



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO
INSTITUTO INTERAMERICANO DE TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DEL AGUA

**MODELACIÓN HIDROLÓGICA CON CEQUEAU Y SWAT
PARA LA EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL
USO/COBERTURA DEL SUELO EN EL CAUDAL DE LA
CUENCA DEL RÍO GARAGOA, COLOMBIA**

TESIS

que para obtener el grado de
Maestra en Ciencias del Agua

Presenta:

ING. KAROL NATALIA PIÑEROS DUEÑAS

Tutor académico:

DR. MIGUEL ANGEL GÓMEZ ALBORES

Tutores adjuntos:

DR. CARLOS ROBERTO FONSECA ORTIZ

DR. KHALIDOU MAMADOU BÂ

Toluca, Estado de México

Septiembre, 2024



RESUMEN

El cambio del uso y cobertura del suelo (UCS) puede causar impactos en las características hidrológicas de las cuencas. Estos impactos presentan una gran variabilidad espacial en la magnitud y el tipo de impacto que generan ya sea positivo o negativo dependiendo del cambio específico de UCS y las características climatológicas de la cuenca. En esta tesis, se realizó modelación hidrológica utilizando los modelos CEQUEAU y SWAT para evaluar el impacto del uso y cobertura del suelo en el caudal de la cuenca del río Garagoa, ubicada en el departamento de Boyacá, Colombia.

La modelación hidrológica se realizó a partir de datos de precipitación observada y datos de precipitación del producto satelital CHIRPS del periodo 1981-2022, es importante mencionar que se realizó la validación de este producto y la del producto IMERG, obteniéndose para el producto CHIRPS a nivel mensual resultados favorables, mientras que para el producto IMERG resultados desfavorables, por lo que únicamente para datos satelitales de precipitación se consideraron los datos de CHIRPS. Los escenarios de uso y cobertura del suelo empleados en las modelaciones correspondieron a los mapas de UCS del año 2000, 2018 y 2050, el cual se generó en el módulo de predicción de cambio del *Land Change Modeler* (LCM) de TerrSet.

Las simulaciones hidrológicas en ambos modelos se ejecutaron para el periodo 1983-2022, la calibración se realizó para el periodo 1983-2008 y la validación para el periodo 2009-2022. En el proceso de calibración y validación para ambos modelos se utilizaron las simulaciones obtenidas de los datos de precipitación observada y UCS del año 2000, evaluándose con el criterio de eficiencia *Nash-Sutcliffe* (NSE). En la calibración del modelo CEQUEAU se obtuvo un valor de NSE mensual de 0.88 y en la calibración del modelo SWAT un NSE de 0.84. En la validación, los valores de NSE fueron de 0.78 para el modelo CEQUEAU y 0.74 para el modelo SWAT. En las simulaciones hidrológicas utilizando datos de precipitación observada y UCS del año 2018 y 2050, para todo el periodo de simulación (1983-2022) se obtuvieron valores de NSE de 0.85 para CEQUEAU y de 0.81 para SWAT.

Para las simulaciones hidrológicas utilizando los datos de precipitación CHIRPS (periodo 1983-2022) se obtuvo un NSE mensual de 0.74 para los tres escenarios de uso y cobertura del suelo (2000, 2018 y 2050), a excepción de la simulación para el año 2050 con SWAT, en la que se obtuvo un NSE de 0.75.



Con los resultados obtenidos de las modelaciones, fue posible identificar una tendencia de aumento en el caudal de la cuenca para los periodos de análisis 2000-2018 y 2018-2050. En las simulaciones con CEQUEAU, en términos de porcentaje de cambio promedio a nivel diario, durante el periodo 2000-2018, el caudal mostró un incremento del 1.14 % y para el periodo 2018-2050 se espera que el caudal incremente un 0.59 %, mientras que, en las simulaciones con SWAT, durante el periodo 2000-2018, el caudal mostró un incremento del 1.66 % y para el periodo 2018-2050 se espera que el caudal incremente un 0.98 %. Considerando únicamente la cobertura de bosque, para el periodo 2000-2018, esta cobertura disminuyó un 45.5 % en la cuenca y para el periodo 2018-2050 según la proyección, la cobertura de bosque disminuirá un 43.1 %, esto explica porque durante el periodo 2000-2018 se presentó un mayor porcentaje de incremento de caudal, permitiendo concluir que a medida que se pierde cobertura boscosa, el caudal en la cuenca aumenta, observándose que las áreas con mayor cobertura forestal contribuyen a una mayor retención y regulación del agua.

En general, ambos modelos presentaron un buen rendimiento en la simulación de los caudales de la cuenca del río Garagoa, la eficiencia de las modelaciones a nivel mensual de acuerdo con los criterios estadísticos de Moriasi et al. (2015) fue “muy buena” y “buena”, por lo que tanto CEQUEAU como SWAT demostraron ser herramientas útiles para evaluar el impacto del uso y cobertura del suelo sobre el caudal del río Garagoa. Se concluye que ambos modelos proporcionan resultados similares en términos de simulación de caudales, sin embargo, la elección de un modelo u otro depende del equilibrio entre la precisión requerida, el objetivo del estudio, la disponibilidad de datos, y los recursos (tiempo y computacionales) disponibles.

Este trabajo es un aporte significativo al conocimiento del comportamiento hidrológico en la cuenca y sus resultados son potencialmente útiles en la toma de decisiones para la gestión integrada del recurso hídrico y del suelo en la región.



ÍNDICE DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES.....	2
2.1. Influencia del cambio de uso y cobertura del suelo en el rendimiento hídrico.....	2
2.2. El recurso hídrico en Colombia	3
2.3. Uso y cobertura del suelo en Colombia y el departamento de Boyacá.....	4
2.4. Modelos hidrológicos para determinar efectos de cambio de uso/cobertura del suelo en el rendimiento hídrico	5
2.5. Estudios que han realizado modelación con CEQUEAU	6
2.6. Estudios que han realizado modelación con SWAT	9
3. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS	12
3.1. Justificación contextual y científica.....	12
3.2. Objetivo general.....	13
3.3. Objetivos específicos	13
4. MARCO CONCEPTUAL.....	14
4.1. Morfometría de una cuenca	14
4.2. Uso y cobertura del suelo en Colombia.....	19
4.3. Análisis de cambios del uso y cobertura del suelo y proyección futura con TerrSet 22	
4.4. Productos satelitales de precipitación y temperatura.....	24
4.4.1. CHIRPS - Precipitación.....	24
4.4.2. IMERG - Precipitación.....	25
4.4.3. ERA5 - Indicadores agrometeorológicos desde 1979 hasta la actualidad derivados de reanálisis.....	25
4.5. Modelo hidrológico CEQUEAU.....	26
4.5.1. Descripción del modelo CEQUEAU.....	26
4.5.2. Estructura general del modelo CEQUEAU	31
4.5.3. Datos necesarios para la implementación del modelo CEQUEUAU.....	34
4.6. Modelo hidrológico SWAT.....	37
4.6.1. Descripción del modelo SWAT	37
4.6.2. Aplicación del modelo SWAT	45
5. METODOLOGÍA	47
5.1. Delimitación y caracterización de la zona de estudio	47



5.1.1.	Delimitación de la cuenca	47
5.1.2.	Ubicación	47
5.1.3.	Características sociodemográficas y económicas	48
5.1.4.	Relieve	50
5.1.5.	Clima.....	51
5.1.6.	Uso y cobertura del suelo.....	51
5.1.7.	Hidrografía de la cuenca	52
5.1.8.	Parámetros morfométricos de la cuenca	53
5.2.	Datos hidrometeorológicos observados	56
5.3.	Productos satelitales de información meteorológica	58
5.3.1.	CHIRPS	59
5.3.2.	IMERG	60
5.3.3.	ERA5	61
5.3.4.	Validación de datos de precipitación CHIRPS e IMERG	62
5.4.	Análisis de cambio de uso y cobertura del suelo y proyección futura	62
5.4.1.	Mapas de uso y cobertura del suelo.....	63
5.4.2.	Análisis de cambios del uso y cobertura del suelo en la cuenca	63
5.4.3.	Escenario futuro de cambio de uso y cobertura del suelo	63
5.5.	Modelación hidrológica con CEQUEAU	65
5.5.1.	Preparación de datos de entrada al modelo	65
5.5.2.	Ejecución del modelo	66
5.5.3.	Calibración y validación del modelo	66
5.6.	Modelación hidrológica con SWAT.....	70
5.6.1.	Preparación de datos de entrada al modelo	70
5.6.2.	Ejecución del modelo	77
5.6.3.	Calibración y validación del modelo	78
5.7.	Análisis comparativo de los modelos hidrológicos CEQUEAU y SWAT	81
5.8.	Análisis del impacto del uso y cobertura del suelo en el rendimiento hídrico de la cuenca.....	82
6.	RESULTADOS	84
6.1.	Información hidrométrica.....	84
6.2.	Información meteorológica	87
6.2.1.	Precipitación observada	87
6.2.2.	Validación de datos de precipitación CHIRPS e IMERG	92



6.2.3.	Temperatura máxima y mínima.....	104
6.3.	Uso y cobertura del suelo (UCS).....	106
6.3.1.	Mapas históricos y actuales del uso y cobertura del suelo	106
6.3.2.	Análisis de cambios del uso y cobertura del suelo en la cuenca	109
6.3.3.	Escenario futuro de cambio de uso y cobertura del suelo	112
6.4.	Modelación hidrológica con CEQUEAU	118
6.4.1.	Simulaciones con parámetros iniciales en CEQUEAU	119
6.4.2.	Simulaciones con parámetros calibrados en CEQUEAU.....	123
6.5.	Modelación hidrológica con SWAT.....	138
6.5.1.	Simulaciones con parámetros iniciales en SWAT.....	141
6.5.2.	Simulaciones con parámetros calibrados en SWAT	143
6.6.	Comparación de los modelos hidrológicos CEQUEAU y SWAT	157
6.6.1.	Simulaciones a partir de datos de precipitación observada	157
6.6.2.	Simulaciones a partir de datos de precipitación CHIRPS	159
6.6.3.	Criterios estadísticos de evaluación de los modelos CEQUEAU y SWAT .	161
6.6.4.	Comparación gráfica de caudales mensuales observados y simulados con CEQUEAU y SWAT	165
6.7.	Impactos del uso y cobertura del suelo en el caudal de la cuenca	172
6.7.1.	Impactos del uso y cobertura del suelo en el caudal de la cuenca a partir de las simulaciones en CEQUEAU con datos de precipitación observada	172
6.7.2.	Impactos del uso y cobertura del suelo en el caudal de la cuenca a partir de las simulaciones en SWAT con datos de precipitación CHIRPS	174
7.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	178
7.1.	Datos hidrométricos	178
7.2.	Datos meteorológicos	179
7.3.	Cambio de uso y cobertura del suelo	180
7.4.	Modelación hidrológica.....	182
7.5.	Comparación de los modelos hidrológicos CEQUEAU y SWAT.....	185
7.6.	Impactos del uso y cobertura del suelo en el caudal de la cuenca	187
8.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	189
8.1.	Conclusiones	189
8.2.	Recomendaciones	192
	BIBLIOGRAFÍA	193



ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo A. Inventario de eventos climáticos ocasionados por fuertes precipitaciones - departamento de Boyacá	202
Anexo B. Eventos de lluvia registrados por las estaciones y CHIRPS e IMERG	204
Anexo C. Esquema de producción – Simulaciones con el modelo CEQUEAU	217
Anexo D. Balance hídrico de las simulaciones con el modelo SWAT	218
Anexo E. Evaluación mensual por año de los periodos de calibración y validación de los modelos CEQUEAU y SWAT según los criterios de evaluación recomendados por Moriasi et al. (2015)	224



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Superficies uso y cobertura del suelo para los periodos 2000-2002, 2005-2009, 2010-2012 y 2018 en Colombia (Adaptado de IDEAM, 2013)	5
Figura 4.1. Modelo de curvas hipsométricas del ciclo de erosión (Guerra & González, 2002)	16
Figura 4.2. Discretización de la cuenca en CEQUEAU. Adaptada de Morin & Paquet (1995)	27
Figura 4.3. Función de producción del modelo CEQUEAU. Adaptada de Morin & Paquet (1995).....	28
Figura 4.4. Función de transferencia del modelo CEQUEAU. Adaptada de Morin & Paquet (1995).....	29
Figura 4.5. Estructura general del modelo hidrológico CEQUEAU.....	31
Figura 4.6. Representación del ciclo hidrológico en SWAT (Uribe, 2010)	38
Figura 4.7. Representación movimientos del agua en SWAT (Uribe, 2010)	40
Figura 5.1. Proceso para delimitar la cuenca en TerrSet	47
Figura 5.2. Ubicación de la cuenca del río Garagoa	48
Figura 5.3. Municipios pertenecientes a la cuenca del río Garagoa.....	49
Figura 5.4. Elevaciones de la cuenca del río Garagoa.....	50
Figura 5.5. Zonificación climática de la cuenca del río Garagoa	51
Figura 5.6. Uso y cobertura del suelo en la cuenca del río Garagoa, año 2018.....	52
Figura 5.7. Hidrografía principal de la cuenca del río Garagoa	53
Figura 5.8. Metodología para obtener los parámetros morfométricos de la cuenca	54
Figura 5.9. Curva hipsométrica de la cuenca del río Garagoa	55
Figura 5.10. Perfil del cauce principal.....	55
Figura 5.11. Ubicación de las estaciones hidrometeorológicas en la cuenca.....	57
Figura 5.12. Proceso de descarga de datos CHIRPS	59
Figura 5.13. Ejemplo de visualización de imagen CHIRPS.....	59
Figura 5.14. Proceso de descarga de datos IMERG	60
Figura 5.15. Ejemplo de visualización de imagen IMERG.....	60
Figura 5.16. Proceso de descarga de datos ERA 5	61
Figura 5.17. Ejemplo de visualización de imagen ERA 5.....	62
Figura 5.18. Proceso de generación del mapa de uso y cobertura de suelo al año 2050	64
Figura 5.19. Estructura general del proceso de modelación con CEQUEAU	70
Figura 5.20. Proceso de modelación con SWAT a nivel de HRUs	81



Figura 6.1. Caudales medios diarios del río Garagoa (Periodo 1981-2022).....	84
Figura 6.2. Hidrograma medio diario interanual (1981-2022) del río Garagoa en El Caracol	85
Figura 6.3. Hidrograma medio mensual (1981-2022) del río Garagoa en El Caracol	85
Figura 6.4. Distribución de datos subseries mensuales de caudal.....	86
Figura 6.5. Precipitación diaria de las 16 estaciones de la cuenca, periodo 1981-2022...	89
Figura 6.6. Precipitación media mensual de las 16 estaciones de la cuenca, periodo 1981-2022	91
Figura 6.7. Distribución espacial de la precipitación media anual en la cuenca	92
Figura 6.8. Coeficiente de determinación (R^2) entre precipitación diaria de estaciones y píxeles de los productos satelitales. A) CHIRPS a nivel diario, B) CHIRPS a nivel mensual, C) IMERG a nivel diario y D) IMERG a nivel mensual.	94
Figura 6.9. Precipitación diaria para el periodo 2000-2022, estación Paramo rabanal y píxeles correspondientes a los productos satelitales	95
Figura 6.10. Precipitación diaria para el periodo 2000-2022, estación Valle grande y píxeles correspondientes a los productos satelitales	95
Figura 6.11. Precipitación diaria para el periodo 2000-2022, estación La Capilla aut y píxeles correspondientes a los productos satelitales	96
Figura 6.12. Precipitación diaria para el periodo 2000-2022, estación Umbita y píxeles correspondientes a los productos satelitales	96
Figura 6.13. Precipitación diaria para el periodo 2000-2022, estación Turmequé y píxeles correspondientes a los productos satelitales	97
Figura 6.14. Precipitación diaria para el periodo 2000-2022, estación Nuevo Colón y píxeles correspondientes a los productos satelitales	97
Figura 6.15. Precipitación diaria para el periodo 2000-2022, estación Garagoa y píxeles correspondientes a los productos satelitales	98
Figura 6.16. Precipitación diaria para el periodo 2000-2022, estación Pachavita y píxeles correspondientes a los productos satelitales	98
Figura 6.17. Precipitación diaria para el periodo 2000-2022, estación Chinavita y píxeles correspondientes a los productos satelitales	99
Figura 6.18. Precipitación diaria para el periodo 2000-2022, estación Chinavita aut y píxeles correspondientes a los productos satelitales	99
Figura 6.19. Precipitación diaria para el periodo 2000-2022, estación Los Quinchos y píxeles correspondientes a los productos satelitales	100



Figura 6.20. Precipitación diaria para el periodo 2000-2022, estación Tibana y pixeles correspondientes a los productos satelitales	100
Figura 6.21. Precipitación diaria para el periodo 2000-2022, estación Teatinos y pixeles correspondientes a los productos satelitales	101
Figura 6.22. Precipitación diaria para el periodo 2000-2022, estación Jenesano y pixeles correspondientes a los productos satelitales	101
Figura 6.23. Precipitación diaria para el periodo 2000-2022, estación Villa Luisa y pixeles correspondientes a los productos satelitales	102
Figura 6.24. Precipitación diaria para el periodo 2000-2022, estación Ramiriquí y pixeles correspondientes a los productos satelitales	102
Figura 6.25. Temperatura máxima y mínima media mensual de la cuenca	104
Figura 6.26. Distribución espacial de la temperatura mínima en la cuenca.....	105
Figura 6.27. Distribución espacial de la temperatura máxima en la cuenca	105
Figura 6.28. Mapas históricos y actuales del uso y cobertura del suelo. A) UCS - año 2000, B) UCS - año 2005, C) UCS - año 2010 y D) UCS - año 2018	107
Figura 6.29. Áreas en porcentaje de las clases de uso/cobertura del suelo de los diferentes periodos en la cuenca	108
Figura 6.30. Porcentaje de área de las coberturas del suelo en la cuenca, año 2000....	109
Figura 6.31. Porcentaje de área de las coberturas del suelo en la cuenca, año 2018....	109
Figura 6.32. Contribuciones al cambio neto por categoría	111
Figura 6.33. Variables explicativas empleadas en el modelo de predicción de cambios	114
Figura 6.34. Uso y cobertura del suelo proyectado al año 2050	115
Figura 6.35. Mapas de uso y cobertura del suelo años 2000, 2018 y 2050	116
Figura 6.36. Uso y cobertura del suelo proyectado al año 2023	117
Figura 6.37. Puntos aleatorios sobre imagen.....	117
Figura 6.38. Modelo Digital de Elevación.....	118
Figura 6.39. Cobertura de suelo utilizada en CEQUEAU (año 2000)	118
Figura 6.40. Malla generada para modelación en CEQUEAU de datos de precipitación observados y de CHIRPS.....	119
Figura 6.41. Referencia de cuadros enteros - Modelación con precipitación observada	120
Figura 6.42. Hidrogramas mensuales de caudales observados y simulados en CEQUEAU (1983-2022), usando precipitación observada y parámetros iniciales.....	121
Figura 6.43. Referencia de cuadros enteros - Modelación con precipitación CHIRPS ...	122



Figura 6.44. Hidrogramas mensuales de caudales observados y simulados en CEQUEAU (1983-2022), usando precipitación CHIRPS y parámetros iniciales..... 123

Figura 6.45. Comparación de caudales observados y simulados en CEQUEAU (periodo de calibración: 1983-2008), usando datos de precipitación observada y UCS del año 2000. A) Diagrama de dispersión de los caudales diarios observados y simulados. B) Hidrograma interanual de los caudales diarios observados y simulados. C) Hidrogramas mensuales de los caudales observados y simulados. 125

Figura 6.46. Comparación de caudales observados y simulados en CEQUEAU (periodo de validación: 2009-2022), usando datos de precipitación observada y UCS del año 2000. A) Diagrama de dispersión de los caudales diarios observados y simulados. B) Hidrograma interanual de los caudales diarios observados y simulados. C) Hidrogramas mensuales de los caudales observados y simulados. 126

Figura 6.47. Comparación de caudales observados y simulados en CEQUEAU (periodo de simulación: 1983-2022), usando datos de precipitación observada y UCS del año 2000. A) Diagrama de dispersión de los caudales diarios observados y simulados. B) Hidrograma interanual de los caudales diarios observados y simulados. C) Hidrogramas mensuales de los caudales observados y simulados. 127

Figura 6.48. Comparación de caudales observados y simulados en CEQUEAU (periodo de simulación: 1983-2022), usando datos de precipitación observada y UCS del año 2018. A) Diagrama de dispersión de los caudales diarios observados y simulados. B) Hidrograma interanual de los caudales diarios observados y simulados. C) Hidrogramas mensuales de los caudales observados y simulados. 129

Figura 6.49. Comparación de caudales observados y simulados en CEQUEAU (periodo de simulación: 1983-2022), usando datos de precipitación observada y UCS del año 2050. A) Diagrama de dispersión de los caudales diarios observados y simulados. B) Hidrograma interanual de los caudales diarios observados y simulados. C) Hidrogramas mensuales de los caudales observados y simulados. 131

Figura 6.50. Comparación de caudales observados y simulados en CEQUEAU (periodo de simulación: 1983-2022), usando datos de precipitación CHIRPS y UCS del año 2000. A) Diagrama de dispersión de los caudales diarios observados y simulados. B) Hidrograma interanual de los caudales diarios observados y simulados. C) Hidrogramas mensuales de los caudales observados y simulados. 133

Figura 6.51. Comparación de caudales observados y simulados en CEQUEAU (periodo de simulación: 1983-2022), usando datos de precipitación CHIRPS y UCS del año 2018. A)



Diagrama de dispersión de los caudales diarios observados y simulados. B) Hidrograma interanual de los caudales diarios observados y simulados. C) Hidrogramas mensuales de los caudales observados y simulados. 135

Figura 6.52. Comparación de caudales observados y simulados en CEQUEAU (periodo de simulación: 1983-2022), usando datos de precipitación CHIRPS y UCS del año 2050. A) Diagrama de dispersión de los caudales diarios observados y simulados. B) Hidrograma interanual de los caudales diarios observados y simulados. C) Hidrogramas mensuales de los caudales observados y simulados. 137

Figura 6.53. Delimitación de las subcuencas en SWAT 138

Figura 6.54. Clasificación de suelos de la cuenca 139

Figura 6.55. Caudales mensuales observados y simulados en SWAT con parámetros iniciales, periodo 1983-2022. Modelación con datos precipitación observada 142

Figura 6.56. Caudales mensuales observados y simulados en SWAT con parámetros iniciales, periodo 1983-2022. Modelación con datos precipitación CHIRPS 143

Figura 6.57. Comparación de caudales observados y simulados en SWAT (periodo de calibración: 1983-2008), usando datos de precipitación observada y UCS del año 2000. A) Diagrama de dispersión de los caudales diarios observados y simulados. B) Hidrograma interanual de los caudales diarios observados y simulados. C) Hidrogramas mensuales de los caudales observados y simulados. 145

Figura 6.58. Comparación de caudales observados y simulados en SWAT (periodo de validación: 2009-2022), usando datos de precipitación observada y UCS del año 2000. A) Diagrama de dispersión de los caudales diarios observados y simulados. B) Hidrograma interanual de los caudales diarios observados y simulados. C) Hidrogramas mensuales de los caudales observados y simulados. 146

Figura 6.59. Comparación de caudales observados y simulados en SWAT (periodo de simulación: 1983-2022), usando datos de precipitación observada y UCS del año 2000. A) Diagrama de dispersión de los caudales diarios observados y simulados. B) Hidrograma interanual de los caudales diarios observados y simulados. C) Hidrogramas mensuales de los caudales observados y simulados. 147

Figura 6.60. Comparación de caudales observados y simulados en SWAT (periodo de simulación: 1983-2022), usando datos de precipitación observada y UCS del año 2018. A) Diagrama de dispersión de los caudales diarios observados y simulados. B) Hidrograma interanual de los caudales diarios observados y simulados. C) Hidrogramas mensuales de los caudales observados y simulados. 149



Figura 6.61. Comparación de caudales observados y simulados en SWAT (periodo de simulación: 1983-2022), usando datos de precipitación observada y UCS del año 2050. A) Diagrama de dispersión de los caudales diarios observados y simulados. B) Hidrograma interanual de los caudales diarios observados y simulados. C) Hidrogramas mensuales de los caudales observados y simulados. 151

Figura 6.62. Comparación de caudales observados y simulados en SWAT (periodo de simulación: 1983-2022), usando datos de precipitación CHIRPS y UCS del año 2000. A) Diagrama de dispersión de los caudales diarios observados y simulados. B) Hidrograma interanual de los caudales diarios observados y simulados. C) Hidrogramas mensuales de los caudales observados y simulados. 153

Figura 6.63. Comparación de caudales observados y simulados en SWAT (periodo de simulación: 1983-2022), usando datos de precipitación CHIRPS y UCS del año 2018. A) Diagrama de dispersión de los caudales diarios observados y simulados. B) Hidrograma interanual de los caudales diarios observados y simulados. C) Hidrogramas mensuales de los caudales observados y simulados. 155

Figura 6.64. Comparación de caudales observados y simulados en SWAT (periodo de simulación: 1983-2022), usando datos de precipitación CHIRPS y UCS del año 2050. A) Diagrama de dispersión de los caudales diarios observados y simulados. B) Hidrograma interanual de los caudales diarios observados y simulados. C) Hidrogramas mensuales de los caudales observados y simulados. 157

Figura 6.65. Comparación de caudales mensuales observados y simulados con CEQUEAU y SWAT para el periodo 1983-2022. Simulaciones realizadas a partir de los datos de precipitación observada y el mapa de UCS del año 2000..... 165

Figura 6.66. Comparación de caudales mensuales observados y simulados con CEQUEAU y SWAT para el periodo 1983-2022. Simulaciones realizadas a partir de los datos de precipitación observada y el mapa de UCS del año 2018..... 166

Figura 6.67. Comparación de caudales mensuales observados y simulados con CEQUEAU y SWAT para el periodo 1983-2022. Simulaciones realizadas a partir de los datos de precipitación observada y el mapa de UCS del año 2050..... 166

Figura 6.68. Diagramas de dispersión de caudales diarios simulados con CEQUEAU y SWAT, a partir de datos de precipitación observados. A) Mapa de UCS año 2000, B) Mapa de UCS año 2018, C) Mapa de UCS año 2050 167



Figura 6.69. Diagramas de dispersión de caudales mensuales simulados con CEQUEAU y SWAT, a partir de datos de precipitación observados. A) Mapa de UCS año 2000, B) Mapa de UCS año 2018, C) Mapa de UCS año 2050 168

