N. Moosdorf, J. Hartmann, H. Dürr, A. Manning, L. van Beek y A. Jellinek, «Mapping permeability over the surface of the Earth,» *Geophysical Research Letters*, vol. 38, 2011.
- [30] C. Fetter, *Applied Hydrogeology*, Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 2001.
- [31] Y. Zhao, D. Feng, L. Yu, X. Wang, Y. Chen, Y. Bai, H. Hernández, M. Galleguillos, C. Estades, 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.
- [32] A. Di Gregorio, *Land Cover Classification System: Classification concepts and user manual*, Food and Agriculture Organization (FAO), 2005.

- [33] D. Rosgen, *Applied River Morphology*, Pagosa Springs, Colorado: Wildland Hydrology, 1996.
- [34] E. Tarbuck y F. Lutgens, *Ciencias de la Tierra: Una introducción a la geología física*, Madrid: Pearson Educación S.A., 2005.
- [35] H. Barnes, «Roughness Characteristics of Natural Channels,» *U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 1849*, 1967.
- [36] L. Kaufman y P. Rousseeuw, *Finding Groups in Data: An Introduction to Cluster Analysis*, New York, NY: John Wiley & Sons, 1990.
- [37] P. Sarricolea, H.-O. M.J. y O. Meseguer-Ruiz, «Climatic regionalisation of continental Chile,» *Journal of Maps*, vol. 13, nº 2, pp. 66-73, 2016.
- [38] C. Alvarez-Garretón, P. Mendoza, J. Boisier, N. Addor, M. Galleguillos, M. Zambrano-Bigiarini, A. Lara, C. Puelma, G. Cortés, R. Garreaud, J. McPhee y A. Ayala, «The CAMELS-CL dataset: catchment attributes and meteorology for large sample studies – Chile dataset,» *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 22, nº 11, pp. 5817-5846, 2018.
- [39] I. d. I. A. Ministerio de Agricultura, «Agromet,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.agromet.cl/datos-historicos>. [Último acceso: 23 Septiembre 2020].
- [40] 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, nº 1, pp. 80-91, 2009.
- [41] J. Témez, *Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales, España: Dirección General de Carreteras*, 1978.
- [42] J. Perdikaris, B. Gharabaghi y R. Rudra, «Reference Time of Concentration Estimation for Ungauged Catchments,» *Earth Science Research*, vol. 7, nº 2, pp. 58-73, 2018.
- [43] R. S. Gupta, *Hydrology & Hydraulic Systems*, 4 ed., Long Grove, IL: Waveland Press, 2017.
- [44] P. González Uribarry, «Impacto de los incendios forestales en suelo, agua, vegetación y fauna,» *Biblioteca del Congreso Nacional de Chile*, 2017.
- [45] X. Ubeda y P. Sarricolea, «Wildfires in Chile: A review,» *Global and Planetary Change*, vol. 143, pp. 152-161, 2016.