Figura 6.70. Comparación de caudales mensuales observados y simulados con CEQUEAU y SWAT para el periodo 1983-2022. Simulaciones realizadas a partir de los datos de precipitación CHIRPS y el mapa de UCS del año 2000..... 169

Figura 6.71. Comparación de caudales mensuales observados y simulados con CEQUEAU y SWAT para el periodo 1983-2022. Simulaciones realizadas a partir de los datos de precipitación CHIRPS y el mapa de UCS del año 2018..... 169

Figura 6.72. Comparación de caudales mensuales observados y simulados con CEQUEAU y SWAT para el periodo 1983-2022. Simulaciones realizadas a partir de los datos de precipitación CHIRPS y el mapa de UCS del año 2050..... 169

Figura 6.73. Diagramas de dispersión de caudales diarios simulados con CEQUEAU y SWAT, a partir de datos de precipitación CHIRPS. A) Mapa de UCS año 2000, B) Mapa de UCS año 2018, C) Mapa de UCS año 2050 171

Figura 6.74. Diagramas de dispersión de caudales mensuales simulados con CEQUEAU y SWAT, a partir de datos de precipitación CHIRPS. A) Mapa de UCS año 2000, B) Mapa de UCS año 2018, C) Mapa de UCS año 2050 171

Figura 6.75. Caudal medio diario interanual simulado con CEQUEAU, a partir de datos de precipitación observada (periodo 1983-2022) para cada mapa de UCS (Año2000, 2018 y 2050)..... 172

Figura 6.76. Caudales medios mensuales interanuales simulados con CEQUEAU, a partir de datos de precipitación observada (periodo 1983-2022) para cada mapa de UCS (Año 2000, 2018 y 2050) 174

Figura 6.77. Caudal medio diario interanual simulado con CEQUEAU, a partir de datos de precipitación CHIRPS (periodo 1983-2022) para cada mapa de UCS (Año 2000, 2018 y 2050)..... 175

Figura 6.78. Caudales medios mensuales interanuales simulados con CEQUEAU, a partir de datos de precipitación CHIRPS (periodo 1983-2022) para cada mapa de UCS (Años 2000, 2018 y 2050) 177



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1. Resumen de estudios que evaluaron los impactos de uso y cobertura del suelo en procesos hidrológicos utilizando el modelo SWAT.	11
Tabla 4-1. Clasificación de las cuencas de acuerdo con la pendiente de laderas	16
Tabla 4-2. Formas de la cuenca de acuerdo con el Índice de compacidad	17
Tabla 4-3. Clasificación de usos y coberturas del suelo <i>Corine Land Cover</i> , adaptado a Colombia.....	20
Tabla 4-4. Parámetros y constantes del modelo CEQUEAU.....	36
Tabla 5-1. Parámetros morfométricos de la cuenca del río Garagoa	54
Tabla 5-2. Información de las estaciones hidrometeorológicas en la cuenca	56
Tabla 5-3. Años con información de precipitación diaria disponible, por estación	57
Tabla 5-4. Años con información de temperatura disponible, por estación.....	58
Tabla 5-5. Disponibilidad de información de caudal en la estación “El Caracol”	58
Tabla 5-6. Parámetros de calibración del modelo CEQUEAU.....	67
Tabla 5-7. Criterios de evaluación del rendimiento para pasos de tiempo diario, mensual y anual recomendadas para los modelos a escala de cuenca hidrográfica, tomado de Moriasi et al. (2015).....	69
Tabla 5-8. Base de datos necesarios para la preparación de archivos de entrada al modelo SWAT.....	71
Tabla 5-9. Clasificación de coberturas IDEAM a códigos SWAT.....	72
Tabla 5-10. Parámetros físicos del suelo requeridos para ejecutar el modelo SWAT.....	73
Tabla 5-11. Parámetros estadísticos del generador meteorológico (WGN).....	76
Tabla 5-12. Parámetros de calibración del modelo SWAT	79
Tabla 6-1. Datos faltantes, datos atípicos y resumen estadístico de la distribución de datos de caudal	86
Tabla 6-2. Resultados de validación de datos de precipitación CHIRPS e IMERG (Coeficientes de determinación).....	93
Tabla 6-3. Áreas de los usos/coberturas del suelo de los diferentes periodos	107
Tabla 6-4. Área de las coberturas del suelo en la cuenca año 2000	109
Tabla 6-5. Área de las coberturas del suelo en la cuenca año 2018	109
Tabla 6-6. Ganancias y pérdidas entre 2000 y 2018	110
Tabla 6-7. Cambio neto entre 2000 y 2018	110
Tabla 6-8. Contribuciones al cambio neto por categoría (km ²).....	111



Tabla 6-9. Transiciones y variables explicativas empleadas en la proyección del escenario futuro de cambio de uso y cobertura del suelo 112

Tabla 6-10. Comparación de áreas de los mapas de UCS años 2000, 2018 y 2050..... 116

Tabla 6-11. Cambio porcentual de UCS para los periodos 2000-2018 y 2018-2050 116

Tabla 6-12. Caudal medio diario interanual observado y simulado con CEQUEAU (1983-2022) - Modelación con datos de precipitación observada 121

Tabla 6-13. Caudal medio diario interanual observado y simulado con CEQUEAU (1983-2022) - Modelación con datos de precipitación CHIRPS 123

Tabla 6-14. Parámetros ajustados en el proceso de la calibración del modelo CEQUEAU 123

Tabla 6-15. Caudal medio diario interanual observado y simulado con CEQUEAU (1983-2022) - Modelación con datos de precipitación observados (UCS 2000)..... 124

Tabla 6-16. Caudales medios mensuales interanuales observados y simulados con CEQUEAU (1983-2022) - Modelación con datos de precipitación observados (UCS 2000) 124

Tabla 6-17. Caudal medio diario interanual observado y simulado con CEQUEAU (periodo 1983 2022) - Modelación con datos de precipitación observados (UCS 2018)..... 128

Tabla 6-18. Caudales medios mensuales observados y simulados con CEQUEAU (periodo 1983 2022) - Modelación con datos de precipitación observados y temperatura ERA5 (UCS 2018)..... 128

Tabla 6-19. Caudal medio diario interanual observado y simulado con CEQUEAU (periodo 1983-2022) - Modelación con datos de precipitación observados (UCS 2050)..... 129

Tabla 6-20. Caudales medios mensuales observados y simulados con CEQUEAU (periodo 1983-2022) - Modelación con datos de precipitación observados (UCS 2050)..... 130

Tabla 6-21. Caudal medio diario interanual observado y simulado con CEQUEAU (periodo 1983-2022) - Modelación con datos de precipitación CHIRPS (UCS 2000)..... 132

Tabla 6-22. Caudales medios mensuales observados y simulados con CEQUEAU (periodo 1983-2022) - Modelación con datos de precipitación CHIRPS (UCS 2000)..... 132

Tabla 6-23. Caudal medio diario interanual observado y simulado con CEQUEAU (periodo 1983-2022) - Modelación con datos de precipitación CHIRPS (UCS 2018)..... 134

Tabla 6-24. Caudales medios mensuales observados y simulados con CEQUEAU (periodo 1983-2022) - Modelación con datos de precipitación CHIRPS (UCS 2018)..... 134

Tabla 6-25. Caudal medio diario interanual observado y simulado con CEQUEAU (periodo 1983-2022) - Modelación con datos de precipitación CHIRPS (UCS 2050)..... 136



Tabla 6-26. Caudales medios mensuales observados y simulados con CEQUEAU (periodo 1983-2022) - Modelación con datos de precipitación CHIRPS (UCS 2050)..... 136

Tabla 6-27. Cantidad de HRUs delimitadas por mapa de UCS 138

Tabla 6-28. Componentes taxonómicos de las unidades cartográficas de suelo en la cuenca 139

Tabla 6-29. Configuraciones del modelo a partir del método PET y el método ICN 140

Tabla 6-30. Caudal medio diario interanual observado y simulado con SWAT (periodo 1983-2022) - Modelación con datos de precipitación observada 141

Tabla 6-31. Caudal medio diario interanual observado y simulado con SWAT (periodo 1983-2022) - Modelación con datos de precipitación CHIRPS 142

Tabla 6-32. Parámetros ajustados en el proceso de la calibración del modelo SWAT ... 143

Tabla 6-33. Caudal medio diario interanual observado y simulado con SWAT (periodo 1983-2022) - Modelación con datos de precipitación observados (UCS 2000)..... 144

Tabla 6-34. Caudales medios mensuales observados y simulados con SWAT (periodo 1983-2022) - Modelación con datos de precipitación observados (UCS 2000)..... 144

Tabla 6-35. Caudal medio diario interanual observado y simulado con SWAT (periodo 1983-2022) - Modelación con datos de precipitación observados (UCS 2018)..... 148

Tabla 6-36. Caudales medios mensuales observados y simulados con SWAT (periodo 1983-2022) - Modelación con datos de precipitación observados (UCS 2018)..... 148

Tabla 6-37. Caudal medio diario interanual observado y simulado con SWAT (periodo 1983-2022) - Modelación con datos de precipitación observados (UCS 2050)..... 150

Tabla 6-38. Caudales medios mensuales observados y simulados con SWAT (periodo 1983-2022) - Modelación con datos de precipitación observados (UCS 2050)..... 150

Tabla 6-39. Caudal medio diario interanual observado y simulado con SWAT (periodo 1983-2022) - Modelación con datos de precipitación CHIRPS (UCS 2000)..... 152

Tabla 6-40. Caudales medios mensuales observados y simulados con SWAT (periodo 1983-2022) - Modelación con datos de precipitación CHIRPS (UCS 2000)..... 152

Tabla 6-41. Caudal medio diario interanual observado y simulado con SWAT (periodo 1983-2022) - Modelación con datos de precipitación CHIRPS (UCS 2018)..... 154

Tabla 6-42. Caudales medios mensuales observados y simulados con SWAT (periodo 1983-2022) - Modelación con datos de precipitación CHIRPS (UCS 2018)..... 154

Tabla 6-43. Caudal medio diario interanual observado y simulado con SWAT (periodo 1983-2022) - Modelación con datos de precipitación CHIRPS (UCS 2050)..... 155



Tabla 6-44. Caudales medios mensuales observados y simulados con SWAT (periodo 1983-2022) - Modelación con datos de precipitación CHIRPS (UCS 2050)..... 156

Tabla 6-45. Caudales medios diarios interanuales observados y simulados con CEQUEAU y SWAT (periodo 1983-2022) - Precipitación observada 158

Tabla 6-46. Caudales medios mensuales observados y simulados con CEQUEAU y SWAT (periodo 1983-2022) - Precipitación observada 158

Tabla 6-47. Caudales medios diarios interanuales observados y simulados con CEQUEAU y SWAT (periodo 1983-2022) - Precipitación CHIRPS 159

Tabla 6-48. Caudales medios mensuales observados y simulados con CEQUEAU y SWAT (periodo 1983-2022) - Precipitación CHIRPS 160

Tabla 6-49. Eficiencia de los modelos en porcentaje de años para las simulaciones en CEQUEAU y SWAT realizadas a partir de los datos de precipitación observada y el mapa de UCS del año 2000 161

Tabla 6-50. Eficiencia de los modelos en porcentaje de años para las simulaciones en CEQUEAU y SWAT realizadas a partir de los datos de precipitación observada y el mapa de UCS del año 2018 162

Tabla 6-51. Eficiencia de los modelos en porcentaje de años para las simulaciones en CEQUEAU y SWAT realizadas a partir de los datos de precipitación observada y el mapa de UCS del año 2050 162

Tabla 6-52. Eficiencia de los modelos en porcentaje de años para las simulaciones en CEQUEAU y SWAT realizadas a partir de los datos de precipitación CHIRPS y el mapa de UCS del año 2000 163

Tabla 6-53. Eficiencia de los modelos en porcentaje de años para las simulaciones en CEQUEAU y SWAT realizadas a partir de los datos de precipitación CHIRPS y el mapa de UCS del año 2018 163

Tabla 6-54. Eficiencia de los modelos en porcentaje de años para las simulaciones en CEQUEAU y SWAT realizadas a partir de los datos de precipitación CHIRPS y el mapa de UCS del año 2050 163

Tabla 6-55. Criterios estadísticos de evaluación mensual de los modelos CEQUEAU y SWAT para los datos de precipitación observada y de CHIRPS y cada uno de los mapas de UCS (Años 2000, 2018 y 2050) 164

Tabla 6-56. Cambio de caudales medios mensuales interanuales simulados con CEQUEAU, a partir de datos de precipitación observada (periodo 1983-2022) para cada mapa de UCS..... 173



Tabla 6-57. Cambio de caudales medios mensuales interanuales simulados con SWAT, a partir de datos de precipitación observada (periodo 1983-2022) para cada mapa de UCS
..... 176



ACRÓNIMOS Y ABREVIACIONES

CFSR	<i>Climate Forecast System Reanalysis</i> (Reanálisis del Sistema de Pronóstico Climático)
CHIRPS	<i>Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data</i> (Grupo de Riesgos Climáticos - Precipitación de Infrarrojo con Datos de Estaciones)
CN	Numero de curva
CORPOCHIVOR	Corporación Autónoma Regional de Chivor
DEM	<i>Digital Elevation Model</i> (Modelo Digital de Elevación)
ECMWF	<i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts</i> (Centro Europeo de Predicción Meteorológica a Plazo Medio)
ERA5	<i>ECMWF ReAnalysis 5th Generation</i> (Reanálisis de 5ª Generación del ECMWF)
ET	<i>Actual evapotranspiration</i> (Evapotranspiración real)
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
FFEM	Fondo Francés para el Medio Ambiente Mundial
GIRH	Gestión Integrada de los Recursos Hídricos
HRUs	<i>Hydrologic response units</i> (Unidades de respuesta hidrológica)
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales" de Colombia
IGAC	Instituto Geográfico Agustín Codazzi de Colombia
IMERG	<i>Global Precipitation Measurement (GPM) Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM</i> (Recuperaciones Integradas de Múltiples Satélites para Medición Global de Precipitación)
LCM	<i>Land Change Modeler</i> (Modelador de cambio de suelo)
NSE	<i>Nash-Sutcliffe efficiency</i> (Eficiencia de Nash-Sutcliffe)
OMM	Organización Meteorológica Mundial
ONF Andina	Federación Nacional de Industriales de la Madera
PBIAS	<i>Percent bias</i> (Sesgo porcentual)
PET	<i>Potential evapotranspiration</i> (Evapotranspiración potencial)
PNN	Parques Nacionales Naturales



UAEM

Universidad Autónoma
del Estado de México



SIG	Sistemas de Información Geográfica
SINA	Sistema Nacional Ambiental
SPAW	<i>Soil-Plant-Air-Water</i> (Suelo-Planta-Aire-Agua)
SWAT	<i>Soil and Water Assessment Tool</i> (Herramienta de Evaluación del Suelo y Agua)
SWAT-CUP	<i>SWAT Calibration and Uncertainty Programs</i> (Programas de Calibración y Gestión de la Incertidumbre)
UCS	Uso y cobertura del suelo
WWF	World Wide Fund for Nature (Fondo Mundial para la Naturaleza)



1. INTRODUCCIÓN

El agua es vital para la supervivencia de cualquier forma de vida y es un recurso fundamental para el desarrollo social y económico. Solo el 3 % del agua en el planeta es dulce, y de esta cantidad, el 87 % no es accesible. Esto significa que solo el 0.4 % del total global está disponible, sin embargo, este pequeño porcentaje de agua disponible se degrada constantemente en calidad con el uso y volumen al que no se le restituyen sus características. Además, una combinación de inequidad social y marginación económica lleva a las personas a sobreexplotar el suelo y los recursos forestales, lo que tiene efectos perjudiciales en los recursos hídricos (C. Díaz et al., 2009). Por lo anterior, estimar la disponibilidad de agua en las cuencas se convierte en una tarea fundamental para evaluar la capacidad que tienen de abastecer las necesidades hídricas de los territorios y tener información base para la gestión integrada del recurso hídrico (GIRH).

Uno de los parámetros críticos que se evalúan para la gestión sostenible de los recursos hídricos es el rendimiento hídrico, este parámetro presenta variaciones tanto espaciales como temporales, las cuales dependen del clima, la configuración topográfica y geológica y en particular, de las condiciones fisiográficas de la cuenca, tales como pendiente, área, cobertura vegetal y tipo de suelo (Belesaca & Peláez, 2018).

Los cambios en el uso y la cobertura del suelo pueden causar efectos significativos en los sistemas ambientales, ecológicos e hidrológicos y sus procesos (Patil & Nataraja, 2020). Varios estudios han evaluado el impacto que tiene el cambio del uso y la cobertura del suelo en las características hidrológicas de las cuencas, estos impactos presentan una gran variabilidad espacial en la magnitud y el tipo de impacto que generan bien sea positivo o negativo dependiendo del cambio específico de la cobertura y la zona climática (Bosmans et al., 2017).

Actualmente, el uso de modelos hidrológicos se ha convertido en una herramienta de gran utilidad para evaluar los cambios en los componentes hidrológicos en las cuencas y comprender la influencia del uso y la cobertura del suelo en estos, valiéndose de información principalmente generada y procesada con la ayuda de sensores remotos y sistemas de información geográfica (SIG).



2. ANTECEDENTES

2.1. Influencia del cambio de uso y cobertura del suelo en el rendimiento hídrico

El análisis de los cambios de cobertura y usos del suelo es importante y necesario, debido a que proporcionan la base para conocer las tendencias de los procesos de degradación, desertificación, y pérdida de la biodiversidad y servicios ecosistémicos de una región determinada. El cambio de uso y cobertura del suelo puede tener importantes efectos sobre el ciclo hidrológico, afectando los patrones de evapotranspiración, escurrimiento, infiltración y retención de agua, y cambiando el tiempo y el volumen de agua disponible (F. J. Gaspari et al., 2021). El uso de las tierras corresponde a todas las intervenciones, acciones y actividades sobre la cobertura superficial del terreno para modificar o mantener las condiciones existentes de una determinada zona, impulsadas principalmente por el rápido desarrollo socioeconómico y la expansión de la población. Todas estas características son de gran relevancia dentro de los componentes del ciclo hidrológico de una cuenca hidrográfica, debido a que provocan diferentes respuestas en la dinámica del ciclo hidrológico, especialmente en la producción hídrica (Carrillo, 2018), influyendo entonces el cambio de coberturas en el comportamiento de la escorrentía en el régimen hidrológico de las cuencas. Por lo que podría decirse que principalmente la cubierta vegetal condiciona tal respuesta hidrológica (Mongui & Sierra, 2021). Si el balance hídrico se modifica sobre amplias superficies de una cuenca puede tener impactos en el corto, mediano y largo plazo, aumentando los volúmenes de escurrimiento y la reducción de los suministros de agua a acuíferos (Cruz, 2019).

De acuerdo con los resultados obtenidos por Mango et al. (2011) en la cuenca alta del río Mara en Kenia, el balance hídrico de una cuenca puede ser impactado de manera directa por el cambio de uso de suelo, llegando a disminuir en más de un 9 % de las descargas de las aguas subterráneas y en un 3 % del total de producción de agua superficial.

Se han documentado situaciones en las que la forestación tiene efectos positivos sobre la provisión de agua, en general en cuencas que fueron forestadas tras sufrir degradación por sobrepastoreo y/o laboreo del suelo. En estas condiciones, la forestación puede favorecer la infiltración desviando agua que se perdería por escorrentía, contribuyendo a los picos de caudal, hacia el flujo subterráneo y caudal base de la cuenca. En estos casos el rendimiento hídrico total no aumenta (de hecho, por lo general disminuye) pero se logra una oferta más



estable de agua que evita crecientes y eventos de erosión y, en menor cantidad de situaciones, eleva el caudal base (Ilstedt et al., 2007).

2.2. El recurso hídrico en Colombia

La ubicación geográfica, la diversidad de relieve y la gran variedad de climas que posee Colombia, hace que sea uno de los países que cuenta con mayor riqueza hídrica en el mundo. La disponibilidad de agua en el país se ve reflejada en el sinnúmero de recursos hídricos con los que cuenta (IDEAM, 2023); sin embargo, esta oferta no está distribuida homogéneamente en todo el territorio, y está sometida a fuertes variaciones que determinan la disponibilidad en el recurso hídrico (Campuzano et al., 2012).

Colombia ocupa los primeros puestos entre los países con mayores fuentes hídricas en el mundo, con un valor de escurrimiento que en términos de rendimiento promedio es de 56.2 l/s/km², mientras que el promedio mundial es de apenas 10 l/s/km², y el promedio latinoamericano es de 21 l/s/km² (IDEAM, 2023). En cuanto al balance hídrico del territorio colombiano, de acuerdo con el Estudio Nacional del Agua 2022 (IDEAM, 2023), en promedio cada año llueve 3,196 km³, se evaporan 1,233 km³ y escurren 1,963 km³ de agua.

Por otra parte, la riqueza hídrica del país se manifiesta también en los diferentes cuerpos de agua lénticos que albergan grandes cantidades de agua, tales como ciénagas, embalses, lagunas y pantanos. Se ha identificado que su área equivale a 831,163.7 ha; de las cuales 397,613.7 ha corresponden a ciénagas, 51,864.3 ha a embalses, 123,412 ha son lagunas y 258,273 ha están ocupadas por pantanos (IDEAM, 2023).

El territorio se divide en áreas hidrográficas que corresponden a las regiones hidrográficas o vertientes correspondientes a las grandes cuencas que agrupan un conjunto de ríos con sus afluentes que desembocan en un mismo mar. Estas áreas hidrográficas corresponden al área hidrográfica del Orinoco, área hidrográfica del Amazonas, área hidrográfica del Caribe, área hidrográfica del Pacífico y, se delimita adicionalmente, el área hidrográfica de la cuenca Magdalena-Cauca que, aunque tributa y forma parte de la vertiente Caribe, tiene importancia socioeconómica por su alto poblamiento y aporte al producto interno bruto. Las cinco áreas hidrográficas se dividen en 41 zonas y 316 subzonas hidrográficas (IDEAM, 2023).

El estudio del IDEAM (2008) sobre el estado del medio ambiente y los recursos naturales renovables en Colombia, permite confirmar, que pese a la situación relativamente favorable



de oferta y disponibilidad hídrica del país, Colombia se caracteriza por una alta variabilidad espacial y temporal en la distribución de su recurso hídrico; adicionalmente, las condiciones de cobertura vegetal, suelos, usos del suelo y características geológicas e hidrológicas de las cuencas colombianas son muy variadas y por ello el país cuenta con cuencas hidrográficas de diferente capacidad de regulación.

2.3. Uso y cobertura del suelo en Colombia y el departamento de Boyacá

En cuanto a usos y coberturas del suelo, en Colombia, la clase territorios artificializados comprenden un 0.55 % del área total del país; de esta, el tejido urbano continuo y las zonas de extracción minera son los más representativos. El 25.8 % del territorio nacional se encuentra ocupado por territorios agrícolas; de estos, el 45.5 % corresponde a la cobertura de pastos limpios, seguido de las áreas agrícolas heterogéneas conformadas por el grupo de mosaicos, los cuales ocupan el 39.7 % del total de la clase. El 71 % del territorio nacional se encuentra ocupado por áreas naturales y seminaturales, de estas, el 46.1 %, corresponde a bosque denso. Las áreas húmedas en Colombia ocupan un 0.8 % del territorio; de esta categoría, el 87.7 % corresponde a zonas pantanosas. En el área continental del país, las superficies de agua ocupan el 1.7 %; los ríos son la cobertura con mayor representatividad, con un 65.2 % (IDEAM, 2021).

De acuerdo con el IDEAM (2021), en el departamento de Boyacá, al cual pertenece la zona de estudio, del área total del departamento, 12,191 km² (52.8 %) son territorios agrícolas, 10,454 km² (45.3 %) son áreas naturales y seminaturales, 173 km² (0.74 %) corresponden a territorios artificializados, 26.6 km² (0.11 %) a áreas húmedas y 250 km² (1.08 %) a superficies de agua.

En Colombia se cuenta con cuatro mapas nacionales de coberturas de la tierra clasificados bajo la metodología *Corine Land Cover*, los periodos de estos mapas corresponden a: 2000-2002, 2005-2009, 2010-2012 y el más reciente publicado en el año 2021, elaborado a partir de imágenes del año 2018. En la Figura 2.1, se presentan las superficies de cubierta de las diferentes clases de uso y cobertura del suelo en Colombia para los periodos 2000-2002, 2005-2009, 2010-2012 y 2018.

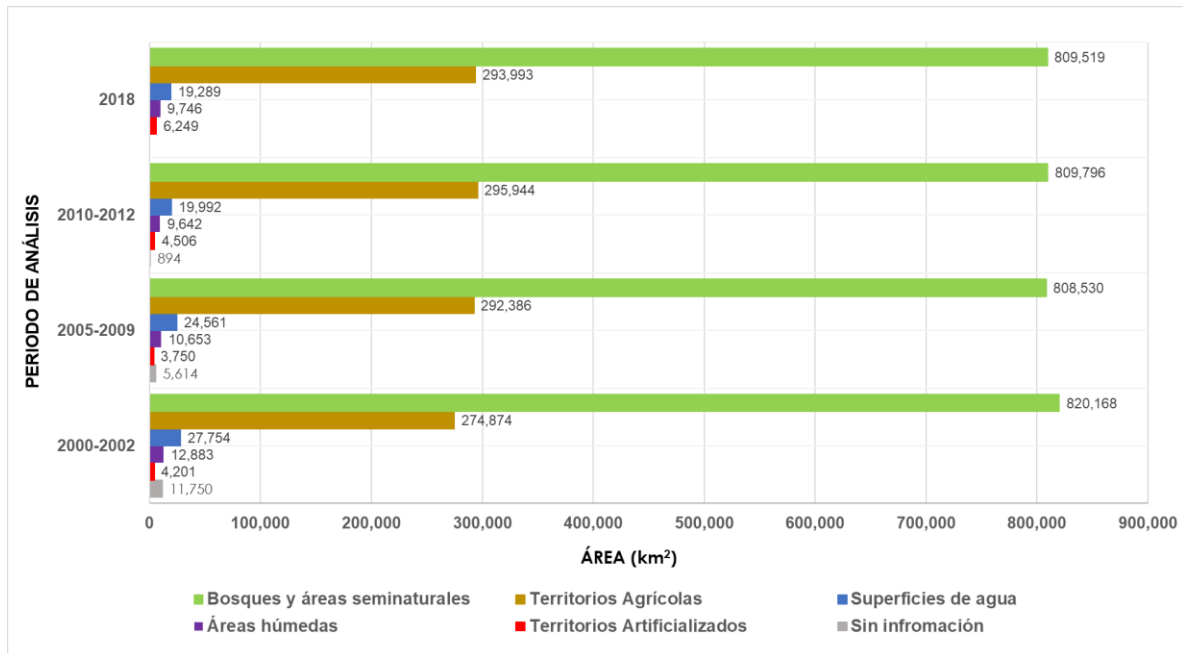


Figura 2.1. Superficies uso y cobertura del suelo para los periodos 2000-2002, 2005-2009, 2010-2012 y 2018 en Colombia (Adaptado de IDEAM, 2013)

De acuerdo con lo anterior, durante el periodo 2000-2018, la cobertura de bosques y áreas seminaturales disminuyeron 1.3 %, la categoría de territorios agrícolas aumentó 6.96 %, las superficies de agua disminuyeron un 30.5 %, la cobertura de áreas húmedas disminuyó 24.35 % y finalmente el área de los territorios artificializados aumentó 48.75 %.

2.4. Modelos hidrológicos para determinar efectos de cambio de uso/cobertura del suelo en el rendimiento hídrico

Durante las últimas décadas, los investigadores han identificado y cuantificado los impactos del cambio de cobertura y usos del suelo en los componentes hidrológicos de las cuencas a lo largo del tiempo y el espacio. Por ejemplo, las tierras de cultivo y los bosques se convirtieron en áreas urbanas, lo que implica la transformación de la tierra permeable en superficies impermeables, lo que aumenta el flujo de agua. Con el desarrollo continuo de la ciencia y la tecnología, los métodos cuantitativos se han desarrollado gradualmente desde el análisis estadístico tradicional hasta los modelos hidrológicos. Diferentes modelos hidrológicos pueden proporcionar las variaciones espaciales de los componentes hidrológicos resultantes de las variaciones del uso de la tierra, que se utilizan para determinar cómo el cambio de cobertura y usos del suelo afecta las distribuciones de escorrentía, rendimiento y servicios regionales de suministro de agua. El conocimiento de



las relaciones tierra-agua evolucionó considerablemente mediante el uso de dichos modelos (Liu et al., 2022).

Los modelos que se han utilizado regularmente a escala de cuenca son el Programa de Simulación Hidrológica Fortran (HSPF), la Herramienta de Evaluación de Suelos y Agua (SWAT), el Sistema de Modelado Hidrológico del Centro de Ingeniería Hidrológica (HEC-HMS), el modelo CEQUEAU, entre otros. Estos modelos, que producen hidrogramas además de rendimientos de agua, se pueden operar en varios pasos de tiempo y variaciones de diferentes parámetros.

2.5. Estudios que han realizado modelación con CEQUEAU

En modelo hidrológico CEQUEAU, es un modelo distribuido que toma en cuenta datos fisiográficos, meteorológicos e hidrológicos (Fnguire et al., 2022). El modelo fue desarrollado en el Instituto Nacional de la Investigación Científica-Agua de la Universidad de Quebec, Canadá, para reproducir el escurrimiento de una cuenca. Este modelo ha sido utilizado en diversos países para simulaciones continuas de caudales y para la previsión hidrológica con fines de gestión de embalses, además, este modelo ha sido comparado con varios modelos hidrológicos por la Organización Meteorológica Mundial en diferentes cuencas (Vilchis et al., 2015).

El modelo es de parámetros distribuidos; en este sentido, divide la cuenca en superficies elementales de forma cuadrada (parcelas) y calcula los caudales para cada una de ellas, considerando las variaciones espaciotemporales de las características fisiográficas. Esta discretización hace que este tipo de modelo sea compatible con el uso de precipitación estimada por satélite (Vilchis et al., 2015).

En este modelo, la producción y la transferencia de flujo se tratan por separado para garantizar la mayor flexibilidad posible y permite adaptar el modelo al máximo número de situaciones. Esta característica hace del modelo CEQUEAU una herramienta muy flexible, capaz de simular los sistemas de recursos hídricos (Charbonneau et al., 2009).

Bâ et al. (2001) analizaron el comportamiento hidrológico de los caudales de las cuencas de los ríos Amacuzac y San Jerónimo hasta las estaciones hidrométricas Amacuzac y Coatepequito, respectivamente, con base en la aplicación de dos modelos hidrológicos determinísticos de arquitectura diferente: CEQUEAU (Morin & Paquet, 1995) y SSARR (USACE, 1991). De acuerdo con los criterios utilizados para determinar la calidad de las



simulaciones, los dos modelos reconstituyeron los caudales medios diarios de las cuencas de manera satisfactoria; sin embargo, destacaron que CEQUEAU es un modelo más amigable, con herramientas gráficas y numéricas que facilitan la simulación de caudales.

Bâ et al. (2013) implementaron un módulo hidrogeomático que trabaja en el SIG IDRISI/TerrSet. El archivo principal que este módulo genera es el de los datos fisiográficos, el cual proporciona para cada celda, su celda receptora (en función del sentido de flujo), su porcentaje de cobertura de suelo y la altitud media. Los usos de suelo que considera el modelo hidrológico CEQUEAU son: 1) cuerpos de agua, 2) bosques, 3) ciénegas y 4) otros.

El modelo toma en cuenta el efecto del tipo de suelo en la función de transferencia de manera constante, es decir, para todo el periodo de simulación se considera un sólo archivo fisiográfico, con esto se asume que las coberturas permanecen inalteradas con el paso del tiempo (Díaz, 2010), por lo que, para identificar los impactos por el cambio en el uso y la cobertura del suelo, sería necesario ejecutar una simulación por escenario de uso y cobertura del suelo.

Vilchis et al. (2015) evaluaron la integración de datos a nivel diario de precipitación estimada con sensores hidrometeorológicos, tales como estaciones meteorológicas automáticas (EMA), radar meteorológico banda C de Cerro Cathedral y sistemas satélites PERSIANN y CMORPH, dentro del modelo hidrológico distribuido CEQUEAU, implementado en México, en la cuenca del río Amacuzac. Estas estimaciones permitieron simular caudales a nivel diario, los resultados indicaron que los valores de los criterios utilizados son aceptables tanto en la comparativa con las precipitaciones diarias observadas como en las simulaciones de caudales, obteniendo valores de Coeficiente de Nash interanuales medios diarios en el caso del radar 0.60, PERSIANN 0.81, EMA 0.83 y CMORPH 0.85, respecto a los interanuales medios mensuales, para el radar 0.90, PERSIANN 0.91, EMA's 0.92 y CMORPH 0.95. Por tal motivo fue posible afirmar la utilidad de la combinación de estas herramientas tecnológicas como una solución a la escasez de datos de precipitación, estableciendo procesos automatizados y en tiempo real que permitan el desarrollo de análisis y toma de decisiones.

Bâ et al. (2018) destacaron la ventaja de los productos de lluvia derivados de satélites para el modelado hidrológico en regiones donde las observaciones terrestres son insuficientes, como las cuencas de África occidental; analizaron la estimación de precipitaciones a partir de información de sensores remotos utilizando redes neuronales artificiales: registro de



datos climáticos (PERSIANN-CDR). Primero, CEQUEAU fue calibrado y validado usando PERSIANN-CDR sin procesar, y luego, las lluvias fueron corregidas por sesgo y el modelo fue recalibrado. El rendimiento del modelo se evaluó utilizando la eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), el sesgo porcentual medio (MPBIAS) y el coeficiente de determinación (R^2). Con PERSIANN-CDR sin procesar, la mayoría de los años mostraron un buen desempeño con valores de $NSE > 0.8$, $R^2 > 0.90$ y $MPBIAS < 10\%$. Sin embargo, PERSIANN-CDR con corrección de sesgo no mejoró las simulaciones.

Magaña et al. (2021) aplicaron el modelo hidrológico distribuido CEQUEAU para estimar los caudales en cuatro sitios no aforados de la cuenca del río Tacotalpa para el periodo de 1965 a 1999. Para la evaluación de la eficiencia del modelo se usaron tres estadísticas: el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), el porcentaje de sesgo (PBIAS) y el coeficiente de determinación (R^2). De acuerdo con los criterios estadísticos el modelo fue muy bueno. CEQUEAU realizó simulaciones con una buena respuesta natural de los escurrimientos de la cuenca.

Finalmente, Fnguire et al. (2022) utilizaron el modelo hidrológico CEQUEAU con un paso de tiempo diario en la región montañosa árida y semiárida de la cuenca del Ourika. Evaluaron la capacidad del modelo para simular el flujo de agua diario. El análisis de sensibilidad se llevó a cabo para comprender qué parámetros tenían la mayor influencia en los resultados del modelo. Los resultados mostraron que las simulaciones de calibración y validación de los caudales diarios podrían considerarse satisfactorias. El modelo fue más sensible a los parámetros: umbral de transformación lluvia-nieve (STRNE), coeficiente de infiltración en el embalse zona inferior (CIN) y umbral de infiltración del embalse zona superior hacia el embalse zona inferior (HINF).



2.6. Estudios que han realizado modelación con SWAT

SWAT (Soil and Water Assessment Tool) es un modelo hidrológico espacialmente distribuido, de tiempo continuo, basado en procesos desarrollado por el Servicio de Investigación (ARS) del Departamento de Desarrollo de la Agricultura de los Estados Unidos (USDA). Este modelo ha sido utilizado con frecuencia por parte de los investigadores para simular el impacto del cambio de uso y cobertura del suelo en los procesos hidrológicos de las cuencas. El modelo puede analizar los impactos del clima, el suelo, la vegetación y las actividades agrícolas en el caudal de los ríos (Sujarwo et al., 2022).

Andrade et al. (2018) utilizaron el modelo SWAT para identificar los efectos del cambio de uso y cobertura del suelo en la hidrología de la cuenca alta del río Crepori, en el Amazonas brasileño. Se analizaron cuatro escenarios de cambio de uso y cobertura del suelo, uno para el año 1973 (año base), el segundo escenario representa los mapas de coberturas de los años 1998, 2003 y 2010 y el tercer y cuarto escenario corresponden a dos mapas de coberturas para el año 2050 basados en simulaciones de deforestación. Tras las simulaciones se obtuvo que las diferencias porcentuales de los componentes del balance hídrico entre los escenarios 1973 y 1998-2003-2010 fueron pequeñas, ya que las áreas deforestadas en estos escenarios son relativamente similares y, por lo tanto, no afectaron la hidrología de la cuenca de manera notoria. Por otro lado, los componentes del balance hídrico simulados para los escenarios del año 2050 variaron notablemente, evidenciándose un fuerte incremento de la escorrentía superficial, de hasta un 300 % y una disminución en el porcentaje de agua subterránea.

Barreto et al. (2021) determinaron la respuesta hidrológica en la cuenca del río Chicú en Colombia, con respecto a los cambios de cobertura y usos del suelo de los años 1997, 2001, 2006, 2011 y 2016, empleando el modelo SWAT. Concluyeron que la respuesta hidrológica de una cuenca no solo se ve afectada por los parámetros hidroclimáticos sino que también está fuertemente influenciada por el tipo de vegetación y la cobertura del suelo; al identificar que en escenarios donde aumentan las tierras desnudas y degradadas y disminuyen los bosques, la escorrentía superficial aumenta hasta en un 13 %. Por lo tanto, la pérdida de vegetación puede traer consigo incrementos considerables en los caudales que presenta la cuenca y un mayor arrastre de partículas de suelo hacia los cuerpos de agua.



Minga (2022) identificó los impactos del cambio de uso y cobertura del suelo, variabilidad y cambio climático en la hidrología de dos cuencas mexicanas con diferentes condiciones hidro-climáticas mediante un enfoque de modelación hidrológica. En la cuenca del río La Sierra se identificaron subcuencas donde hubo disminución de áreas de bosque e incrementos de áreas de agricultura, urbanización y pastizal, lo cual resultó en incrementos del rendimiento hídrico y la escorrentía superficial y, por el contrario, disminución de la evapotranspiración real y del flujo base. En la cuenca del río Amacuzac se identificaron subcuencas donde hubo en su mayoría ganancias de áreas de coberturas de bosque y agricultura de riego y, por el contrario, pérdida de agricultura temporal lo que resultó en disminución del rendimiento hídrico y la escorrentía superficial; mientras que, el caudal base incrementó; y la evapotranspiración real se mantuvo con cambios pequeños.

Los estudios anteriormente mencionados demuestran la influencia que tiene el cambio de uso y cobertura del suelo en los diferentes componentes del balance hídrico de las cuencas, los resultados de estos estudios son potencialmente útiles en la toma de decisiones para la gestión de los recursos hídricos y del suelo. Así como, en la formulación de estrategias de adaptación para mitigar los impactos negativos o positivos en las cuencas (Minga, 2022).

Otros estudios relacionados con la identificación de los impactos del cambio de uso y cobertura del suelo en las características hidrológicas de las cuencas mediante el uso del modelo hidrológico SWAT, son presentados de forma resumida en la Tabla 2-1, en donde se indica el objetivo de estudio, los periodos utilizados para la calibración y validación del modelo, los índices o indicadores del rendimiento del modelo y los escenarios de cambio de uso y cobertura del suelo empleados para ejecutar las simulaciones hidrológicas.

Tabla 2-1. Resumen de estudios que evaluaron los impactos de uso y cobertura del suelo en procesos hidrológicos utilizando el modelo SWAT.

Titulo	Objetivo	Calibración	Validación	Índices de rendimiento del modelo	Escenarios de cambio de uso y cobertura del suelo
Estimación del balance y el rendimiento hídrico en la cuenca Reedy Fork Buffalo Creek en Carolina del Norte utilizando SWAT (Ayivi & Jha, 2018)	(1) Probar la aplicabilidad práctica del modelo SWAT en el área de estudio para la cual el acceso a la información es limitado. (2) Simular el flujo de la corriente y los componentes del balance hídrico. (3) Simular la cantidad de agua anual bajo varias situaciones de cambio de uso de suelo urbano.	2002-2008 (7 años)	2009-2013 (5 años)	NSE R ²	Para realizar el análisis de escenarios de cambio de uso de la tierra se consideraron dos escenarios de cambio de uso de suelo, uso de suelo pasado (2002) y uso de suelo futuro (2030), además del escenario de referencia actual (2010)
Simulación del flujo de la corriente y la respuesta hidrológica a los cambios en la cobertura del suelo en la cuenca de un río tropical (Rodrigues da Silva et al., 2018)	Calibrar y validar el modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT) para determinar la respuesta hidrológica a los cambios en la cobertura del suelo en la subcuenca baja-media del río São Francisco (LMSFR), Brasil.	1993-1994 (2 años)	1995-2004 (10 años)	Pe NSE R ² MAE NRMSE d	Se analizaron tres escenarios de cobertura del suelo que se compararon con el paisaje actual. Escenario I: los pastos se reemplazan por vegetación natural - caatinga Escenario II: los pastos se reemplazan por cultivos de maíz Escenario III: los pastos se reemplazan por suelo desnudo
Efecto del uso del suelo sobre la disponibilidad de agua y eficiencia hídrica en cuencas templadas del centro-sur de Chile (Esse et al., 2021)	Analizar los cambios de cobertura del suelo y su efecto sobre la disponibilidad de agua superficial en subcuencas de distinto uso	1984-1998 (15 años)	1999-2013 (15 años)	RSR NSE R ² PBIAS	El modelo se ejecutó en tres cuencas para el periodo 1984-2013 usando mapas de cobertura de suelo para los periodos 2001-2002 y 2017-2018 Las clases generadas fueron: (1) cultivo, (2) bosque, (3) matorral, (4) pastizal, (5) impermeable, (6) agua, (7) tierra desnuda, (8) nieve y hielo.
Modelado de los impactos de las dinámicas del uso y cobertura de la tierra en los procesos hidrológicos de la cuenca hidrográfica de Keleta, Etiopía (Bekele et al., 2021a)	El objetivo de este artículo es, por lo tanto, evaluar el impacto de la dinámica LULC en los procesos hidrológicos de la cuenca del río Keleta, un importante afluente de la cuenca del río Awash.	1988-1993 (6 años)	2005-2008 (4 años)	P-factor R-factor NSE PBIAS RSR	Imágenes de Landsat TM del 1985 y 2011, se utilizaron para extraer dos capas de LULC, las cuales se clasificaron en 6 clases: DL = Tierra degradada, FS = Tierra de cultivo y asentamiento, GL = Tierra de pastoreo, SL = Tierra de arbustos, WB = Cuerpo de agua, F = Bosque
Atribución de cambios en el balance hídrico de una cuenca a cambios en el uso del suelo a través de modelos combinados de la hidrología de la cuenca y la dinámica del uso del suelo (Gunacti et al., 2022)	Emplear la herramienta de modelado SWAT para evaluar los diferentes escenarios de cambio de uso y cobertura del suelo proyectados en la Cuenca del río Küçük Menderes (KMRB), Turquía.	2001-2007 (7 años)	2008-2012 (5 años)	R ² NSE MNSE PBIAS RSR P-factor R-factor	Se seleccionaron los mapas de cobertura terrestre CORINE de 2006 y 2012 para los datos históricos de LULC y el mapa de cobertura terrestre CORINE de 2018 para la validación del modelo LULCC. Mediante el empleo del mapa LULC para 2018 como año base, se pronosticaron los futuros mapas LULC para los años 2025, 2035 y 2050.

R² = Coeficiente de determinación, NSE = Coeficiente de Eficiencia de Nash-Sutcliffe, MNSE = Coeficiente de Eficiencia de Nash-Sutcliffe Modificado, PBIAS = Porcentaje BIAS, RSR = RMSE-desviación estándar de las observaciones, MAE = Error absoluto medio, NRMSE = Error cuadrático medio normalizado, Pe = Error de predicción, d = índice de Willmott



3. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS

3.1. Justificación contextual y científica

El rendimiento hídrico de una cuenca definido como la fracción de precipitación que sale de la cuenca en forma líquida, permite determinar la disponibilidad de agua, y no depende únicamente del clima y la composición topográfica y geológica de la cuenca, sino también de la cobertura vegetal. Se ha documentado, desde hace casi un siglo, respuestas del caudal de cuencas tras cambios en la vegetación, incluyendo alteraciones en el caudal total anual, en su estacionalidad, y en su partición entre "picos de caudal" y "caudal base". Las transformaciones hidrológicas de una cuenca no solo afectan la provisión de agua, sino también la regulación de crecientes e inundaciones (Jobbágy et al., 2013).

En los últimos tiempos ha sido un desafío para los tomadores de decisiones la asignación de los recursos hídricos, puesto que el incremento de la población y la disminución de la disponibilidad de agua han agravado las competiciones entre los diferentes usos del agua. En consecuencia, la demanda creciente de agua en términos de cantidad suficiente y calidad adecuada ha obligado a los planificadores a contemplar y proponer planes para encaminar adecuadamente una gestión y planificación del territorio y los recursos hídricos (Aviles et al., 2016).

En Colombia, pocos estudios han evaluado los impactos del cambio de uso y cobertura del suelo en los procesos hidrológicos de las cuencas, y de acuerdo con la búsqueda bibliográfica, no se han realizado análisis comparativos entre los modelos hidrológicos CEQUEAU y SWAT.

La cuenca del río Garagoa es la principal aportante de agua al embalse La Esmeralda, el cual proporciona potencial hidráulico a la Central Hidroeléctrica de Chivor, una de las más grandes e importantes de Colombia. Esto la convierte en una zona de importancia ambiental, social y económica, donde es fundamental entender y analizar la dinámica del sistema hídrico que la compone. Adicionalmente no se encuentra documentación específica disponible que determine la influencia del uso y cobertura del suelo sobre el caudal en la cuenca. Se espera que con esta investigación se genere nuevo conocimiento que sirva de punto de partida para la realización de este tipo de estudios hidrológicos en la región, útiles para el avance de prácticas y políticas de gestión integral dirigidas a lograr la sostenibilidad ambiental y de los recursos hídricos, así como la planificación adecuada del territorio.



3.2. Objetivo general

Evaluar el impacto del uso y cobertura del suelo (UCS) en el caudal de la cuenca del río Garagoa, empleando los modelos hidrológicos CEQUEAU y SWAT.

3.3. Objetivos específicos

- Procesar la información fisiográfica, de uso y cobertura del suelo e hidrometeorológica disponible de la cuenca del río Garagoa, requerida como entrada para la implementación de los modelos hidrológicos.
- Calibrar y validar los modelos hidrológicos a partir de datos observados con el fin de obtener simulaciones hidrológicas frente a condiciones de cambio de uso y cobertura del suelo.
- Contrastar los resultados de producción hídrica obtenidos de los modelos hidrológicos CEQUEAU y SWAT para determinar ventajas y/o desventajas de estos, a partir de la evaluación de criterios de comparación entre ambos modelos.
- Analizar los resultados de simulación del comportamiento hidrológico en la cuenca como herramienta para la toma de decisiones en la gestión integral del recurso hídrico en la zona de estudio.



4. MARCO CONCEPTUAL

4.1. Morfometría de una cuenca

La morfometría de una cuenca hidrográfica corresponde a las características cuantitativas que describen su forma, tamaño y estructura, estos parámetros son fundamentales para el estudio hidrológico y la gestión de recursos hídricos, puesto que influyen en el comportamiento hidrológico de la cuenca, incluyendo la escorrentía, la infiltración y el caudal. Según F. Gaspari et al. (2012) el análisis morfométrico es el estudio de un conjunto de variables lineales, de superficie, de relieve y drenaje; permite conocer las características físicas y comparar entre varias cuencas, lo cual permite realizar comparaciones entre varias cuencas, así como ayuda a la interpretación de la funcionalidad hidrológica y en la definición de las estrategias para la formulación de su manejo.

La forma de la cuenca interviene de manera importante en las características del hidrograma de descarga de una determinada corriente, particularmente en los eventos de avenidas máximas, en general, las cuencas de igual área, pero de diferente forma, generan hidrogramas diferentes. Es evidente que hay un componente probabilístico significativo en la determinación de una cuenca mediante sus parámetros y las características de la red de drenaje. Por ello, se han buscado relaciones de similitud geométrica entre las características medias de una cuenca y su red de canales con las de otras cuencas. La forma de la cuenca influye en la velocidad del escurrimiento superficial. Para cuencas con la misma superficie, pero formas diferentes, se espera un comportamiento hidrológico distinto. La medición de los factores de forma de una cuenca se realiza mediante una metodología que cumple dos objetivos. El primero es permitir la comparación de la forma de la cuenca con figuras geométricas conocidas; el segundo es posibilitar la comparación de los resultados de las mediciones, los cuales son adimensionales, con los obtenidos en otras cuencas de las que se tiene más información histórica sobre su comportamiento hidrológico. (Cardona, 2015).

Las principales características morfométricas de una cuenca se describen a continuación:

- **Superficie de la cuenca**

Está definida como la proyección horizontal de toda la superficie de drenaje de un sistema de escorrentía dirigido directa o indirectamente a un mismo cauce natural. Corresponde a la superficie definida por la línea divisoria de aguas de la zona de estudio; este parámetro



generalmente se expresa en km^2 . Este valor es importante porque un error en su medición incide directamente en los resultados, por lo que se hace necesario realizar mediciones contrastadas para tener total confianza en este valor (Cardona, 2015).

- **Perímetro de la cuenca**

Es la longitud sobre un plano horizontal que recorre la divisoria de aguas. Este parámetro se mide en unidades de longitud y se expresa normalmente en metros o kilómetros (Cardona, 2015).

- **Elevación media**

Es la variación altitudinal de la cuenca hidrográfica que incide directamente sobre el clima y, por ende, en el régimen hidrológico, además de proporcionar una base para caracterizar diferentes zonas climatológicas y ecológicas dentro de la misma cuenca. Una manera conveniente y objetiva de describir la relación entre la propiedad altimétrica de la cuenca en un plano y su elevación es mediante la función hipsométrica. Esta función se determina a partir de la "curva hipsométrica" de la cuenca. (CVC, 2018).

- **Curva hipsométrica**

La curva hipsométrica es la representación gráfica de la variación de la elevación de una cuenca, en la que se observa la distribución de las zonas altas, medias y bajas. Se utiliza en conjunto con los registros de precipitación para sectorizar las zonas con diferente pluviometría y para estimar la relación entre la elevación y la precipitación. La curva hipsométrica representa el porcentaje de área acumulada que es igualado o excedido a una determinada cota (CVC, 2018).

Con base en el análisis hipsométrico, se puede determinar el ciclo erosivo y la etapa evolutiva en la que se encuentra la cuenca, tal como se muestra en la Figura 4.1:

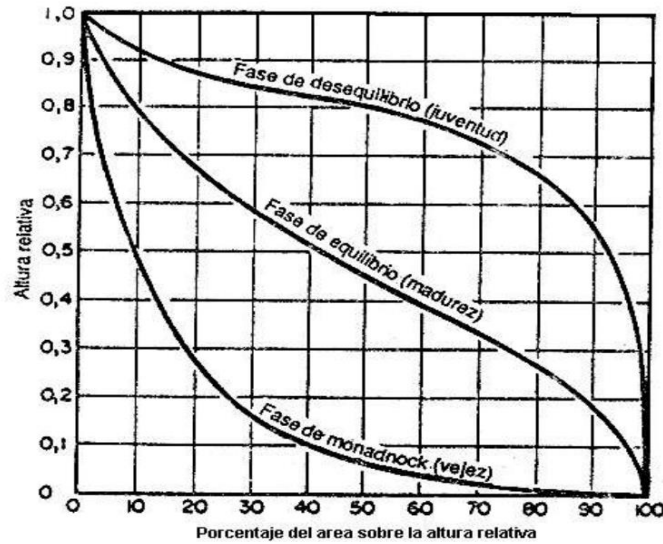


Figura 4.1. Modelo de curvas hipsométricas del ciclo de erosión (Guerra & González, 2002)

- **Pendiente media de la cuenca**

Corresponde al promedio de las pendientes de la cuenca, es un parámetro muy importante que determina el tiempo de concentración y su influencia en las máximas crecidas y en el potencial de degradación de la cuenca, sobre todo en terrenos desprotegidos de cobertura vegetal. Existen variadas metodologías, tanto gráficas como analíticas, que permiten estimar la pendiente de la cuenca. Este parámetro se relaciona directamente con la magnitud del socavamiento o erosión en profundidad y con la capacidad de transporte de sedimentos en suspensión y de arrastre. Dependiendo de la pendiente, existirán tramos críticos de erosión y tramos críticos de sedimentación, los primeros relacionados con las mayores pendientes y la segunda con las mínimas (Ortiz Vera, 2004)

En la Tabla 4-1, se presenta la clasificación de las cuencas de acuerdo con la pendiente promedio de laderas.

Tabla 4-1. Clasificación de las cuencas de acuerdo con la pendiente de laderas

Pendiente (%)	Tipo de relieve
0 - 3	Plano
3 - 7	Suave
7 - 12	Mediano
12 - 35	Accidentado



Pendiente (%)	Tipo de relieve
35 - 50	Fuerte
50 - 75	Muy fuerte
> 75	Escarpado

Fuente: Adoptado de (Ortiz Vera, 2004)

- **Coefficiente de compacidad (Gravelius)**

Este parámetro compara la forma de la cuenca con la de una circunferencia, cuyo círculo inscrito tiene la misma área de la cuenca en estudio. Se define como la razón entre el perímetro de la cuenca que es la misma longitud de la divisoria de aguas y el perímetro de la circunferencia. Este coeficiente adimensional, independiente del área estudiada tiene por definición un valor de uno para cuencas imaginarias de forma exactamente circular. Nunca los valores del coeficiente de compacidad serán menores que uno (Tabla 4-2). El grado de aproximación de este índice a la unidad indicará la tendencia a concentrar fuertes volúmenes de aguas de escurrimiento, siendo más acentuado cuanto más cercano a uno sea, es decir mayor concentración de agua (Cardona, 2015).

Tabla 4-2. Formas de la cuenca de acuerdo con el Índice de compacidad

Clase de forma	Índice de compacidad	Forma de la cuenca
Clase I	1.0 a 1.25	Casi redonda a oval - redonda
Clase II	1.26 a 1.50	Oval – Redonda a oval oblonga
Clase III	1.51 o más de 2	Oval – oblonga a rectangular - oblonga

Fuente: Meza Aliaga et al. (2014)

- **Relación circular**

Este coeficiente es el cociente entre el área de la cuenca y la del círculo cuya circunferencia es equivalente al perímetro de la cuenca. Su valor es unitario para una cuenca circular, para el caso de una cuenca cuadrada, corresponde a un valor de 0.785.

- **Relación hipsométrica**

Se conoce cómo relación hipsométrica a la relación entre el área sobre la curva y el área bajo la curva de la curva hipsométrica, un valor de relación hipsométrica igual a 1, corresponde a una cuenca con equilibrio morfológico, es decir en etapa de madurez.



- **Longitud del eje del río principal**

Es la longitud del cauce principal, medida desde el punto de concentración hasta el tramo de mayor longitud de este. Generalmente, los caudales medios, máximos y mínimos crecen con la longitud de los cauces. Esto se debe a la normal relación que existe entre las longitudes de los cauces y las áreas de las cuencas hidrográficas correspondientes, de tal manera que el área crece con la longitud y la superficie de captación (CVC, 2018).

- **Longitud directa del río principal**

Es la distancia existente entre la desembocadura y el punto más lejano de la cuenca. Es el mismo eje de la cuenca.

- **Coefficiente de sinuosidad hidráulica**

La sinuosidad de un cauce es el mecanismo natural por el cual un río ajusta su pendiente cuando la del valle por donde fluye es mayor que la necesaria. La configuración y geometría de un cauce con meandros están determinadas por los procesos de erosión y degradación que ocurren en el canal. La movilidad de los meandros puede clasificarse en dos categorías: a) la migración hacia aguas abajo de todo el meandro y b) la expansión de la curvatura del meandro, su estrangulamiento y finalmente el corte de este. El desarrollo de meandros incrementa la longitud del río y por consiguiente disminuye la pendiente. El movimiento de meandros se manifiesta mediante procesos de erosión y sedimentación actuando simultáneamente. Las velocidades del flujo en las curvas exteriores son significativamente mayores que las velocidades en las curvas interiores; mientras que en la curva exterior se espera erosión, en la curva interior se espera sedimentación (Ceballos López, 2011).

- **Altitud máxima del cauce**

Corresponde al punto más elevado de la corriente principal, es el punto de nacimiento del río.

- **Altitud mínima del cauce**

Corresponde al punto menos elevado de la corriente principal, usualmente, el punto de salida de la cuenca o en el sitio de estudio.



- **Pendiente promedio del río principal**

Es el promedio de las pendientes del cauce principal. Está relacionada con la velocidad del agua para transportar sedimentos dependiendo de la variación de inclinación del terreno el cual influye en el comportamiento de la creciente de un cauce según la cantidad de lluvia que se deposite y se puede calcular por varios métodos, en este caso se utiliza el método de elevaciones extremas, la relación entre la altura total del cauce principal (cota máxima menos cota mínima) y la longitud de este (CVC, 2018).

- **Tiempo de concentración**

Se define como el tiempo mínimo necesario para que todos los puntos de una cuenca estén aportando agua de escorrentía de forma simultánea al punto de salida, punto de desagüe o punto de cierre. Está determinado por el tiempo que tarda en llegar a la salida de la cuenca el agua que procede del punto hidrológicamente más alejado, y representa el momento a partir del cual el caudal de escorrentía es constante, al tiempo que máximo; el punto hidrológicamente más alejado es aquél desde el que el agua de escorrentía emplea más tiempo en llegar a la salida (Ibáñez Asensio et al., 2011). Existen diferentes metodologías para el cálculo del tiempo de concentración, entre las principales están la ecuación de *Kirpich* y la de *California Highways and Public Works*.

4.2. Uso y cobertura del suelo en Colombia

Ante la necesidad del país de contar con información estandarizada, actualizada y periódica de coberturas de la tierra para los diferentes procesos de planificación, ordenación y toma de decisiones, se estableció un proyecto conjunto en el año 2004, entre el IDEAM, Cormagdalena y el IGAC, y con el apoyo financiero del Fondo Francés para el Medio Ambiente Mundial (FFEM) y técnico de ONF Andina e IGN, para la implementación de la metodología *Corine Land Cover*, utilizada en Europa y otras regiones de América Central, a partir de su ajuste y adaptación a las condiciones nacionales (IDEAM, 2021).

La implementación de la metodología *Corine Land Cover* a nivel nacional ha sido un proceso interinstitucional, liderado por el IDEAM, en el cual han participado los institutos de investigación del SINA, junto con Parques Nacionales Naturales (PNN), Cormagdalena, IGAC y WWF-Colombia, que ha generado como resultados las capas nacionales de coberturas de la tierra para los periodos 2000-2002; 2005-2009 y 2010-2012, a escala 1:100.000. En el 2016, el IDEAM culminó el proceso de consolidación de la capa de



coberturas de la tierra, periodo 2010-2012, que incluyó la información generada por el Instituto Sinchi, el IGAC y Parques Nacionales Naturales, siendo esta la cartografía oficial más actual con la que se contaba, antes de la recientemente publicada del año 2018 (IDEAM, 2021).

Dentro del programa CORINE (*Coordination of information on the environment*) promovido por la Comisión de la Comunidad Europea fue desarrollado el proyecto de cobertura de la tierra *Corine Land Cover* 1990 (CLC90), el cual definió una metodología específica para realizar el inventario de la cobertura de la tierra. La base de datos de *Corine Land Cover* Colombia (CLC) permite describir, caracterizar, clasificar y comparar las características de la cobertura de la tierra, interpretadas a partir de la utilización de imágenes de satélite de resolución media (*Landsat*), para la construcción de mapas de cobertura a diferentes escalas (IDEAM, IGAC y CORMAGDALENA, 2008).

El esquema metodológico *Corine Land Cover* contempla las siguientes etapas: adquisición y preparación de la información; análisis e interpretación de las coberturas; verificación de campo, control de calidad y generación de la capa temática escala 1:100.000 (IDEAM, IGAC y CORMAGDALENA, 2008).

La clasificación de las diferentes categorías de uso y cobertura del suelo, bajo la metodología *Corine Land Cover*, se divide en 3 niveles principales, como se presenta en la Tabla 4-3.

Tabla 4-3. Clasificación de usos y coberturas del suelo *Corine Land Cover*, adaptado a Colombia

Código nivel 1	Cobertura a nivel 1	Código nivel 2	Cobertura a nivel 2	Código nivel 3	Cobertura a nivel 3
1	Territorios artificializados	1.1	Zonas urbanizadas	1.1.1	Tejido urbano continuo
				1.1.2	Tejido urbano discontinuo
		1.2	Zonas industriales o comerciales y redes de comunicación	1.2.1	Zonas industriales o comerciales
				1.2.2	Red vial, ferroviaria y terrenos asociados
				1.2.3	Zonas portuarias
				1.2.4	Aeropuertos
				1.2.5	Obras hidráulicas
		1.3	Zonas de extracción minera y escombrera	1.3.1	Zonas de extracción minera
				1.3.2	Zona de disposición de residuos
		1.4		1.4.1	Zonas verdes urbanas



			Zonas verdes artificializadas, no agrícolas	1.4.2	Instalaciones recreativas
2	Territorios agrícolas	2.1	Cultivos transitorios	2.1.1	Otros cultivos transitorios
				2.1.2	Cereales
				2.1.3	Oleaginosas y leguminosas
				2.1.4	Hortalizas
				2.1.5	Tubérculos
		2.2	Cultivos permanentes	2.2.1	Cultivos permanentes herbáceos
				2.2.2	Cultivos permanentes arbustivos
				2.2.3	Cultivos permanentes arbóreos
				2.2.4	Cultivos agroforestales
				2.2.5	Cultivos confinados
		2.3	Pastos	2.3.1	Pastos limpios
				2.3.2	Pastos arbolados
				2.3.3	Pastos enmalezados
		2.4	Áreas agrícolas heterogéneas	2.4.1	Mosaico de cultivos
				2.4.2	Mosaico de pastos y cultivos
				2.4.3	Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales
				2.4.4	Mosaico de pastos con espacios naturales
2.4.5	Mosaico de cultivos con espacios naturales				
3	Bosques y áreas seminaturales	3.1	Bosques	3.1.1	Bosque denso
				3.1.2	Bosque abierto
				3.1.3	Bosque fragmentado
				3.1.4	Bosque de galería y ripario
				3.1.5	Plantación forestal
		3.2	Área con vegetación herbácea y/o arbustiva	3.2.1	Herbaza I
				3.2.2	Arbustal
				3.2.3	Vegetación secundaria o en transición
		3.3	Áreas abiertas, sin o con poca vegetación	3.3.1	Zonas arenosas naturales
				3.3.2	Afloramientos rocosos
				3.3.3	Tierras desnudas y degradadas
				3.3.4	Zonas quemadas
				3.3.5	Zonas glaciares y nivales
4	Áreas húmedas	4.1	Áreas húmedas continentales	4.1.1	Zonas pantanosas
				4.1.2	Turberas
				4.1.3	Vegetación acuática sobre cuerpos de agua
		4.2		4.2.1	Pantanos costeros-



			Áreas húmedas costeras	4.2.2	Salitral
				4.2.3	Sedimentos expuestos en baja mar
5	Superficies de agua	5.1	Aguas continentales	5.1.1	Ríos
				5.1.2	Lagunas, lagos y ciénagas naturales
				5.1.3	Canales
				5.1.4	Cuerpos de agua artificiales
		5.2	Aguas marítimas	5.2.1	Lagunas costeras
				5.2.2	Mares y océanos
				5.2.3	Estanques para acuicultura marina

Fuente: IDEAM (2021)

4.3. Análisis de cambios del uso y cobertura del suelo y proyección futura con TerrSet

El análisis de cambios de uso y cobertura de suelo, así como la proyección futura de mapas de uso y cobertura del suelo, se puede realizar en el módulo *Land Change Modeler* (LCM) integrado en TerrSet, este es un innovador sistema de apoyo a la toma de decisiones y planificación territorial. Con un flujo de trabajo automatizado y fácil de usar, *Land Change Modeler* simplifica las complejidades del análisis de cambios. *Land Change Modeler* permite analizar rápidamente los cambios en la cobertura del suelo, modelar empíricamente relaciones con variables explicativas y simular escenarios futuros de cambios en el suelo. *Land Change Modeler* también incluye herramientas especiales para la evaluación de estrategias de mitigación del cambio climático REDD (Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación de los Bosques) (Clark Labs, 2020).

Las herramientas para el modelado del cambio del uso del suelo se organizan en forma secuencial en torno a las tareas principales por pestañas en la interfaz del LCM (Clark Labs, 2020):

- **Análisis de cambio de uso del suelo**

Genera rápidamente gráficos y mapas de cambios de uso del suelo, incluidas ganancias y pérdidas, cambios netos y persistencia de transiciones específicas. Descubre tendencias subyacentes de cambios complejos en el suelo con una herramienta de abstracción de cambios.



- **Modelado del potencial de transición del uso del suelo**

Esta herramienta permite generar áreas potenciales de transición del uso del suelo que expresan la probabilidad de que el suelo realice una transición en el futuro utilizando una de varias metodologías: una Red Neuronal de Perceptrón Multicapa (MLP) con informes completos sobre el poder explicativo de las variables impulsoras, regresión logística, *Decision Forest* (implementación de *Random Forest*), Máquina de vectores de soporte, Probabilidad normalizada ponderada y *SimWeight*, un procedimiento de aprendizaje automático modificado. A la herramienta se incorporan variables dinámicas que impulsen o expliquen el cambio.

Si se usa MLP, se puede modelar varias o incluso todas las transiciones a la vez, asumiendo que estas transiciones agrupadas (sub-modelo) comparten los mismos determinantes impulsores subyacentes para la predicción.

- **Predicción de cambios**

Esta herramienta incorpora intervenciones de planificación, incentivos y limitaciones, como áreas de reserva y cambios de infraestructura que puedan alterar el curso del desarrollo al modelar escenarios futuros. Además, realiza un mapeo de escenarios mediante la creación de un mapa de predicción estricta basado en un modelo de competencia por el suelo con múltiples objetivos con una sola realización o un mapa de predicción flexible que sea un mapa continuo de vulnerabilidad al cambio.

El procedimiento predeterminado para determinar la cantidad de cambio que ocurrirá en algún momento en el futuro es mediante una Cadena de Markov. Un proceso Markoviano es aquel en el que el estado de un sistema se puede determinar conociendo su estado anterior y la probabilidad de transición de cada estado a otro. Para determinar esto, LCM realiza una llamada al módulo MARKOV de TerrSet en el momento en que se ejecuta una predicción. Utilizando los mapas de cobertura terrestre anteriores y posteriores junto con la fecha especificada, MARKOV calcula exactamente cuánto suelo se esperaría que pasara de la fecha posterior a la fecha de predicción basándose en una proyección de los potenciales de transición hacia el futuro. Esto no es una simple extrapolación lineal, ya que los potenciales de transición cambian con el tiempo a medida que las diversas transiciones alcanzan un estado de equilibrio. Las probabilidades de transición de Markov predeterminadas se calculan ingresando la fecha de finalización de la predicción (Eastman, 2020).



- **Análisis REDD**

Esta herramienta evalúa las estrategias de conservación forestal relacionadas con REDD y los escenarios de impacto de carbono con una contabilidad completa del impacto de las emisiones de GEI. Evalúa la adicionalidad de los proyectos REDD y los escenarios de proyección de continuidad.

El *Land Change Modeler* tiene los siguientes requisitos para los mapas de cobertura del suelo de entrada utilizados para el análisis y la predicción de cambios:

- Que las leyendas en ambos mapas sean las mismas.
- Que las categorías en ambos mapas sean iguales y secuenciales. comenzando con 1 para las categorías que no son de fondo.
- Que los fondos en ambos mapas sean iguales y tengan valor cero.
- Que las dimensiones espaciales incluyendo resolución y coordenadas sean las mismas.

4.4. Productos satelitales de precipitación y temperatura

Los productos satelitales de precipitación son conjuntos de datos generados a partir de observaciones de satélites que proporcionan información sobre la cantidad y distribución de la precipitación en la superficie de la Tierra. Estos productos son útiles para una variedad de aplicaciones, incluyendo la meteorología, la hidrología, la gestión de recursos hídricos, la monitorización ambiental, la investigación científica, la prevención de desastres naturales y la agricultura. Los productos satelitales de temperatura son conjuntos de datos generados a partir de observaciones satelitales que proporcionan información sobre la temperatura de la superficie terrestre o de la atmósfera en diferentes niveles.

4.4.1. CHIRPS - Precipitación

CHIRPS (*Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations*) es una base de datos de precipitación casi global creada en colaboración con científicos del *Climate Hazards Center* de la Universidad de California y el *U.S Geological Survey* (USGS), con el apoyo de fondos de USAID, NASA y NOAA. Contiene información desde 1981 hasta el presente y una extensión espacial con datos únicamente en las zonas terrestres abarcando desde las latitudes 50° S a 50° N y todas las longitudes, con información cada 0.05°, es decir, cada 5.5 km. Las resoluciones temporales son días, pentadas (5 días), meses y años.



CHIRPS incorpora imágenes satelitales con datos de estaciones in situ para crear series temporales de precipitaciones cuadriculadas para análisis de tendencias y monitoreo de sequías estacionales (Funk et al., 2015).

4.4.2. IMERG - Precipitación

IMERG (*Integrated Multi-satellitE Retrievals for the Global Precipitation Measurement*) es el algoritmo de precipitación actualizado de la NASA, mientras que la misión de Medición de la Precipitación Global (GPM) es una misión satelital internacional lanzada por la NASA y JAXA el 27 de febrero de 2014. El GPM es una continuación de la misión del satélite TRMM. La NASA ha aplicado el algoritmo IMERG a los datos de la era TRMM y de la era GPM, creando un registro de precipitación basado en satélites relativamente largo (más de 20 años), de alta resolución espacial (0.1 grados) y temporal (30 minutos) con cobertura global (pero de valor limitado en las regiones polares) (Huffman et al., 2023).

La versión más actualizada de IMERG es la versión 07, la cual implica una amplia gama de cambios en todos los aspectos del algoritmo, muchos de los cuales se implementan en respuesta a los comentarios sobre la versión 06, que fue la primera vez que el registro IMERG abarcó las eras TRMM-GPM. IMERG V07 será reprocesado para todo el registro TRMM-GPM y, por lo tanto, reemplaza todas las versiones IMERG anteriores (NASA & GPM, 2023).

Este algoritmo está destinado a intercalibrar, fusionar e interpolar “todas” las estimaciones de precipitación por microondas de los satélites, junto con estimaciones de satélites infrarrojos (IR) calibrados por microondas, análisis de pluviómetros y potencialmente otros estimadores de precipitación en escalas temporales y espaciales finas para TRMM y GPM. (NASA & GPM, 2023).

4.4.3. ERA5 - Indicadores agrometeorológicos desde 1979 hasta la actualidad derivados de reanálisis

Los indicadores agrometeorológicos desde 1979 hasta la actualidad derivados de reanálisis publicados por el *Copernicus Climate Change Service* de la Unión Europea, son un conjunto de datos meteorológicos de superficie diarios para el período comprendido entre 1979 y el presente como insumo para estudios agrícolas y agroecológicos. Este conjunto de datos se basa en los datos horarios del ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) ERA5 a nivel de superficie y se denomina AgERA5. Los reanálisis climatológicos



o “reconstrucciones” del clima, son el resultado de la combinación de observaciones meteorológicas globales de diferentes fuentes, como pueden ser estaciones convencionales en tierra, marítimas y aéreas, radiosondeos, imágenes satelitales, y datos meteorológicos modelados, obtenidos mediante predicciones numéricas (Siles Soria, 2022).

Los datos están publicados en pasos de tiempo diarios en la zona horaria local y se corrigieron hacia una topografía más fina con una resolución espacial de $0.1^\circ \times 0.1^\circ$. La corrección a la cuadrícula de 0.1° se realizó aplicando ecuaciones de regresión específicas de la cuadrícula y de la variable al conjunto de datos ERA5 interpolado en la cuadrícula de 0.1° . Las ecuaciones se entrenaron en el modelo atmosférico operativo de alta resolución (HRES) del ECMWF con una resolución de 0.1° . De esta manera, los datos se ajustan a la topografía más precisa, el patrón de uso de la tierra más preciso y la delimitación más precisa entre tierra y mar del modelo ECMWF HRES (Copernicus et al., 2023).

Los datos meteorológicos disponibles para descarga corresponden a: velocidad del viento de 10 m, temperatura de punto de rocío de 2 m, humedad relativa de 2 m, temperatura máxima y mínima de 2 m, cubierto de nubes, fracción de duración de la precipitación líquida, flujo de precipitación, espesor de nieve, espesor de nieve LWE, flujo de radiación solar, fracción de duración de la precipitación sólida y presión de vapor.

4.5. Modelo hidrológico CEQUEAU

En este numeral se describe conceptualmente el modelo hidrológico CEQUEAU y los datos requeridos para la implementación de este.

4.5.1. Descripción del modelo CEQUEAU

El modelo CEQUEAU (Morin et al., 1998), se desarrolló en el Instituto Nacional de la Investigación Científica-Agua (INRS-EAU) de la Universidad de Québec, Canadá. CEQUEAU es un modelo hidrológico determinista distribuido; el cual permite reproducir el escurrimiento de una cuenca, donde la cuenca es dividida en superficies elementales o cuadros, lo cual le permite al modelo calcular los caudales en cualquier cuadro y tener en cuenta las variaciones espacio temporales de las características fisiográficas de la cuenca. El modelo toma en cuenta las características físicas de la cuenca y sus variaciones tanto en tiempo como en espacio, esto es posible gracias a la descomposición espacial de la cuenca en cuadros enteros y en cuadros parciales. Un cuadro parcial es el resultado de la

subdivisión de un cuadro entero en un máximo de cuatro elementos definidos por los parteaguas internos, el cuadrado parcial es identificado por sus coordenadas reales I y J y la letra A, B, C o D; esta subdivisión permite tomar en cuenta la influencia que tiene la topografía sobre la dirección del escurrimiento (Figura 4.2). El modelo CEQUEAU permite estimar caudales en puntos aforados como en puntos no aforados de la cuenca, y ofrece la posibilidad de simular la existencia de almacenamientos artificiales (Magaña Hernández et al., 2008).

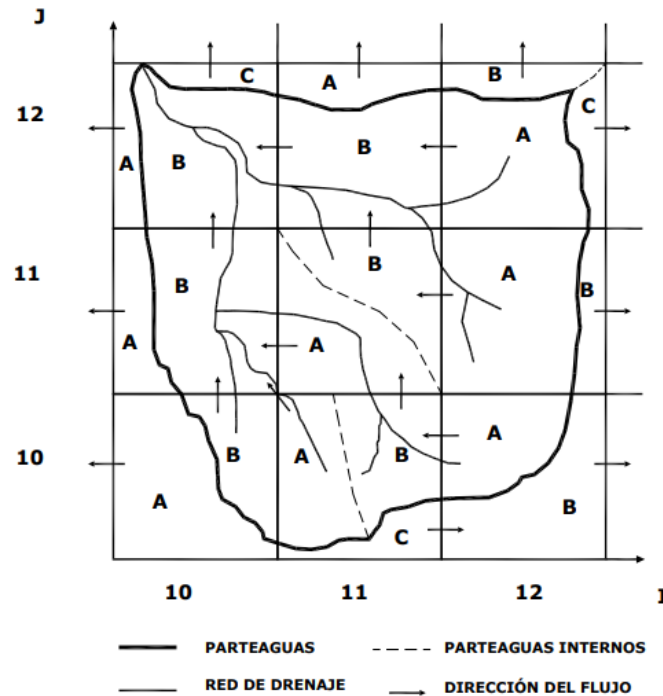


Figura 4.2. Discretización de la cuenca en CEQUEAU. Adaptada de Morin & Paquet (1995)

El modelo se encuentra estructurado en dos módulos principales, que en conjunto describen el escurrimiento del agua desde que alcanza la superficie de la cuenca hasta la llegada al punto de salida (estación hidrométrica). El primero de ellos, conocido como función de producción (Figura 4.3), tiene como objetivo la producción de flujo vertical de agua (lluvia, evapotranspiración, infiltración, etc.) en el suelo y está esquematizada por diferentes reservorios intercomunicados y el segundo, llamado función de transferencia (Figura 4.4), analiza, precisamente, la transferencia del flujo en la red de drenaje y tiene en cuenta la influencia de lagos, ciénegas e instalaciones artificiales tales como presas y derivaciones, entre otras. Está dirigida al enrutamiento del canal y utiliza determinados factores de drenaje a partir de datos fisiográficos (Magaña Hernández et al., 2008).

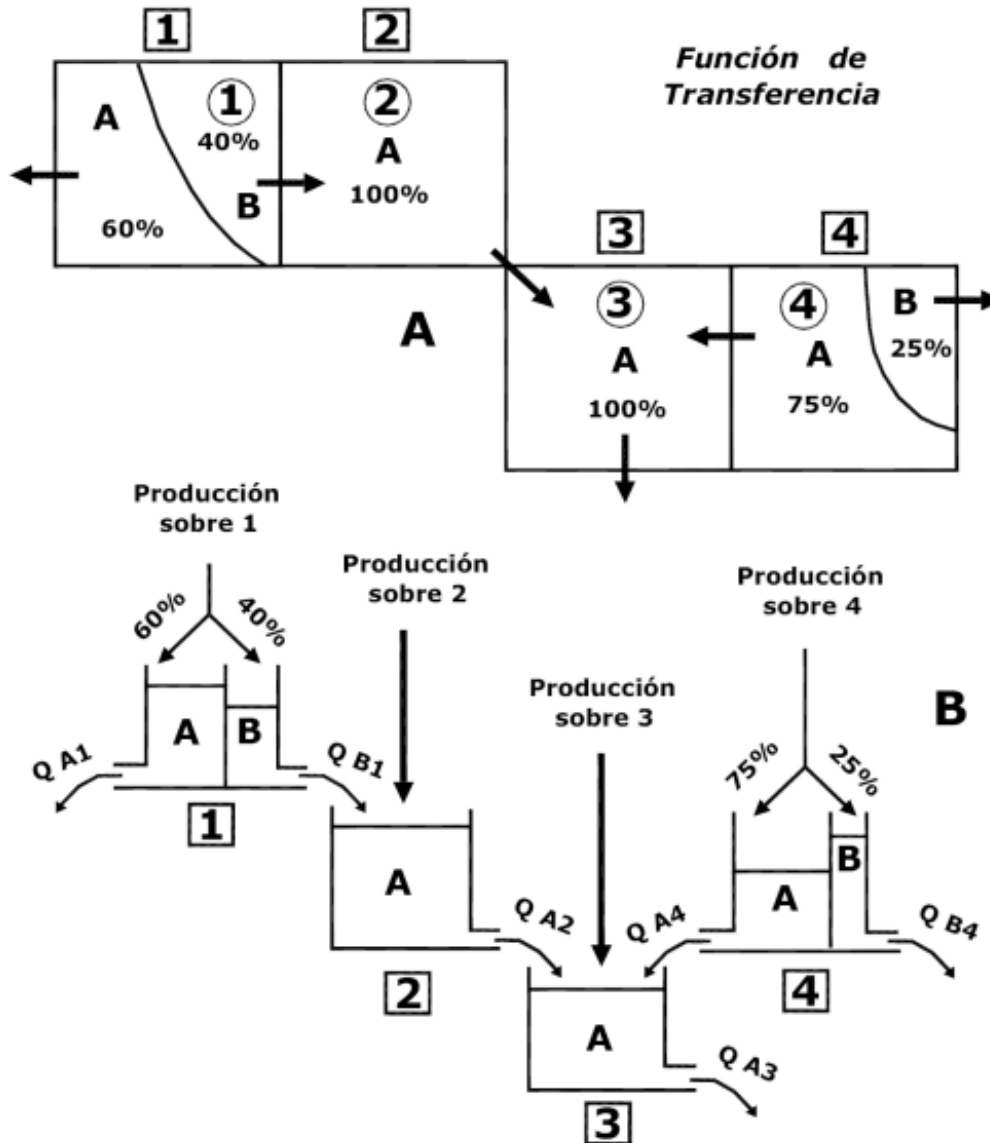


Figura 4.4. Función de transferencia del modelo CEQUEAU. Adaptada de Morin & Paquet (1995)

Por su parte, la evapotranspiración se establece a partir de la fórmula de *Thornthwaite* modificada (Morin & Paquet, 1995) para considerar:

- La duración de la radiación solar potencial según la latitud y el día del año.
- Agua disponible en la capa superficial de la tierra.

La siguiente ecuación calcula la evapotranspiración usando la fórmula modificada de *Thornthwaite*:



$$ETHORN_D = \left(\frac{10}{30.4}\right) * 1.62 \left(\frac{10 * TJE}{XIT}\right)^{XAA}$$

Ecuación 4-1

Donde:

$ETHORN_D$ = Evapotranspiración diaria (mm)

TJE = Temperatura media del paso del tiempo sobre el cuadro considerado (°C)

XAA = Exponente de la fórmula de Thorthwaite

XIT = Valor del índice de Thorthwaite

30.4 = Número de días por mes

Existe un programa disponible en el menú de herramientas del modelo distribuido CEQUEAU que permite el cálculo del exponente y el índice de la fórmula de *Thornthwaite*. El cual requiere los datos de las temperaturas medias mensuales de la estación meteorológica que se encuentre más cercana al centroide de la cuenca hidrológica (Magaña Hernández et al., 2008).

De acuerdo con los esquemas, los escurrimientos superficial y retardado dependen del nivel de agua en el recipiente suelo, de los coeficientes conceptuales de vaciado y de las propias cotas de vaciado de dicho recipiente. En este sentido, el escurrimiento superficial tiene lugar cuando la altura de agua disponible en este recipiente (HS o HSINI) rebasa la altura de este (HSOL). El escurrimiento retardado se produce si la altura de agua en el recipiente (HS o HSINI) es superior al umbral del orificio de vaciado (HINT), o, en otras palabras, cuando el volumen de agua infiltrada es mayor que el déficit de humedad del suelo.

Los escurrimientos superficial y subsuperficial generados en cada elemento se adicionan a los escurrimientos que ocurren en las superficies impermeables, para dar lugar a una parte de la lámina de agua finalmente disponible para su incorporación a los cauces. Por otro lado, hay que considerar la parte de agua que potencialmente puede infiltrarse si existe un acuífero subyacente, y que se va a infiltrar a través de la zona no saturada, alimentando directamente a un segundo recipiente (acuífero). Las salidas o aportaciones que se deriven de dicho recipiente dependerán de la cota del nivel piezométrico en el acuífero, de los coeficientes de vaciado y de dos alturas de vaciado definidas para diferentes situaciones

hidráulicas. Estas aportaciones llegan a las láminas de agua precedentes, determinando la cantidad total de agua disponible en la cuenca para el escurrimiento en los cauces.

La función de producción, por tanto, está orientada a obtener un volumen de agua disponible para ser inmediatamente transferido. Dicha transferencia se efectúa de elemento en elemento. El volumen de agua disponible en cada cuadro parcial se obtiene multiplicando la lámina de agua producida por el cuadro entero por la superficie del elemento parcial considerado. Este volumen se suma a los volúmenes entrantes a este elemento, procedentes de los cuadros parciales vecinos (Magaña Hernández et al., 2008).

4.5.2. Estructura general del modelo CEQUEAU

La Figura 4.5 muestra la estructura general del modelo CEQUEAU. Está compuesto de módulos de procesamiento que requiere algunos datos en archivos o de una base de datos (la base de datos puede ser reemplazada por algunos archivos).

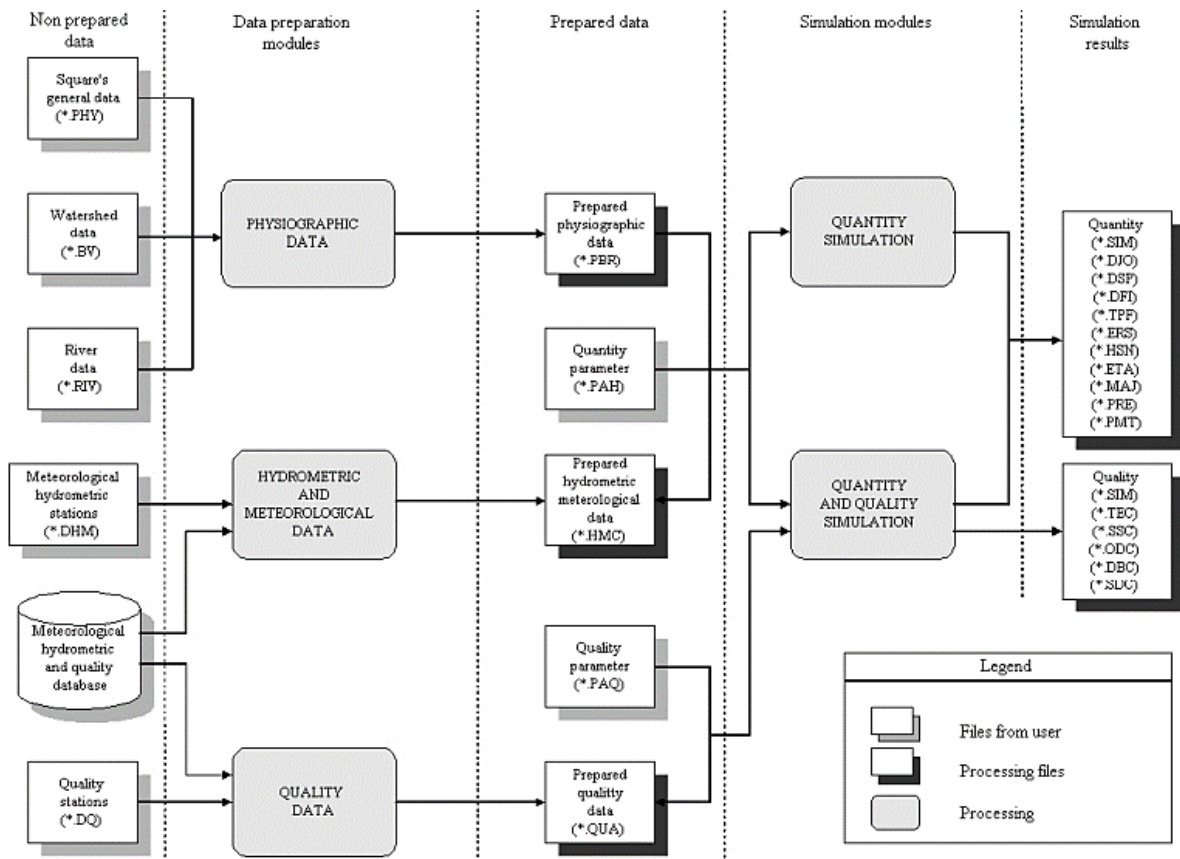


Figura 4.5. Estructura general del modelo hidrológico CEQUEAU

Fuente: Morin (2003)



4.5.2.1. Módulos de procesamiento

Los módulos de procesamiento se dividen en dos grupos: los módulos de preparación de datos y los módulos de simulación.

- **Módulos de preparación de datos**

Datos fisiográficos: Este módulo se utiliza para la preparación de los datos fisiográficos necesarios para los módulos de simulación.

Datos hidrométricos y meteorológicos Este módulo se utiliza para la preparación de los datos hidrométricos y meteorológicos necesarios para los módulos de simulación. También calcula los promedios mensuales de estos datos.

- **Módulos de simulación**

Simulación de cantidad: Este módulo ejecuta la simulación de cantidad del modelo hidrológico CEQUEAU.

Simulación de cantidad y calidad: El modelo CEQUEAU también incluye un módulo que permite la simulación de la cantidad y la calidad del agua en el río.

4.5.2.2. Archivos de datos

Los módulos descritos anteriormente obtienen su información de archivos de datos que pueden ser de tres tipos: archivos de datos no preparados, archivos de datos preparados y archivos de resultados.

El módulo de simulación requiere datos en un orden muy preciso, según un formato muy riguroso y sin datos faltantes. Estos datos preparados pueden producirse a partir de los archivos de datos no preparados mediante los módulos de preparación de datos, como se describió anteriormente.

Solo un archivo de datos preparados no es el resultado de un proceso de preparación; este es el archivo de parámetros de cantidad (extensión PAH). Este archivo debe ser preparado directamente por el usuario con el editor CEQUEAU (Morin, 2003). Los tres tipos de datos son:



4.5.2.2.1. Datos no preparados

- **Datos generales de cuadrícula:** El archivo de datos generales de cuadrícula se utiliza para introducir los datos fisiográficos de todas las cuadrículas completas de la cuenca y para esquematizar la dirección del flujo con las cuadrículas parciales. Estos datos tienen valores fijos y generalmente provienen de los mapas topográficos de la cuenca o con la ayuda de SIG. Normalmente, este archivo lleva el nombre del proyecto seguido de la extensión PHY (Morin, 2003).
- **Datos de la cuenca:** Los datos de la cuenca se utilizan para producir la cuenca en estudio utilizando el archivo de datos generales de cuadrícula descrito anteriormente. Normalmente, este archivo lleva el nombre del proyecto seguido de la extensión BV (Morin, 2003).
- **Datos meteorológicos e hidrométricos:** Este archivo contiene los números de las estaciones meteorológicas e hidrométricas de las cuales deben tomarse los datos, ya sea de archivos o de bases de datos, y el período para el cual se requieren estos datos. Los datos meteorológicos son datos de entrada para el modelo. Los datos hidrométricos se utilizan únicamente para la calibración de los parámetros y para la verificación de los caudales simulados por el modelo. El intervalo de tiempo de estos datos puede ser de 1, 2, 3, 4, 6, 8, 12 y 24 horas. El archivo preparado con estos datos usualmente lleva el nombre del proyecto seguido de la extensión DHM (Morin, 2003).

4.5.2.2.2. Datos preparados

- **Datos fisiográficos preparados:** Este archivo se obtiene del módulo de preparación de datos fisiográficos. Será utilizado por el módulo de simulación. Usualmente, este archivo lleva el nombre del proyecto seguido de la extensión PBR (Morin, 2003).
- **Datos meteorológicos e hidrométricos preparados:** Este archivo se obtiene del módulo de preparación de datos hidrométricos y meteorológicos. Será utilizado por el módulo de simulación. Usualmente, este archivo lleva el nombre del proyecto seguido de la extensión HMC (Morin, 2003).
- **Parámetros de cantidad:** Este archivo contiene los parámetros y opciones que serán utilizados por el modelo para las simulaciones de cantidad. Este archivo se prepara con el editor CEQUEAU. Los valores de los parámetros y opciones pueden



variar de una prueba de simulación a la siguiente. Este archivo puede llevar cualquier nombre seguido de la extensión PAH (Morin, 2003).

4.5.3. Datos necesarios para la implementación del modelo CEQUEUAU

De acuerdo con lo presentado en el apartado anterior, el modelo CEQUEUAU requiere de diferentes datos de entrada para evaluar los caudales generados en cada cuadro parcial. Los datos de entrada se pueden dividir de la siguiente manera:

- ✓ Datos fisiográficos
- ✓ Datos de la cuenca
- ✓ Datos hidrometeorológicos

4.5.3.1. Datos fisiográficos

Dado que el modelo reproduce el proceso de escurrimiento en una cuenca, ha sido preciso especificar el movimiento del agua, para lo cual se han subdividido algunos de los elementos cuadrados en elementos parciales, teniendo en cuenta los parteaguas internos, existentes en la cuenca. Esta subdivisión se puede realizar manualmente sobre cartas topográficas escala 1:50 000 o 1: 250 000. Esta subdivisión permite tomar la importancia de la topografía sobre la dirección del escurrimiento. De esta forma cada elemento parcial queda caracterizado por dos variables: el porcentaje de superficie que ocupa en el elemento cuadrado al que se encuentra adscrito y por el código numérico del elemento parcial al que se transfiere el escurrimiento generado, con el fin de establecer una jerarquización de la red de drenaje, elemento por elemento sucesivamente dispuestos aguas abajo (Magaña Hernández et al., 2008).

Los datos fisiográficos que son determinados para cada “cuadro entero” son los siguientes:

- Porcentaje de bosques.
- Porcentaje de lagos.
- Elevación de la esquina inferior izquierda.

Y los datos requeridos para cada "cuadrado parcial" son:

- La dirección del flujo del agua.
- Su porcentaje de área relativo con respecto al “cuadro entero”.



4.5.3.2. Datos de la cuenca

Los datos de la cuenca se obtienen de cartas topográficas, y se componen del cuadro y del código en que se encuentra la estación hidrométrica (salida de la cuenca), el área de la cuenca en km², el número de estaciones hidrométricas adicionales a modelar, los datos de ubicación en cuadros de cada una de las estaciones hidrométricas adicionales (estaciones ficticias), así como su área en km² (Magaña Hernández et al., 2008).

4.5.3.3. Datos hidrometeorológicos

Los datos meteorológicos (precipitación, temperaturas máximas y mínimas) se obtienen de cada una de las estaciones meteorológicas que serán consideradas para el estudio, son datos de entrada en el programa, los hidrométricos se usan solamente para la calibración de los parámetros y para la verificación de la exactitud de los caudales simulados con el modelo. Los datos meteorológicos e hidrométricos en conjunto forman los datos hidrometeorológicos (Magaña Hernández et al., 2008).

4.5.3.4. Parámetros del modelo

Esta parte contiene los parámetros del modelo, las estaciones meteorológicas que serán consideradas, así como el período para el cual se realizará la simulación. En el modelo hidrológico CEQUEAU se pueden distinguir cinco tipos de parámetros (Tabla 4-4):

- Los parámetros de los recipientes (suelo, acuífero y ciénegas).
- Los parámetros que gobiernan la fusión de nieve.
- Los parámetros que gobiernan la evapotranspiración.
- Los parámetros de transferencia.
- Diversos parámetros y constantes.

Algunos de los parámetros se determinan según la física del fenómeno, otros están en función de las características hidrológicas y fisiográficas de la cuenca y los demás se definen a través del proceso de calibración (Magaña Hernández et al., 2008).



Tabla 4-4. Parámetros y constantes del modelo CEQUEAU

Parámetros del recipiente suelo-acuífero-ciénegas		
CIN (*)	a	Coeficiente de infiltración del recipiente suelo hacia el acuífero.
CVMAR (*)	a	Coeficiente de vaciado del recipiente lagos y ciénegas.
CVNB (*)	a	Coeficiente de vaciado del recipiente acuífero (orificio de fondo).
CVNH (*)	a	Coeficiente de vaciado del recipiente acuífero (orificio superior).
CVSB	a	Coeficiente de vaciado del recipiente suelo (orificio de fondo).
CVSI (*)	a	Coeficiente de vaciado del recipiente suelo (orificio intermedio).
HINF (*)	a	Umbral de infiltración hacia el recipiente acuífero.
HINT (*)	a	Umbral de vaciado intermedio del recipiente suelo.
HMAR (*)	a	Umbral de vaciado del recipiente lagos y ciénegas.
HNAP (*)	a	Umbral de vaciado superior del recipiente acuífero.
HRIMP (*)	a	Lámina de lluvia necesaria para que inicie el escurrimiento sobre superficies impermeables.
HSOL (*)	a	Altura del recipiente suelo.
Parámetros que gobiernan la fusión de nieve		
STRNE	b	Umbral de transformación lluvia-nieve.
TFC	b	Tasa de fusión en bosque.
TFD	b	Tasa de fusión en terreno desnudo.
TSC	b	Umbral de temperatura de fusión en bosque.
TSD	b	Umbral de temperatura de fusión de terreno desnudo.
TTD	b	Coeficiente de déficit calorífico de la nieve.
TTS	b	Umbral de madurez del depósito de nieve.
Parámetros que gobiernan la evapotranspiración		
EVNAP	a	Porcentaje de evapotranspiración en el recipiente acuífero.
HPOT (*)	a	Umbral de extracción (por ETP) del agua a tasa potencial.
XAA	b	Umbral de la fórmula de <i>Thornthwaite</i> .
XIT	b	Umbral del índice térmico de <i>Thornthwaite</i> .
Parámetros y constantes de transferencia		
EXXKT	a	Parámetro de ajuste del coeficiente de transferencia.
ZN	c	Tiempo de concentración de la cuenca.



Parámetros y constantes diversas		
COET	b	Coeficiente de corrección de temperaturas con respecto a la altitud.
COEP	b	Coeficiente de corrección de precipitaciones con respecto a la altitud.
FACT	a	Factor de modificación de las precipitaciones medias de los cuadros enteros.
JOEVA	a	Variables que desplazan la fecha de insolación potencial máxima respectivamente para la evapotranspiración y para la nieve.
JONEI	a	
XINFMA	b	Infiltración máxima por día.
XLA	c	Latitud media de la cuenca.
TRI (*)	c	Porcentaje de superficie impermeable.

a: Parámetro determinado por calibración.

b: Parámetro determinado según la física del fenómeno

c: Constante determinada por las características fisiográficas.

(*) El valor de este parámetro puede ser variable en el espacio.

4.6. Modelo hidrológico SWAT

En este numeral se describe conceptualmente el modelo hidrológico SWAT y los datos requeridos para la implementación de este.

4.6.1. Descripción del modelo SWAT

El modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*), en español, Herramienta para la Evaluación del Suelo y Agua, se desarrolló en el Centro de Investigación Agrícola del Servicio de Investigación Agrícola (ARS) del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) en Texas. El modelo a escala fue desarrollado por el Dr. Jeff Arnold para el USDA. El modelo SWAT fue desarrollado para predecir el impacto de las prácticas de manejo del suelo en la generación de agua, sedimentos y producción de sustancias agrícolas químicas, en cuencas grandes y complejas con variedad de suelos, uso de tierra y condiciones de manejo sobre un tiempo prolongado (Uribe, 2010).

SWAT es un modelo continuo de tiempo, es decir un modelo conformado a largo plazo, que no está diseñado para simular un solo acontecimiento de flujo detallado. El modelo SWAT requiere información específica sobre el clima, las propiedades de los suelos, la topografía, la vegetación y las prácticas de manejo de tierra que acontecen en las cuencas para utilizar estas como datos de entrada. Los procesos físicos asociados con el movimiento del agua,

movimiento de sedimento, desarrollo de cosecha, ciclo de nutrientes, etc. son modelados directamente por SWAT (Uribe, 2010).

Para propósitos de la simulación, la cuenca hidrográfica será dividida en un número de subvertientes o subcuencas. El uso de subcuencas en la simulación es muy útil, particularmente, cuando hay diversas áreas de la misma cuenca, que se ven afectadas por el uso de suelos o suelos bastante desiguales, que impactan grandemente la hidrología del sector. Al dividir la cuenca hidrográfica en subcuencas, el usuario puede referirse a diversas áreas de la vertiente de acuerdo con el espacio. La información de entrada para cada subcuenca es agrupada en las siguientes categorías: clima, unidades de respuesta hidrológicas o HRUs, estanques/humedales, agua subterránea, canal principal y drenaje de la subcuenca. Las unidades de respuesta hidrológica son áreas de tierra dentro de la subcuenca que corresponden a todas las únicas posibles combinaciones de cobertura de tierra, suelo, y pendiente en la cuenca (Uribe, 2010).

La simulación hidrológica de la cuenca se divide en dos fases principales. La primera es la Fase Terrestre del ciclo hidrológico (Figura 4.6), esta fase controla la cantidad de agua, sedimentos, las cargas de alimento nutritivo y de pesticida al canal principal en cada subcuenca; la segunda es la Fase de Enrutamiento del ciclo hidrológico, la cual define el movimiento del agua, sedimentos, etc. a través de la red de canales de la cuenca hidrográfica hacia el exutorio (Uribe, 2010).

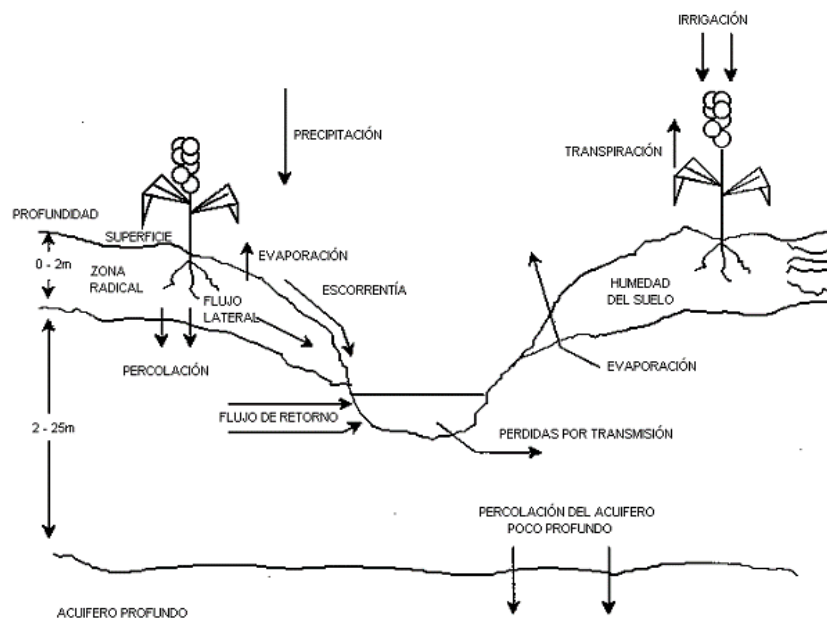


Figura 4.6. Representación del ciclo hidrológico en SWAT (Uribe, 2010)



4.6.1.1. Fase terrestre del ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico es simulado por SWAT basándose en la ecuación del balance hídrico:

$$SW_t = SW_0 + \sum (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw})$$

Ecuación 4-2

dónde SW_t es el contenido final de agua en el suelo (mm H₂O), SW_0 es el contenido inicial de agua del suelo en un día i (mm H₂O), t es el tiempo (días), R_{day} es la cantidad de precipitación en un día i (mm H₂O), Q_{surf} es la cantidad de escorrentía de la superficie en un día i (mm H₂O), E_a es la cantidad de evapotranspiración en día i (mm H₂O), W_{seep} es la cantidad de agua que percola en el perfil del suelo en un día i (mm H₂O), y Q_{gw} es la cantidad de flujo de retorno en un día i (mm H₂O) (Uribe, 2010).

La subdivisión de la cuenca permite al modelo reflejar las diferencias en la evapotranspiración para varias cosechas y suelos. Las escorrentías son predichas separadamente para cada HRU y dirigidas para obtener las escorrentías totales para la cuenca (Uribe, 2010). Lo que aumenta la certeza y da una descripción física mejor del equilibrio del agua. Las diferentes entradas y procesos implicados en esta fase del ciclo hidrológico, son resumidos a continuación:

4.6.1.1.1. Clima

El clima de una cuenca proporciona las entradas de humedad y energía, que controlan el equilibrio del agua y determinan la importancia relativa de los diferentes componentes del ciclo hidrológico. Las variables climáticas requeridas por el modelo SWAT corresponden a: precipitación diaria, temperatura aérea máxima/mínima, radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa (Uribe, 2010). El modelo permite el ingreso de registro de los valores de estos parámetros climatológicos bien sea observados o generados durante la simulación.

4.6.1.1.2. Hidrología

De acuerdo con Uribe (2010), cuando la precipitación desciende, puede ser interceptada y puede ser contenida en el dosel de la vegetación o cae a la superficie del suelo. El agua en la superficie del suelo se infiltrará en el perfil de la tierra o fluirá sobre el terreno como escorrentía. La escorrentía se mueve relativamente rápido hacia un canal de corriente y

contribuye en un corto plazo en la corriente. El agua infiltrada puede ser contenida en el suelo y evapotranspirada posteriormente o puede avanzar lentamente al sistema de agua-superficie a través de pasos subterráneos. Los conductos potenciales de movimiento de agua simulados por SWAT en las HRU son ilustradas en la Figura 4.7.

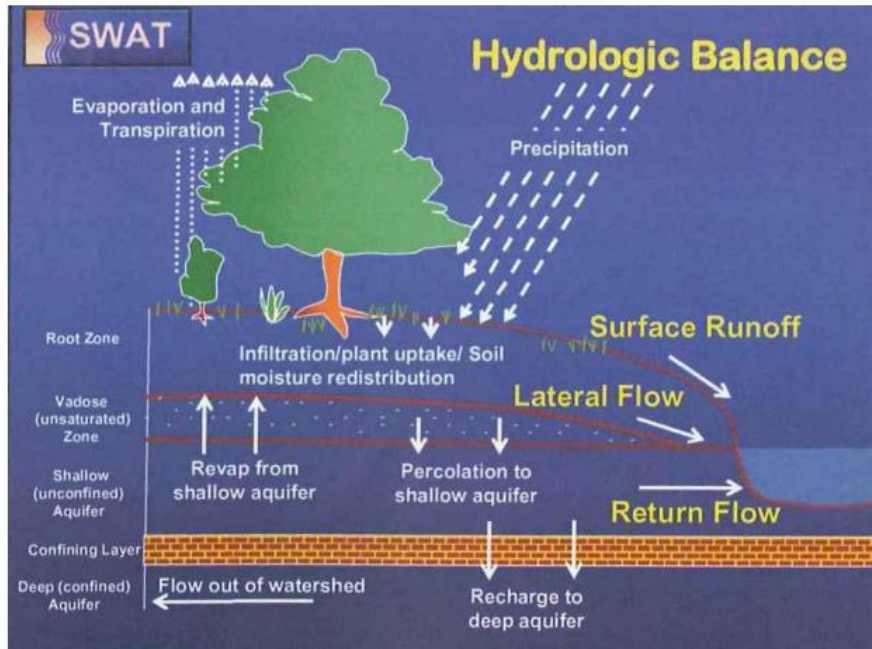


Figura 4.7. Representación movimientos del agua en SWAT (Uribe, 2010)

- **Almacenamiento de dosel**

El almacenamiento del dosel es el agua interceptada por superficies vegetativas (el dosel) donde se mantiene y se hace disponible para la evaporación. Cuando se usa el método de curva numérica CN para computar escorrentía de superficie, el almacenamiento de dosel se toma en cuenta en los cálculos de superficie de escorrentía. Sin embargo, si los métodos como *Green & Ampt* se usan para modelar infiltración y escorrentías, el almacenamiento de dosel debe ser modelado separadamente. SWAT permite al usuario introducir la cantidad máxima de agua que puede almacenarse en el dosel en función del índice máximo de área foliar de la cobertura vegetal. Este valor, junto con el índice de área foliar, es utilizado por el modelo para calcular el almacenamiento máximo en diferentes etapas del ciclo de desarrollo de la vegetación. Al calcular la evaporación, el agua se retira primero del almacenamiento en el dosel (Neitsch et al., 2005).



- **Infiltración**

La infiltración es el proceso por el cual el agua penetra en el perfil del suelo desde la superficie terrestre. A medida que la infiltración continúa, el suelo se vuelve más húmedo, lo que provoca una disminución en la tasa de infiltración hasta que se estabiliza en un valor constante. La tasa inicial de infiltración está influenciada por el contenido de humedad del suelo antes de que el agua llegue a la superficie. La tasa final de infiltración corresponde a la conductividad hidráulica saturada del suelo. La cantidad de agua que se infiltra en el perfil del suelo se determina restando la escorrentía superficial de la cantidad total de lluvia. El método de infiltración *Green & Ampt* modela directamente la infiltración, pero requiere los datos de precipitación en incrementos más pequeños de tiempo. (Uribe, 2010).

- **Redistribución**

La redistribución se refiere al movimiento continuo de agua por un perfil de tierra después de la entrada del agua (a través de precipitación o irrigación). La redistribución es causada por diferencias en el contenido de agua en el perfil. Hasta alcanzar un perfil entero o uniforme, la redistribución cesará. El componente de la redistribución de SWAT usa un almacenamiento que dirige la técnica para predecir el flujo por cada capa de tierra en la zona principal. El flujo hacia abajo, o la filtración, ocurre cuándo la capacidad de espacio de una capa de tierra es excedida y la capa debajo no está saturada. La tasa del flujo es gobernada por la conductividad saturada de la capa de tierra. La redistribución es afectada por la temperatura del suelo. Si la temperatura en una capa particular es de 0°C o debajo, ninguna redistribución es permitida en esta capa. (Uribe, 2010).

- **Evapotranspiración**

La evapotranspiración es un término que engloba todos los procesos mediante los cuales el agua en estado líquido o sólido, presente en o cerca de la superficie terrestre, se transforma en vapor atmosférico. Este proceso incluye la evaporación de ríos, lagos, suelos descubiertos y superficies vegetativas; la transpiración, que es la evaporación del agua desde el interior de las hojas de las plantas; y la sublimación, que es el paso directo del hielo y la nieve a vapor. El modelo computa la evaporación de suelos y plantas separadamente descrito por Ritchie (1972). La evaporación verdadera del agua en el suelo se estima utilizando funciones exponenciales de profundidad de suelo y contenido de agua. La transpiración de la planta se simula como una función lineal de la evapotranspiración potencial e índice de área de hoja (Neitsch et al., 2005).



- **Evapotranspiración potencial**

La evapotranspiración potencial (PET) es la tasa a la que la evapotranspiración ocurriría en una extensa área completamente cubierta por vegetación en crecimiento, con acceso ilimitado de agua terrestre. Esta proporción se asume para ser no afectada por efectos micro-climáticos de procesos como advección o calor de almacenamiento. Se han desarrollado varios métodos para calcular la evapotranspiración potencial, de los cuales tres han sido incorporados en el modelo SWAT: el método de Penman-Monteith, el método de Priestley-Taylor y el método de Hargreaves. Los tres modelos para calcular la PET dentro del modelo SWAT difieren en cuanto a la cantidad de datos necesarios. El método de Penman-Monteith necesita datos de radiación solar, temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del viento. Por otro lado, el método de Priestley-Taylor requiere datos de radiación solar, temperatura del aire y humedad relativa. Mientras que el método de Hargreaves solamente necesita la temperatura del aire. (Uribe, 2010).

- **Flujo subterráneo lateral**

De acuerdo con Neitsch et al. (2005), el flujo, o inter-flujo subterráneo lateral, es una contribución de la corriente de flujo que se origina debajo de la superficie, pero por encima de la zona donde las piedras están saturadas con agua. El flujo subterráneo lateral en el perfil de suelo (0-2 m) se calcula simultáneamente con la redistribución. Para predecir el flujo lateral en cada capa de tierra se utiliza un modelo cinemático del almacenamiento.

- **Escurrentía superficial**

Las escurrentía superficial o flujo terrestre, es el flujo que ocurre a lo largo de una superficie inclinada. Utilizando las cantidades diarias o sub-diarias de lluvia, SWAT simula volúmenes de superficie de escurrentías y promedios máximos de escurrentías para cada HRU. Este es computado utilizando una modificación del método de curva numérica del SCS (Servicio de Conservación de Suelo del USDA, 1972) o el método de infiltración de Green & Ampt (Green y Ampt, 1911). En el método de curva numérica, la curva varía no-linealmente con el contenido de humedad del suelo. La curva numérica baja si la tierra se acerca el punto de marchitez y aumenta hasta cerca de 100 al acercarse el suelo a la saturación. El método de Gree & Ampt requiere los datos sub-diarios de precipitación y calcula la infiltración como una función del frente potencial mátrico húmedo anterior y conductividad hidráulica efectiva. El agua que no se infiltra se convierte en escurrentía de superficie. El modelo SWAT incluye



una provisión para estimar escorrentías de suelo congelado donde un suelo se define como congelado si la temperatura en la primera capa es menos de 0°C . (Uribe, 2010).

- **Estanques**

Los estanques son estructuras de almacenamiento de agua situados dentro de una subcuenca que intercepta escorrentía superficial. El almacenamiento del agua del estanque es una función de la capacidad del estanque, afluencias y desagües diarios, la infiltración y la evaporación. Las entradas necesarias son la capacidad de almacenamiento y el área del estanque cuando se llena completamente. El área debajo de la capacidad se estima como una función no lineal de almacenamiento (Uribe, 2010).

- **Canales tributarios**

Los canales tributarios son canales secundarios o de orden más bajo que se separan del canal principal dentro de la cuenca hidrográfica. Cada canal tributario dentro de una subcuenca vierte sólo una porción de la subcuenca y no recibe contribución del manto a su flujo. Todo flujo en los canales tributarios se descarga y es dirigido al canal principal de la subcuenca. El modelo SWAT utiliza los atributos de canales tributarios para determinar el tiempo de concentración para la subcuenca (Neitsch et al., 2005).

- **Perdidas de transmisión**

De acuerdo con Uribe (2010), las pérdidas de transmisión corresponden a las pérdidas de flujo de superficie a través de la lixiviación por el cauce. Este tipo de pérdida ocurre en corrientes efímeras o intermitentes donde la contribución del agua subterránea ocurre sólo en cierto tiempo del año, o del todo en absoluto. El modelo SWAT utiliza el método de Lane descrito en el Capítulo 19 de la Guía de la Hidrología del SCS (Servicio de Conservación de Suelo del USDA, 1983) para estimar la transmisión de pérdidas. Las pérdidas de agua del canal son una función del ancho del canal y la duración de longitud y flujo. Tanto la proporción de volumen como la proporción máxima se ajustan cuándo las pérdidas de transmisión ocurren en canales tributarios.

- **Flujo de retorno**

El flujo del retorno, o flujo de base, es el volumen de agua subterránea originado en el manto freático. El modelo SWAT divide el agua subterránea en dos sistemas de acuíferos: un acuífero superficial y libre, que contribuye al flujo de regreso a las corrientes dentro de



la cuenca y un acuífero profundo y limitado que contribuye al flujo de regreso a las corrientes fuera de la cuenca. Además de retornar al flujo, el agua almacenada en el acuífero superficial puede abastecer de nuevo humedad en el perfil del suelo en condiciones muy secas o es absorbido directamente por la planta (Uribe, 2010).

4.6.1.1.3. Cobertura de tierra/crecimiento de planta

El modelo SWAT emplea un único modelo de crecimiento vegetal para simular diferentes tipos de coberturas del suelo. Este modelo distingue entre plantas anuales y perennes. Las plantas anuales crecen desde la fecha de siembra hasta la cosecha o hasta que las unidades de calor acumuladas alcanzan las unidades potenciales necesarias. Las plantas perennes conservan sus sistemas de raíces durante todo el año, entrando en un estado de latencia durante el invierno. Estas plantas reanudan su crecimiento cuando la temperatura media diaria supera la temperatura mínima requerida. Este modelo de crecimiento vegetal se utiliza para evaluar la absorción de agua y nutrientes en la zona de las raíces, la transpiración y la producción de biomasa (Uribe, 2010).

4.6.1.1.4. Erosión

La producción de erosión y sedimento se estima para cada HRU con la ecuación modificada de pérdida universal de suelo (MUSLE) (William, 1975). Mientras el USLE utiliza lluvia como un indicador de energía erosiva, MUSLE utiliza la cantidad de pérdidas para simular la producción de erosión y sedimento (Uribe, 2010). La sustitución tiene como resultado varios beneficios: la certeza de predicción del modelo se incrementa, la necesidad para una proporción de entrega se elimina, y una sola tormenta de producción de sedimento pueden ser calculadas. El modelo de la hidrología suministra estimaciones de volumen de escorrentía y una tasa máxima de escorrentía que, con el área de la subcuenca, se utiliza para calcular la energía variable erosiva de escorrentía (Neitsch et al., 2005).

4.6.1.1.5. Nutrientes

SWAT rastrea el movimiento y la transformación de las diversas formas de nitrógeno y fósforo en las cuencas. Los nutrientes pueden ser introducidos a los canales principales y transportados río abajo por escorrentía y flujo superficial o subterráneo lateral.



4.6.1.1.6. Pesticidas

El modelo SWAT simula el transporte de pesticidas en la red de corrientes a través de la escorrentía superficial, tanto en solución como adheridos al sedimento transportado, y su movimiento hacia el perfil del suelo y el acuífero mediante infiltración en solución. El desplazamiento del pesticida está determinado por su solubilidad, tiempo de vida media de degradación y coeficiente de adsorción al carbono orgánico en el suelo. Los pesticidas presentes en el follaje de las plantas y en el suelo se degradan de manera exponencial según su tiempo de vida media. El transporte de pesticidas por agua y sedimento se calcula para cada evento de escorrentía y se estima para cada capa de suelo cuando ocurre infiltración (Uribe, 2010).

4.6.1.2. Fase de enrutamiento del ciclo hidrológico

Una vez que SWAT determina las cargas de agua, sedimento, nutrientes y pesticidas hacia el canal principal, las cargas son dirigidas por la red de corriente de la cuenca. Adicionalmente al seguimiento del flujo masivo en el canal, SWAT modela la transformación de sustancias químicas en la corriente y cauce (Uribe, 2010).

El enrutamiento en el canal principal puede ser dividido en cuatro componentes: agua, sedimento, nutrientes y sustancias químicas orgánicas.

Para el caso del enrutamiento de flujo, cuando el agua fluye río abajo, una porción puede perderse debido a la evaporación y transmisión por la capa del canal. Otra pérdida potencial es la eliminación de agua del canal para el uso agrícola o humano. El flujo puede ser suplementado por la lluvia directamente en el canal y/o adicionado de agua de descargas del punto de la fuente. El flujo es dirigido por el canal que utiliza un método variable de coeficiente de almacenamiento desarrollado por William (1969) o el método de enrutamiento de Muskingum (Uribe, 2010).

4.6.2. Aplicación del modelo SWAT

El modelo SWAT se aplica a través de las interfaces *ArcSWAT* de ArcGIS o *QSWAT* de QGIS, estas interfaces corresponden a paquetes de análisis de datos geográficos diseñados para ayudar a generar archivos de entrada SWAT y analizar específicamente información resultante a partir de simulaciones usando las características principales de cada SIG.



Con la interfaz se puede:

- Crear archivos de entrada directamente desde las tablas y mapas ráster.
- Correr el modelo SWAT sin salir de la interfaz
- Mostrar resultados de SWAT usando los diferentes documentos de ArcGIS o QGIS como tablas, gráficos y mapas.

Para realizar simulaciones hidrológicas en el modelo SWAT, se requiere de una amplia variedad de datos de entrada, los cuales se agrupan en las siguientes categorías principales:

- **Datos Climáticos**
 - Precipitación: Datos diarios o horarios de precipitación.
 - Temperatura: Mínima y máxima diaria.
 - Radiación solar: Datos diarios.
 - Humedad relativa: Datos diarios.
 - Velocidad del viento: Datos diarios.
- **Datos de Uso del Suelo y Cobertura Vegetal**
 - Mapas de uso del suelo: Información espacial sobre el tipo de cobertura del suelo (bosques, agricultura, zonas urbanas, etc.).
 - Características de la vegetación: Información sobre la vegetación presente en la cuenca.
- **Datos del Suelo**
 - Mapas de tipos de suelo: Información espacial sobre los diferentes tipos de suelo en la cuenca.
 - Propiedades del suelo: Datos como textura, profundidad, contenido de materia orgánica, capacidad de retención de agua, conductividad hidráulica, etc.
- **Datos Topográficos**
 - Modelos digitales de elevación (DEM): Información sobre la elevación del terreno para definir la topografía y delinear la red de drenaje y subcuencas.
- **Datos Hidrológicos**
 - Caudales de ríos y arroyos: Datos históricos de caudales para calibrar y validar el modelo.
 - Niveles freáticos: Información sobre el comportamiento del agua subterránea.

5. METODOLOGÍA

En este capítulo se presenta la metodología llevada a cabo en la obtención y generación de la información requerida para el desarrollo del presente trabajo.

5.1. Delimitación y caracterización de la zona de estudio

En esta sección se presenta el proceso de delimitación de la cuenca de estudio y se realiza una descripción general de las características principales de la cuenca.

5.1.1. Delimitación de la cuenca

Para la delimitación de la cuenca, inicialmente se descargaron los archivos DEM correspondientes a la zona de estudio, estos fueron descargados de la Misión Topográfica *Shuttle Radar* (SRTM) de la NASA, tienen una resolución de 90 m en el ecuador y se proporcionan en mosaicos de 5° x 5° para facilitar su descarga y uso. Posteriormente fueron importados a TerrSet en donde se ajustaron y proyectaron para proceder a obtener la red hidrográfica de la zona. El punto de salida de la cuenca o exutorio se ubicó sobre el cauce del río principal a un lado de la estación limnigráfica El Caracol [35077120], la cual se encuentra aguas arriba del Embalse La Esmeralda. En la Figura 5.1, se presenta la metodología empleada para delimitar la cuenca.

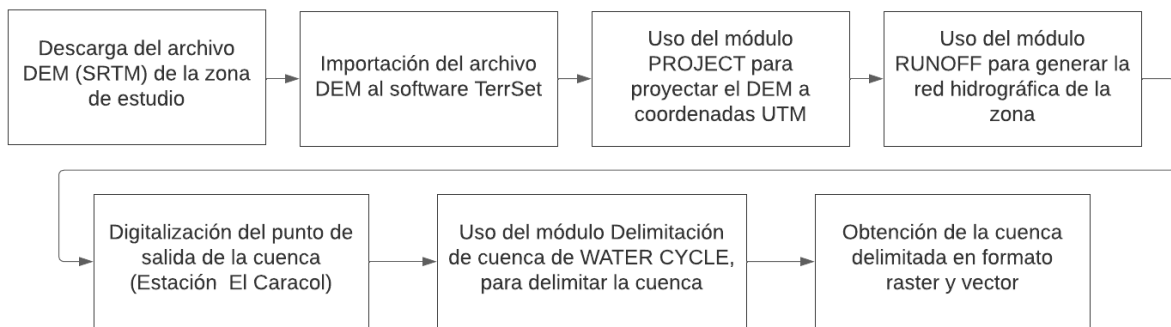


Figura 5.1. Proceso para delimitar la cuenca en TerrSet

5.1.2. Ubicación

La cuenca del río Garagoa está localizada en el borde oriental de la Cordillera Oriental, en el departamento de Boyacá, su extremo superior hace parte del Altiplano Cundiboyacense. Forma parte de la macrocuenca del río Orinoco (3), zona hidrográfica del río Meta (5) y subzona hidrográfica del río Bata (07) (IDEAM, 2013). La cuenca alcanza un área de 1420

km², y esta geográficamente enmarcada en las latitudes 5.5 a 5.0 grados y las longitudes -73.6 a -73.2 grados. Comprende diez subcuencas de nivel uno, delimitadas por el cauce del río Bosque, río Fusavita, río Garagoa, río Guaya, río Juyasia, río Teatinos, río Tibaná y río Turmequé. En la Figura 5.2 se presenta la ubicación de la zona en estudio.

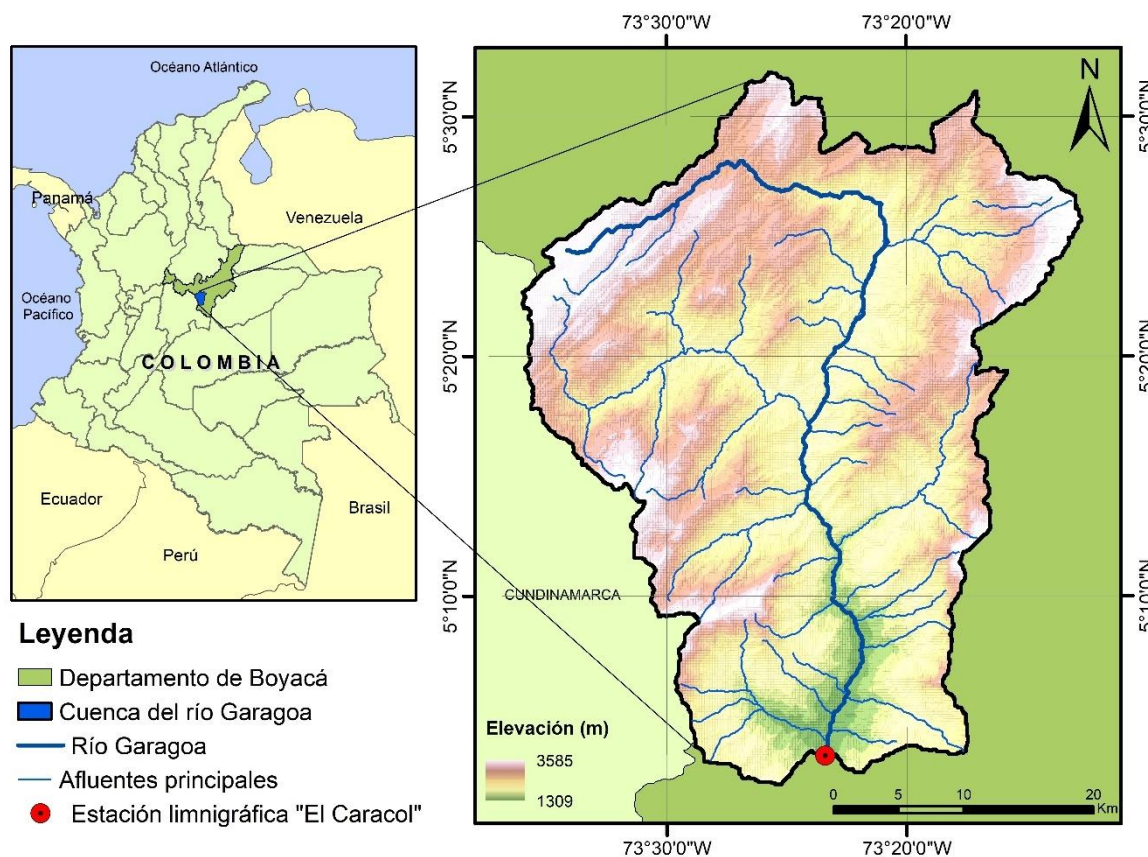


Figura 5.2. Ubicación de la cuenca del río Garagoa

5.1.3. Características sociodemográficas y económicas

La población de las unidades territoriales vinculadas a la cuenca del río Garagoa asciende a 151,985 habitantes, localizados en su mayoría en las unidades territoriales de CORPOCHIVOR. La población habita en zonas rurales propiamente dichas con un 72.62 %, el 27.38 % restante reside en las cabeceras municipales vinculadas a la cuenca (CORPOCHIVOR, 2016).

La cuenca abarca el territorio de los siguientes 21 municipios, como se presenta en la Figura 5.3:

- Tunja
- Boyacá
- Nuevo Colón
- Pachavita
- Ramiriquí
- Samacá
- Soracá
- Sutatenza
- Tenza
- Tibaná
- Turmequé
- Villapinzón
- Chinavita
- Ciénega
- La Capilla
- Úmbita
- Ventaquemada
- Viracachá
- Cucaita
- Garagoa
- Jenesano

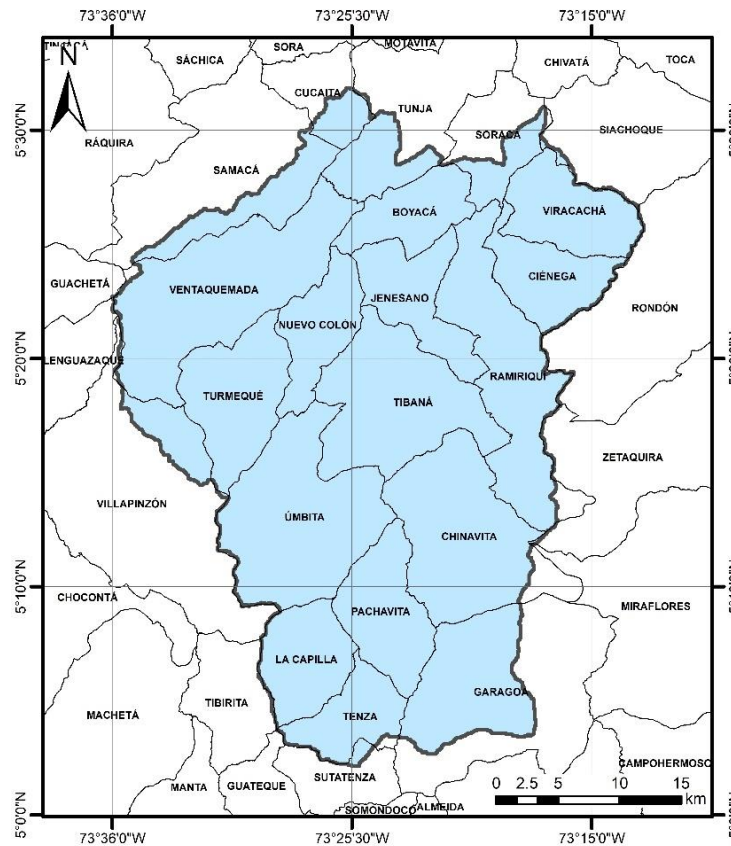


Figura 5.3. Municipios pertenecientes a la cuenca del río Garagoa

Las zonas urbanas más pobladas corresponden a los municipios de Garagoa y Ramiriquí. Las unidades territoriales con mayor población rural se ubican en los municipios de Macheta, Jenesano, Ramiriquí, Úmbita, Ventaquemada y Samacá.

La estructura poblacional en términos de genero se distribuye así: 49.83 % son hombres y el 50.17 % mujeres. En relación con los grupos de edad, la mayoría son niños y jóvenes entre 0 y 19 años con un 31.02 %, seguidos de aquellos jóvenes y adultos ubicados entre 20 y 39 años con un 27.06 % y los adultos que se encuentran entre 40 y 59 años con 22.43

% . En contraste los grupos de población por edad con menor participación en la pirámide son las personas mayores de 80 años con una participación del 4.25 % y aquellos adultos mayores ubicados entre 60 y 79 años con el 15.24 % (CORPOCHIVOR, 2016).

En el área de la cuenca del río Garagoa, no se registra presencia de comunidades indígenas, negras, ROM, afrocolombianas, raizales y/o palenqueras.

La población asentada en el área de la cuenca se caracteriza por realizar actividades agrícolas y ganaderas en pequeña escala (CORPOCHIVOR, 2016).

5.1.4. Relieve

El relieve de la cuenca abarca desde zonas planas a montañosas extremadamente empinadas debido a la amplitud y heterogeneidad de la cuenca, la cuenca se caracteriza por tener un relieve irregular, pasando de los grandes escarpes hasta zonas de amplios valles, lo que le confiere un paisaje muy diverso en toda su extensión. La altura mínima de la cuenca es de 1,309 msnm y la altura máxima de la cuenca es de 3,585 msnm. En la Figura 5.4 se presenta la distribución de las elevaciones en la cuenca.

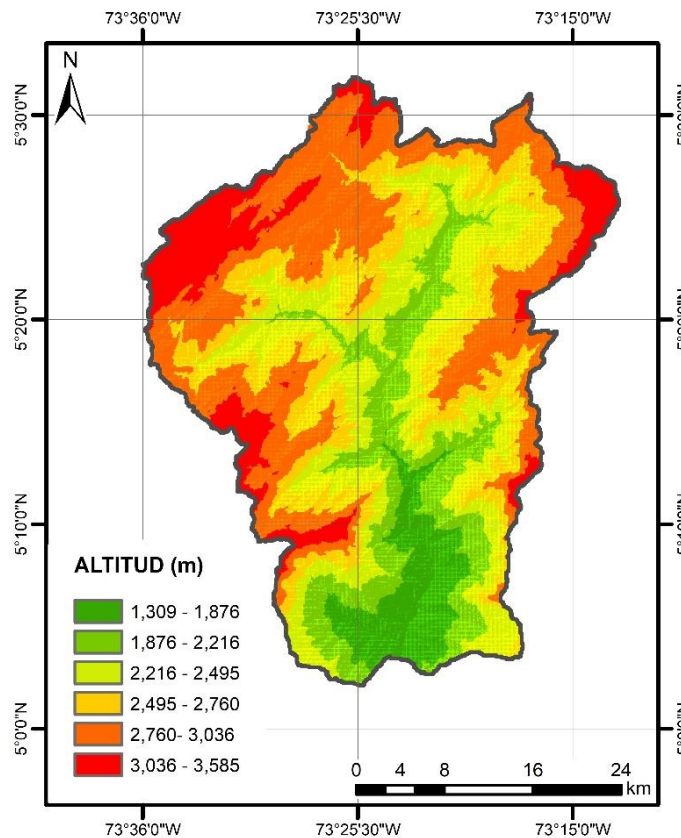


Figura 5.4. Elevaciones de la cuenca del río Garagoa

5.1.5. Clima

En la cuenca del río Garagoa se cuenta con nueve diferentes tipos de climas, en las zonas altas el clima es de páramo bajo, en las zonas bajas el clima es templado semihúmedo, sin embargo, la mayor parte de la cuenca posee un clima frío semihúmedo. En la Figura 5.5 se presenta la distribución espacial del clima en la cuenca.

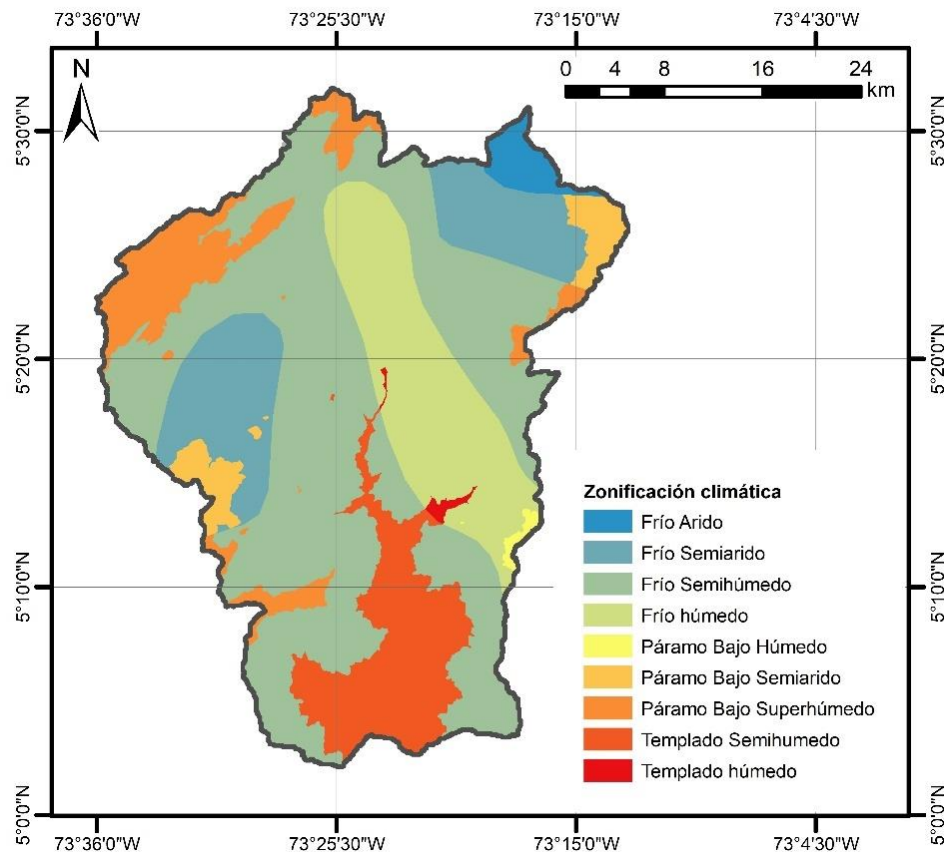


Figura 5.5. Zonificación climática de la cuenca del río Garagoa

5.1.6. Uso y cobertura del suelo

En cuanto al uso y cobertura del suelo de la cuenca del río Garagoa, de acuerdo con el Mapa de Coberturas de la Tierra - Metodología *Corine Land Cover* a escala 1:100.000 del IDEAM, para el año 2018, el 60.9 % (864.3 km²) del área total de la cuenca, corresponde a área agrícola, el 20.9 % (297.4 km²) a pastizales, el 11.1 % (157.6 km²) corresponde a zona arbustal, el 6.3 % (89.8 km²) corresponde a bosques, el 0.5 % (7.7 km²) corresponde a zona urbana y finalmente, los cuerpos de agua ocupan el 0.2 % (3.2 km²) del área total de la cuenca.

De acuerdo con lo anterior, la mayor parte de la cuenca está ocupada por territorios agrícolas y pastizales, en la Figura 5.6, se representa espacialmente la ocupación del suelo en la cuenca.

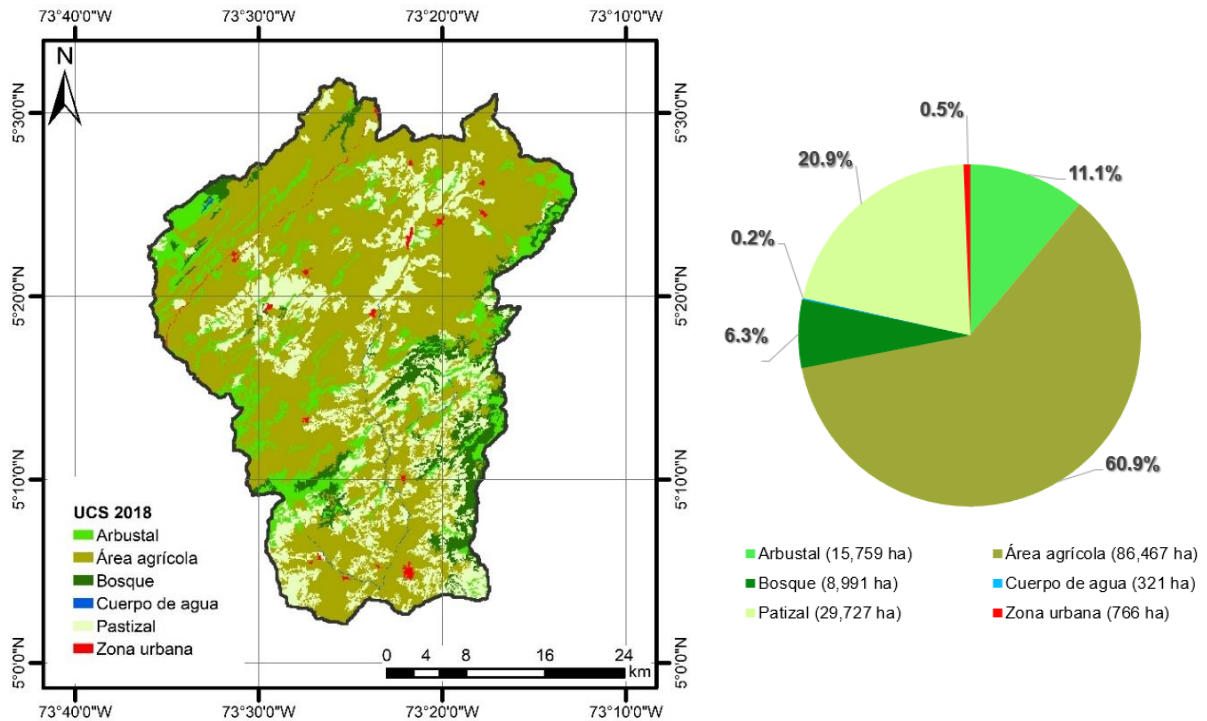


Figura 5.6. Uso y cobertura del suelo en la cuenca del río Garagoa, año 2018

5.1.7. Hidrografía de la cuenca

El río principal de la cuenca es el río Garagoa, los principales afluentes de este río son el río Bosque, río Fusavita, río Guaya, río Juyasia, río Teatinos, río Tibaná y río Turmequé. En la Figura 5.7 se presenta la hidrografía principal de la cuenca.

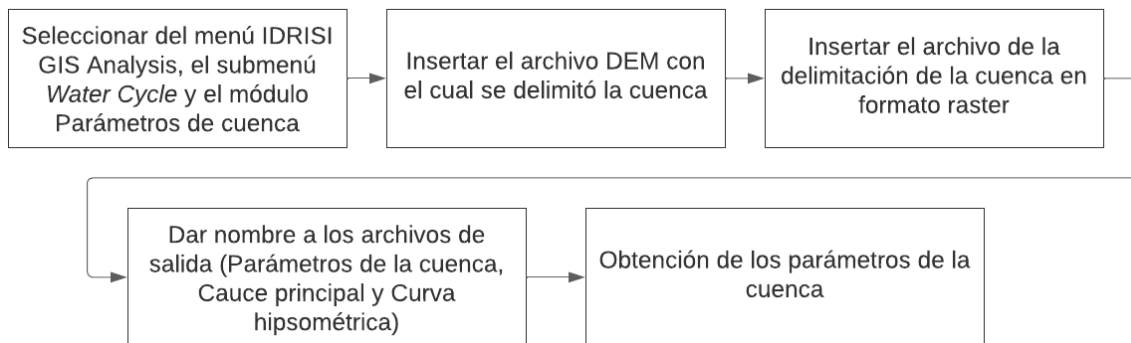


Figura 5.8. Metodología para obtener los parámetros morfométricos de la cuenca

En la Tabla 5-1 se presentan los parámetros morfométricos de la cuenca del río Garagoa.

Tabla 5-1. Parámetros morfométricos de la cuenca del río Garagoa

Parámetro	Valor
Superficie de la cuenca (km ²)	1420
Perímetro de la cuenca (km)	261
Elevación media (m)	2558.06
Pendiente media (Grados)	13.15
Pendiente media (%)	23.91
Coefficiente de compacidad (Gravelius)	1.95
Relación circular	0.26
Relación hipsométrica	0.75
Longitud del eje del río principal (km)	83.51
Longitud directa del río principal (km)	43.56
Coefficiente de sinuosidad hidráulica	1.92
Altitud máxima del cauce (m)	3320
Altitud mínima del cauce (m)	1309
Pendiente promedio del río principal (%)	6.08
Tiempo de concentración <i>Kirpich</i> (H)	8.36
Tiempo de concentración de <i>California Highways and Public Work</i> (H)	8.41

De acuerdo con la tabla anterior, la cuenca cuenta con una elevación media de 2558.06 m y una pendiente de 13.15° o 23.91 % clasificando el relieve de la cuenca como accidentado, el coeficiente de compacidad de *Gravelius* de 1.95 indica una forma oval de la cuenca, la relación circular de 0.26 indica que la cuenca es alargada y la relación hipsométrica de 0.75 revela que la cuenca se encuentra en una fase de juventud.

El coeficiente de sinuosidad hidráulica es de 1.92, lo que permite inferir que se trata de un río meándrico, el tiempo de concentración *Kirpich* es de 8.36 horas y el de *California Highways and Public Work* es de 8.41 horas, lo que indica que, en promedio, el tiempo de viaje de una gota de lluvia que cae en el punto hidráulicamente más alejado de la cuenca y escurre superficialmente hasta su salida es de 8.39 horas.

La curva hipsométrica de la cuenca del río Garagoa se presenta en la Figura 5.9, su forma permite inferir que la cuenca se encuentra en fase de juventud, reflejando una cuenca con un gran potencial erosivo.

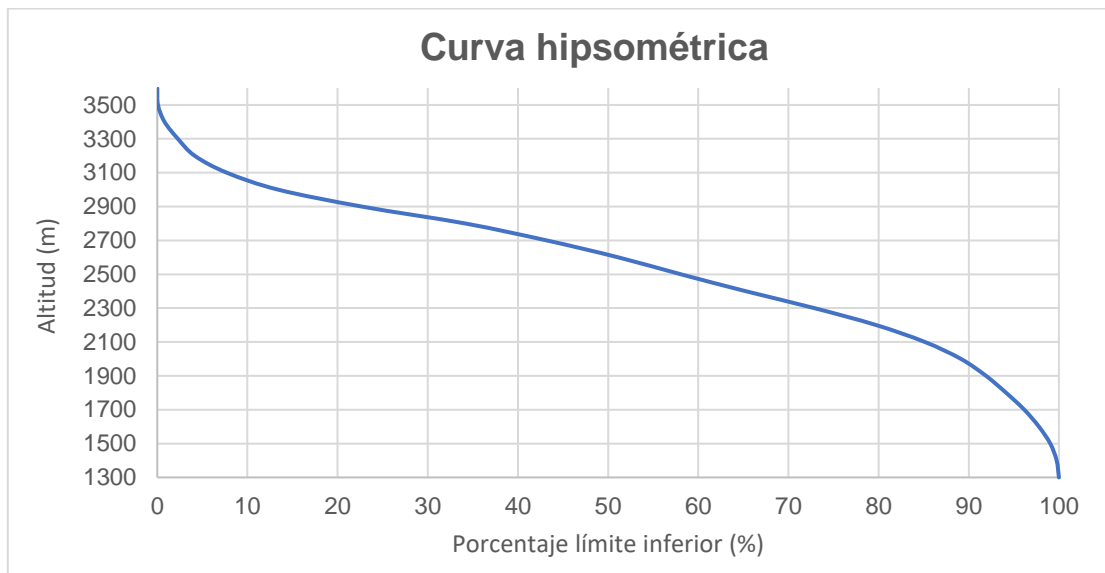


Figura 5.9. Curva hipsométrica de la cuenca del río Garagoa

Finalmente, en la Figura 5.10 se presenta el perfil altitudinal del cauce, el cual tiene una altitud máxima de 3320 m y una altitud mínima de 1309 m.

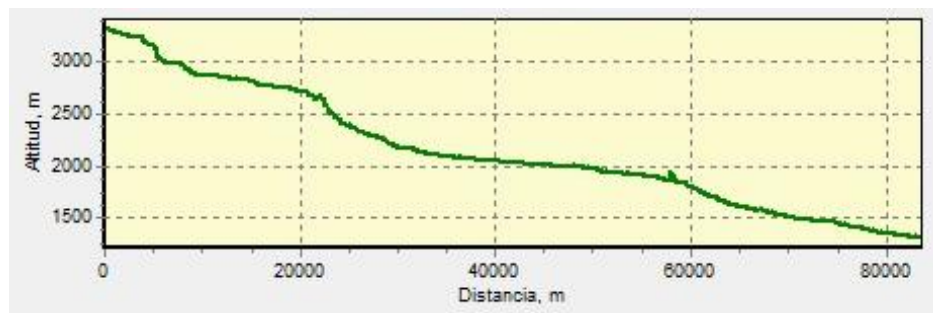


Figura 5.10. Perfil del cauce principal



5.2. Datos hidrometeorológicos observados

La información hidrometeorológica observada y analizada para la implementación de los modelos hidrológicos, se descargó del portal de Consulta y Descarga de Datos Hidrometeorológicos del IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia), en donde se puede obtener la información hidrométrica y meteorológica histórica diaria de las estaciones instaladas en el territorio nacional.

En la Tabla 5-2 se presenta la información de las estaciones empleadas en la modelación, todas las estaciones se ubican en el departamento de Boyacá y hacen parte de la subzona hidrográfica de río Garagoa; en total, se cuenta con 16 estaciones meteorológicas, de las cuales cinco son pluviográficas (PG), seis son pluviométricas (PM), dos son climáticas principales (CP), una es climática ordinaria (CO) y dos son agrometeorológicas (AM), en cuanto a la información hidrométrica, se cuenta con la estación limnigráfica “El Caracol”, ubicada en el exutorio de la cuenca.

Tabla 5-2. Información de las estaciones hidrometeorológicas en la cuenca

Código	Nombre	Categoría	Altitud	Periodo		Años de registro
				Inicio	Fin	
35070550	VALLE GRANDE	PG	1830	1984	2022	39
35070080	GARAGOA	PG	1700	1959	2022	64
35085080	LA CAPILLA - AUT	CP	1917	2017	2022	6
35070210	PACHAVITA	PM	2160	1976	2022	47
35070070	CHINAVITA	PM	1900	1955	2022	68
35070050	UMBITA	PM	2300	1956	2022	67
35075070	CHINAVITA – AUT	AM	1921	2017	2022	6
35070060	LOS QUINCHOS	PM	2150	1971	2022	52
35070040	TIBANA	PM	2115	1958	2022	65
35070030	TURMEQUE	PM	2400	1957	2022	66
35075010	NUEVO COLON	AM	2438	1965	2022	57
35075080	P. RABANAL - AUT	CP	3398	2017	2022	6
35070010	RAMIRIQUI	PG	2360	1957	2022	66
35070220	JENESANO	PG	2110	1979	2002	24
35075030	VILLA LUISA	CO	2200	1982	2022	41
35070310	TEATINOS	PG	3250	1990	2022	33
35077120	EL CARACOL	LG	1298	1974	2022	49

La ubicación de las estaciones mencionadas en la tabla anterior, se presentan en la Figura 5.11:

Con respecto a los datos de temperatura, solo dos estaciones cuentan con registros de temperatura máxima y temperatura mínima diaria, estas corresponden a la estación Nuevo Colón y Villa Luisa, en la Tabla 5-4, se presentan resaltados los años que tienen información de temperatura.

Tabla 5-4. Años con información de temperatura disponible, por estación

Estación	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022									
NUEVO COLON [35075010]																																																						
VILLA LUISA [35075030]																																																						

La información hidrométrica fue descargada de la estación limnigráfica “El Caracol”, la cual se encuentra ubicada en el exutorio de la cuenca y registra el caudal medio diario que transita por el río Garagoa en ese punto, en la Tabla 5-5, se presenta la disponibilidad de información de caudal para dicha estación.

Tabla 5-5. Disponibilidad de información de caudal en la estación “El Caracol”

DISPONIBILIDAD DE DATOS - ESTACIÓN LIMNIGRÁFICA EL CARACOL																																																												
MES-AÑO	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022										
ENE	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	23	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31							
FEB	28	28	29	28	28	28	29	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28				
MAR	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31				
ABR	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30				
MAY	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31				
JUN	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30			
JUL	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31			
AGO	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31		
SEP	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30		
OCT	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	
NOV	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	
DIC	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
TOTAL	153	365	365	366	365	365	365	366	365	365	299	306	365	365	365	366	365	365	365	365	366	365	365	365	366	365	365	365	365	365	365	365	365	365	365	365	365	365	365	365	365	365	365	365	365	365	365	365	365	365	365	365	365	365	365	365	365			
	Año sin datos										# Año con datos incompletos										# Año con datos completos																																							

Posteriormente a la estructuración y análisis de disponibilidad de los datos, se realizó el diagnóstico de calidad de datos, el cual constó principalmente de: 1) detección de valores faltantes, 2) identificación de valores atípicos y 3) resumen estadístico de la distribución de datos y exploración de las series hidrométricas.

5.3. Productos satelitales de información meteorológica

Para una mejor representatividad y distribución espacial de los datos de precipitación en la cuenca, se realizó la búsqueda de productos satelitales, la selección de los productos se basó en la resolución tanto espacial como temporal de estos, a continuación, se describe la metodología para la obtención de información de los productos satelitales (CHIRPS e IMERG).

5.3.1. CHIRPS

Del producto satelital CHIRPS se descargó la información de precipitación del periodo 1981-2022 a una resolución temporal diaria y una resolución espacial de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$. En la Figura 5.12 se presenta el proceso de descarga y obtención de datos:

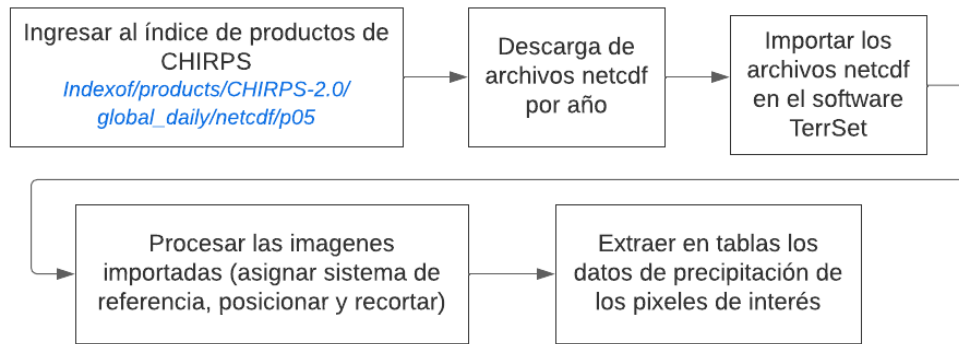


Figura 5.12. Proceso de descarga de datos CHIRPS

En la Figura 5.13, a modo de ejemplo, se representan los pixeles (88) de los cuales se extrajo la información de precipitación de CHIRPS para la cuenca en estudio.

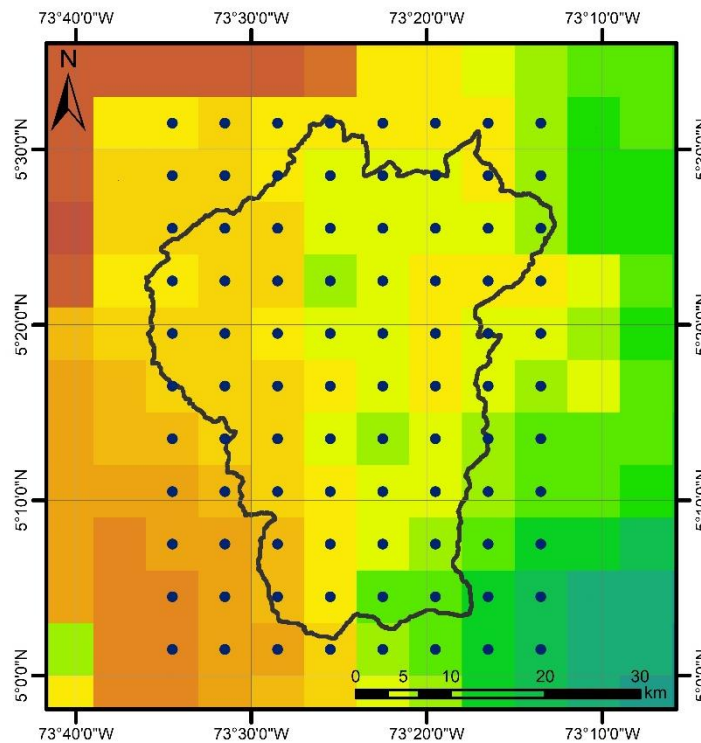


Figura 5.13. Ejemplo de visualización de imagen CHIRPS

5.3.2. IMERG

En cuanto al producto satelital IMERG, se descargó la información de la Ejecución final de IMERG (*IMERG final run V07*), la cual en el momento de descarga estaba disponible desde el 01 de junio del año 2000 al 30 de abril del año 2023, a una resolución temporal diaria y con una resolución espacial de $0.1^\circ \times 0.1^\circ$, aproximadamente cada 11 km. En la Figura 5.14, se presenta el proceso de descarga y obtención de los datos:

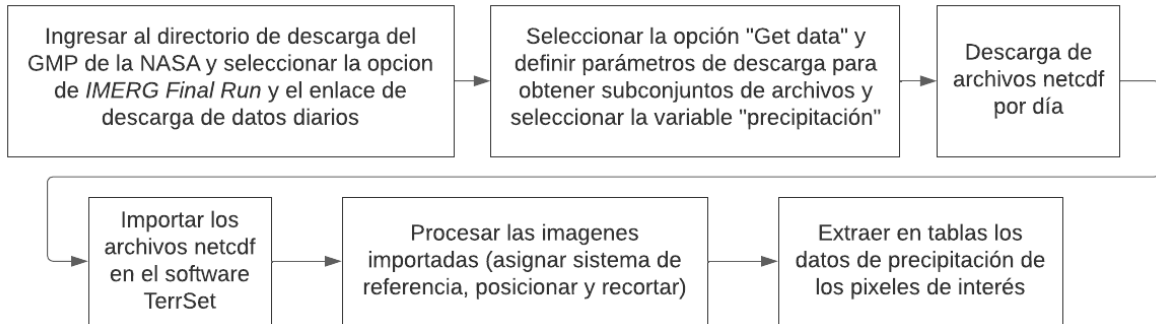


Figura 5.14. Proceso de descarga de datos IMERG

En la Figura 5.15, a modo de ejemplo, se representan los píxeles de los cuales se extrajo la información de precipitación de IMERG para la cuenca en estudio.

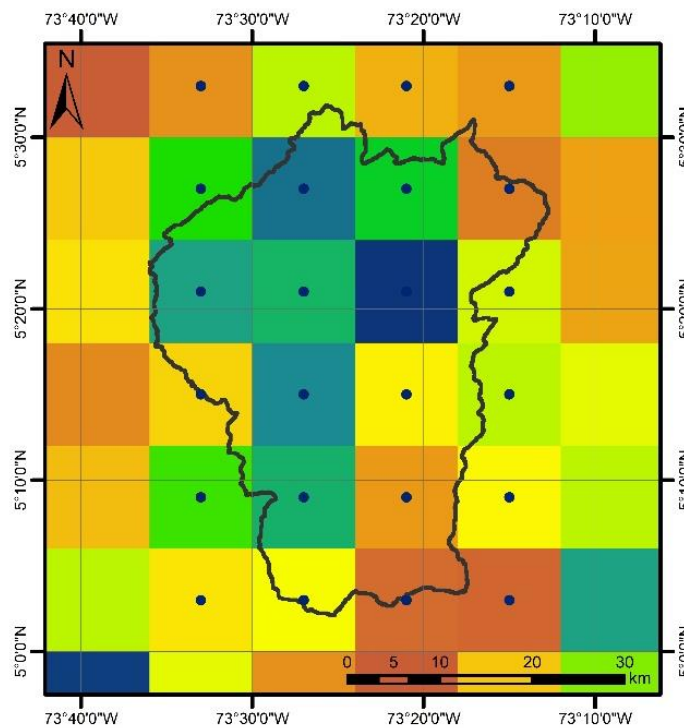


Figura 5.15. Ejemplo de visualización de imagen IMERG

5.3.3. ERA5

Con el fin de robustecer y mejorar la calidad de la información de temperatura en la zona de estudio, se emplearon los indicadores agrometeorológicos desde 1979 hasta la actualidad derivados del reanálisis atmosférico del clima global (ERA5) publicados por el *Copernicus Climate Change Service* de la Unión Europea. Estos indicadores se encuentran a una resolución temporal diaria y a una resolución espacial de $0.1^\circ \times 0.1^\circ$.

Para el presente estudio, se descargaron los datos de temperatura máxima y mínima diaria del aire a una altura de 2 metros sobre la superficie, desde el año 1981 hasta el año 2022. En la Figura 5.16, se presenta el proceso de descarga y obtención de los datos:

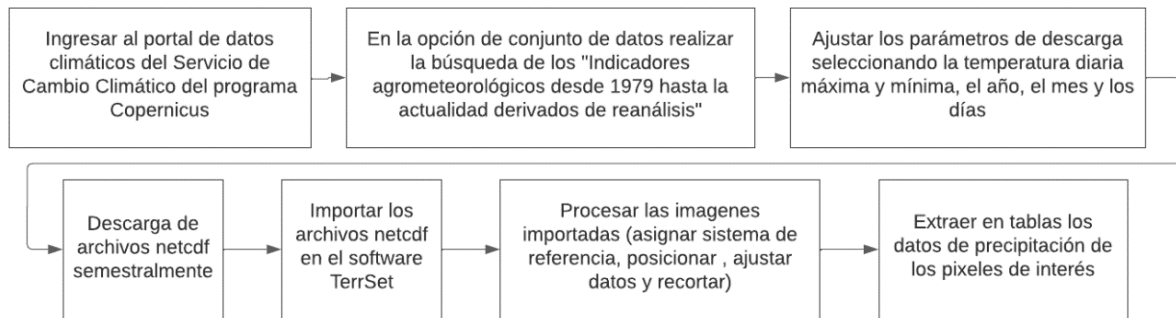


Figura 5.16. Proceso de descarga de datos ERA 5

Además de la temperatura máxima y mínima descargada de este producto para la modelación hidrológica con CEQUEAU y SWAT, se descargó la información a nivel diario de la radiación solar total (MJ/m^2), la humedad relativa diaria (%) y la velocidad del viento diaria (m/s) y de la zona de estudio, siguiendo el procedimiento descrito en la Figura 5.16. Esta información se requirió en la implementación del modelo hidrológico SWAT.

En la Figura 5.17, a modo de ejemplo, se representan los 24 píxeles de los cuales se extrajo la información de temperatura máxima y mínima de ERA5 y demás información climatología para la cuenca en estudio.

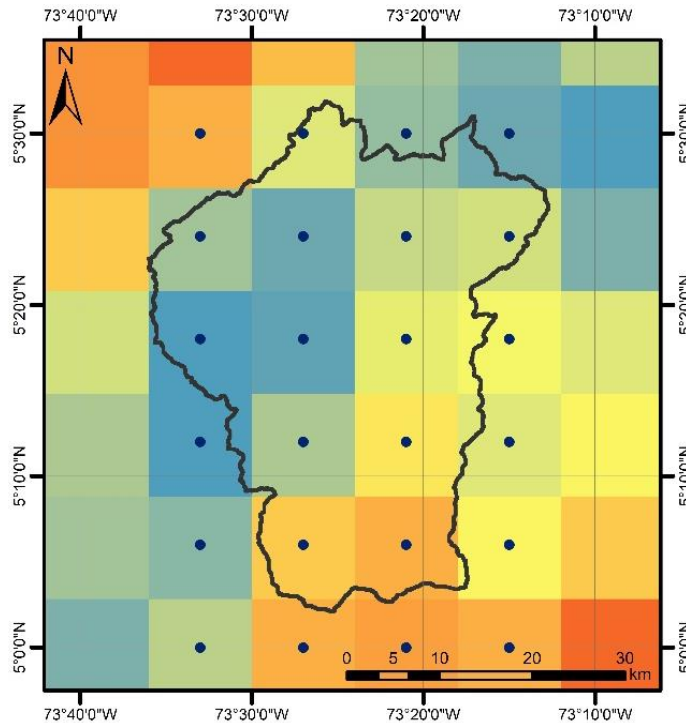


Figura 5.17. Ejemplo de visualización de imagen ERA 5

5.3.4. Validación de datos de precipitación CHIRPS e IMERG

La validación de los productos satelitales de precipitación CHIRPS e IMERG consistió en la extracción de los valores de precipitaciones de los píxeles en donde se encuentran ubicadas las 16 estaciones meteorológicas en la cuenca, con el fin de realizar la comparación pixel a pixel de los datos satelitales contra los datos observados. El análisis se realizó tanto a nivel diario como mensual y se basó en la obtención del coeficiente de determinación R^2 , así como la comparación visual (a través de gráficas de dispersión lineales) del comportamiento de las lluvias en las estaciones y en los píxeles correspondientes de los productos y el análisis de los registros de precipitaciones.

5.4. Análisis de cambio de uso y cobertura del suelo y proyección futura

En esta sección, se presenta la metodología seguida para la obtención de mapas históricos y actuales del uso y cobertura del suelo, el análisis de cambios de dichos mapas y la proyección futura de cambio de uso y cobertura del suelo.



5.4.1. Mapas de uso y cobertura del suelo

Para la definición de los escenarios de cambio de uso y cobertura del suelo, inicialmente se consultaron los mapas históricos que han sido publicados por el IDEAM, sobre coberturas de la tierra para los periodos 2000-2002; 2005-2009, 2010-2012 y 2018, a escala 1:100.000, los cuales fueron procesados a través de *softwares* SIG, con el fin de homogenizar la información y ajustarla a los requerimientos de cada uno de los modelos y al área de estudio.

Teniendo en cuenta lo anterior, se descargaron los cuatro mapas disponibles, se realizó el recorte y la homogenización de la información de acuerdo con la zona de estudio, definiendo seis tipos de uso y cobertura del suelo: (1) arbustal, (2) área agrícola, (3) bosque, (4) cuerpo de agua, (5) pastizal y (6) zona urbana y posteriormente se realizó el análisis de cambios de dichos mapas con la ayuda del módulo *Land Chage Modeler* (LCM) del programa TerrSet.

5.4.2. Análisis de cambios del uso y cobertura del suelo en la cuenca

Para el análisis de cambio de uso y cobertura de suelo se utilizaron las herramientas del “*Change Analysis*” implementado en el programa TerrSet, el cual permitió realizar un análisis básico y rápido de los cambios que se produjeron entre los mapas en comparación; al identificar las pérdidas y ganancias de cada clase de cobertura del suelo, el cambio neto por clase y las contribuciones a los cambios experimentados por cobertura. Adicionalmente se generaron los mapas de cambio, de persistencias, de ganancias y pérdidas por clases, de transiciones y de intercambios entre clases y finalmente los mapas de tendencias espaciales del cambio.

Lo anterior con el fin de definir que escenarios de uso y cobertura de suelo se emplearían para la proyección del escenario futuro y la siguiente incorporación de los escenarios seleccionados en la implementación de cada uno de los modelos.

5.4.3. Escenario futuro de cambio de uso y cobertura del suelo

Para la generación del escenario futuro del uso y cobertura del suelo, se emplearon las herramientas disponibles en las pestañas “*Transitions Potenciales*” y “*Change Prediction*” del módulo LCM del programa TerrSet.

Inicialmente se seleccionó un mapa de referencia (año 2000) y un mapa de cambio (año 2018), para proyectar el cambio al año 2050, se modelaron los potenciales de transición utilizando la red neuronal de perceptrón multicapa MLP (por sus siglas en inglés *Multi-Layer Perceptron*), las entradas necesarias fueron las transiciones más significativas entre los mapas de referencia y de cambio y las variables explicativas, las cuales fueron generadas a partir de información consultada y de información producida en el mismo módulo, que corresponde principalmente a variables climáticas, a las distancias a carreteras y a coberturas del suelo específicas, así como los mapas de cambios más significativos. Para la proyección se utilizó la cadena de *Markov*.

En la Figura 5.18, se representa el procedimiento para la proyección del escenario futuro de cambio de uso y cobertura del suelo (año 2050).

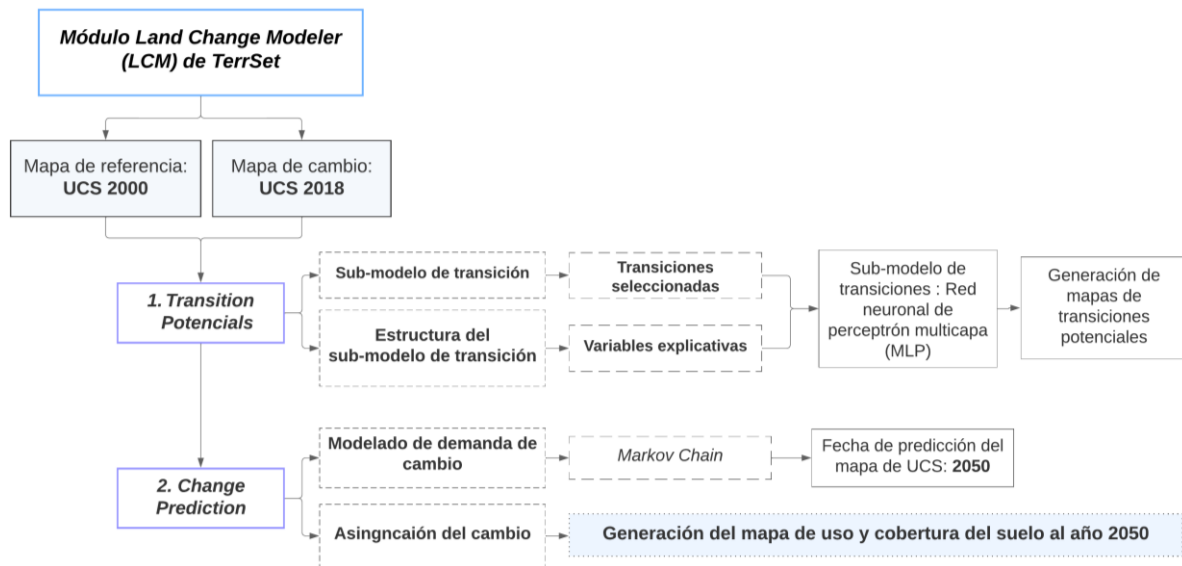


Figura 5.18. Proceso de generación del mapa de uso y cobertura de suelo al año 2050

Finalmente, para validar el modelo se utilizó la validación del índice Kappa, disponible también en el *software* TerrSet, el proceso de validación consistió en generar la proyección de un mapa de uso y cobertura del suelo para el año 2023, bajo la metodología presentada en la Figura 5.18, y generar una capa de 310 puntos aleatorios sobre una imagen *Landsat 09* de la zona de estudio del año 2023, con el fin de asignar bajo observación, la clase de uso y cobertura del suelo a cada punto aleatorio. La validación se realizó a partir de la comparación de la proyección generada y la capa de puntos aleatorios definidos, con el fin de obtener el índice Kappa, el cual deber ser mayor a 0.8, para determinar cómo satisfactorio el proceso de predicción.



5.5. Modelación hidrológica con CEQUEAU

En esta sección, se especifica la metodología aplicada en la modelación hidrológica con CEQUEAU.

5.5.1. Preparación de datos de entrada al modelo

El modelo CEQUEAU requiere de diferentes datos de entrada para evaluar los caudales generados en cada cuadro parcial. Los datos de entrada se pueden dividir de la siguiente manera: (1) datos fisiográficos, (2) datos de la cuenca, (3) datos hidrometeorológicos. Estos archivos iniciales se generaron a partir del módulo hidrogeomático implementado en el SIG-IDRISI por Franco (2008), el cual requiere el modelo digital de elevación (DEM), el mapa de uso y cobertura del suelo y las estaciones hidrometeorológicas. Con la ejecución del módulo se obtuvieron los archivos en formato texto requeridos por el modelo: (1) archivo de datos fisiográficos (*.PHY), (2) archivo de datos de la cuenca (*.BV), (3) archivo de datos hidrometeorológicos (*.DHM), y (4) archivo de parámetros del modelo (*.PAH).

Para la preparación del archivo de datos hidrometeorológicos, se implementaron dos archivos de datos hidrometeorológicos diferentes:

1. Información de precipitación diaria observada es decir a la información de las estaciones climatológicas del IDEAM y temperatura diaria máxima y mínima diaria obtenida del producto ERA5.
2. Información de precipitación diaria obtenida del producto satelital CHIRPS e información de temperatura diaria máxima y mínima diaria obtenida del producto ERA5.

En cuanto a los archivos fisiográficos requeridos para ejecutar el modelo, se consideraron los mapas uso y cobertura del suelo del año 2000, 2018 y 2050. Considerando la ocupación del suelo que permite CEQUEAU (existencia de lagos, bosques, ciénegas y otros), fue necesario realizar una reclasificación de los mapas de uso y cobertura del suelo, en donde, las coberturas de bosque se clasificaron dentro de la categoría bosque, los cuerpos de agua se clasificaron dentro de la categoría lagos y al no presentarse ciénegas en la zona de estudio, las coberturas de arbustal, área agrícola, pastizal y zonas urbanas se clasificaron dentro de la categoría de “otros”.



5.5.2. Ejecución del modelo

Este proceso de simulación enmarcó el cálculo de los caudales en la cuenca con base en los archivos generados y requeridos por el modelo, los cuales corresponden al archivo fisiográfico *.PHY, los datos de la cuenca en el archivo *.BV, los datos meteorológicos *.DHM y el archivo de parámetros *.PAH.

El proceso de simulación se divide en dos submódulos: producción y transferencia. La Figura 5.19 muestra la estructura general del modelo CEQUEAU. El modelo se ejecutó en dos proyectos diferentes, uno para cada archivo de datos hidrometeorológicos considerado (precipitación observada y precipitación CHIRPS) y cada proyecto se corrió tres veces, una primera corrida con el archivo fisiográfico del año 2000, una segunda corrida con el archivo fisiográfico del año 2018 y una tercera corrida con el archivo fisiográfico del escenario de UCS futuro (año 2050).

5.5.3. Calibración y validación del modelo

Inicialmente, se definieron los periodos de calibración y validación, el periodo de calibración, correspondió al ~70 % de los años de todo el periodo de modelación es decir al periodo 1983-2008, mientras que el periodo de validación correspondió al ~30 % de los años de todo el periodo de modelación, es decir al periodo 2009-2022.

La información meteorológica que se empleó para la calibración fue la correspondiente al proyecto 1, es decir, la información de precipitación diaria observada de las estaciones climatológicas del IDEAM y de temperatura diaria máxima y mínima obtenida del producto ERA5. La información fisiográfica con la que se realizó el proceso de calibración fue la correspondiente al año 2000.

La calibración se realizó por prueba y error y aplicando el algoritmo de optimización de *Powell* incorporado dentro del modelo CEQUEAU, la función objetivo elegida para la optimización correspondió a la suma de diferencias de cuadrados y se realizaron 40 optimizaciones de 999 simulaciones con los parámetros que se presentan en la Tabla 5-6, los cuales fueron elegidos debido a su alta sensibilidad.



Tabla 5-6. Parámetros de calibración del modelo CEQUEAU

No.	Parámetro	Descripción	Mín.	Máx.
1	CIN	Coeficiente de infiltración del recipiente suelo hacia el acuífero	0.05	1
2	CVNB	Coeficiente de vaciado del recipiente acuífero (orificio de fondo)	0.001	0.1
3	CVNH	Coeficiente de vaciado del recipiente acuífero (orificio superior)	0.05	0.3
4	HINT	Umbral de vaciado intermedio del recipiente suelo (mm)	20	100
5	HINF	Umbral de infiltración hacia el recipiente acuífero (mm)	20	100
6	EVNAP	Porcentaje de evapotranspiración en el recipiente acuífero	0	0.5
7	XINFMA	Infiltración máxima por día (mm/día)	10	100
8	HMAR	Umbral de vaciado del recipiente lagos y ciénegas (mm)	100	300
9	HNAP	Umbral de vaciado superior del recipiente acuífero (mm)	50	200
10	XAA	Umbral de la fórmula de <i>Thornthwaite</i>	0.5	3
11	HPOT	Umbral de extracción (por ETP) del agua a tasa potencial (mm)	20	200
12	HSOL	Altura del recipiente suelo (mm)	50	900
13	TRI	Porcentaje de superficie impermeable	0	0.2
14	CVSI	Coeficiente de vaciado del recipiente suelo (orificio intermedio)	0.05	0.5
15	HRIMP	Lámina de lluvia necesaria para que inicie el escurrimiento sobre superficies impermeables (mm)	0	30

La validación del modelo se llevó a cabo, ejecutando nuevamente CEQUEAU para el período 2009-2022, con el archivo de parámetros *.PAH actualizado tras el proceso de calibración.

La eficiencia del modelo CEQUEAU, tanto para el periodo de calibración como para el de validación, se evaluó con los tres criterios estadísticos identificados en la bibliografía: coeficiente de Eficiencia de *Nash-Sutcliffe* (NSE), el porcentaje de sesgo (PBIAS) y el coeficiente de determinación (R^2), los cuales se describen a continuación.

- **Coeficiente de Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE):** Este método muestra qué tan bien se compara el gráfico del valor de observación (medición) con el valor de predicción-simulación, según la línea 1:1 (Lufi et al., 2020). El NSE se calcula como se muestra en la Ecuación 5-1.

$$NSE = 1 - \frac{\left[\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{sim})^2 \right]}{\left[\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - \bar{Q}^{obs})^2 \right]}$$

Ecuación 5-1



donde,

Q_i^{obs} = i-ésimo valor observado de caudal

Q_i^{sim} = i-ésimo valor simulado de caudal

\bar{Q}^{obs} = media de los datos observados de caudal

n = número total de observaciones

El NSE oscila entre $-\infty$ y 1.0, siendo $NSE = 1$ el valor óptimo. Los valores entre 0.0 y 1.0 generalmente se consideran niveles aceptables de rendimiento, mientras que los valores <0.0 indican que el valor medio observado es un mejor predictor que el valor simulado, lo que indica un rendimiento inaceptable (Moriasi et al., 2007).

- **Coefficiente de determinación (R^2):** Describe el grado de colinealidad entre los datos simulados y medidos, al describir la proporción de la varianza en los datos medidos explicada por el modelo. R^2 varía de 0 a 1, donde los valores más altos indican una menor variación del error y, por lo general, los valores superiores a 0.5 se consideran aceptables. R^2 se ha utilizado ampliamente para la evaluación de modelos, sin embargo, estos estadísticos son demasiado sensibles a los valores extremos elevados (valores atípicos) e insensibles a las diferencias aditivas y proporcionales entre las predicciones del modelo y los datos medidos (Moriasi et al., 2007).
- **Sesgo porcentual (PBIAS):** El sesgo porcentual (PBIAS) mide la tendencia promedio de los datos simulados a ser mayores o menores que sus contrapartes observadas. El valor óptimo de PBIAS es 0.0, y los valores de baja magnitud indican una simulación precisa del modelo. Los valores positivos indican un sesgo de subestimación del modelo y los valores negativos indican un sesgo de sobreestimación del modelo (Moriasi et al., 2007). El sesgo porcentual, se calcula con la Ecuación 5-2.

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{sim}) * 100}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs})} \right]$$

Ecuación 5-2



donde,

Q_i^{obs} = i-ésimo valor observado de caudal

Q_i^{sim} = i-ésimo valor simulado de caudal

n = número total de observaciones

Moriasi et al. (2015) recomendaron calificaciones cualitativas (muy bueno, bueno, satisfactorio o insatisfactorio) para evaluar el rendimiento de un modelo con los correspondientes umbrales cuantitativos de los criterios estadísticos NSE, PBIAS, o R^2 , como se presenta en la Tabla 5-7.

Tabla 5-7. Criterios de evaluación del rendimiento para pasos de tiempo diario, mensual y anual recomendadas para los modelos a escala de cuenca hidrográfica, tomado de Moriasi et al. (2015)

Eficiencia	NSE	R²	PBIAS
Muy bueno	NSE > 0.80	R2 > 0.85	PBIAS < ±5
Bueno	0.70 < NSE ≤ 0.80	0.75 < R2 ≤ 0.85	±5 ≤ PBIAS < ±10
Satisfactorio	0.50 < NSE ≤ 0.70	0.60 < R2 ≤ 0.75	±10 ≤ PBIAS < ±15
Insatisfactorio	NSE ≤ 0.50	R2 ≤ 0.60	PBIAS ≥ ±15

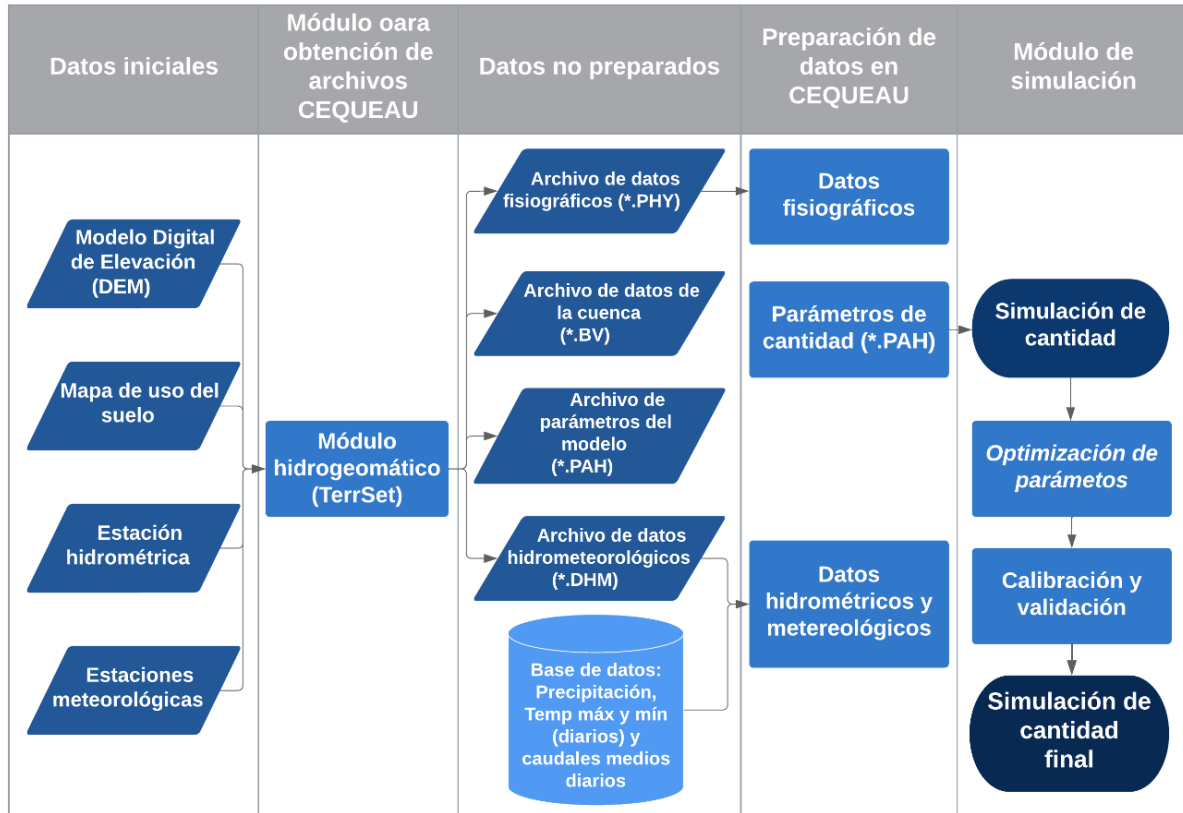


Figura 5.19. Estructura general del proceso de modelación con CEQUEAU

5.6. Modelación hidrológica con SWAT

En esta sección, se especifica la metodología aplicada en la modelación hidrológica con SWAT.

5.6.1. Preparación de datos de entrada al modelo

En esta etapa se prepararon los datos de entrada necesarios para la configuración y ejecución del modelo SWAT, los cuales se presentan en la Tabla 5-8, en donde se describe la resolución y la fuente de los datos empleados para la preparación de estos archivos de entrada.

Tabla 5-8. Base de datos necesarios para la preparación de archivos de entrada al modelo SWAT

Entrada	Resolución	Fuente
Modelo digital de elevación (DEM)	90 x 90 m	La Misión Topográfica de Radar de Transbordadores (SRTM) https://srtm.csi.cgiar.org/
Exutorio	-	Generado a partir de la ubicación de la estación hidrométrica (limnigráfica) El Caracol, obtenida catálogo de estaciones del IDEAM. https://www.datos.gov.co/Ambiente-y-Desarrollo-Sostenible/Catalogo-Estaciones-IDEAM
Mapas de uso y cobertura del suelo	1:100.000	Mapa de cobertura de la tierra periodo 2000 – 2002 Mapa de cobertura de la tierra periodo 2005 – 2009 Mapa de cobertura de la tierra periodo 2010 – 2011 Mapa de cobertura de la tierra periodo 2018 http://www.siac.gov.co/catalogo-de-mapas
Mapa de suelos	1:100.000	Mapas de Suelos del Territorio Colombiano a escala 1:100.000. Departamento: Boyacá http://geoportal.igac.gov.co/es/contenido/datos-abiertos-agrologia
Información física del suelo	250 x 250 m	SoilGrids — información global sobre el suelo en cuadrícula (Poggio et al., 2021). SoilGrids250m 2.0. https://soilgrids.org/

Datos meteorológicos

Precipitación diaria observada (mm)	-	Estaciones pluviométricas y pluviográficas del IDEAM. http://dhime.IDEAM.gov.co/atencionciudadano/
Precipitación diaria CHIRPS (mm)	0.05° x 0.05°	Precipitación global diaria. https://data.chc.ucsb.edu/products/CHIRPS-2.0/global_daily/netcdf/p05/
Precipitación diaria IMERG (mm)	0.1° x 0.1°	IMERG Final Run https://gpm.nasa.gov/data/directory
Temperatura máxima diaria (°C)	0.1° x 0.1°	Indicadores agrometeorológicos desde 1979 hasta la actualidad derivados de reanálisis del (<i>Copernicus Climate Change Service</i>) de la Unión Europea, basados en los datos horarios del ECMWF (<i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts</i>) ERA5. https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/sis-agrometeorological-indicators?tab=form
Temperatura mínima diaria (°C)		
Radiación solar total diaria (MJ/m ²)		
Humedad relativa diaria (%)		
Velocidad del viento diaria (m/s)		

El modelo SWAT requiere un formato y estructura de los datos de entrada. Para este proceso, fue necesario el uso de herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) como TerrSet, Qgis y ArcGis y herramientas de edición de archivos de texto y hojas de cálculo. A continuación, se describe el procesamiento de preparación de los datos de entrada para el modelo SWAT.

- **Mapa de uso y cobertura del suelo:** Las clases de uso y cobertura del suelo para los mapas del año 2000, 2018 y 2050, necesitaron ser reclasificadas dentro de los tipos que el modelo SWAT maneja. Para ello, se consultó el Apéndice A - Bases de datos del



modelo, disponible en la documentación del sitio web de SWAT (<https://swat.tamu.edu/docs/>), específicamente la Tabla A-2, la cual enumera todas las coberturas terrestres genéricas incluidas en la base de datos. En la Tabla 5-9, se presenta la clasificación de UCS del IDEAM de acuerdo con los códigos de coberturas de las bases de datos de SWAT

Tabla 5-9. Clasificación de coberturas IDEAM a códigos SWAT

No.	Clasificación IDEAM	Código SWAT	Nombre código SWAT
1	Arbustal	RNGE	Herbazales-matorrales
2	Área agrícola	AGRL	Tierra agrícola-genérica
3	Bosque	FRST	Bosque mixto
4	Cuerpo de agua	WATR	Agua
5	Pastizal	PAST	Pastos
6	Zona urbana	URBN	Urbano

Las imágenes de UCS se cargaron al modelo SWAT en un formato ráster *.tif*, junto con un archivo *.csv* el cual relaciona un identificador con cada una de las clases de uso y cobertura del suelo, presentadas en la Tabla 5-9.

- Mapa de suelos y parámetros físicos:** El mapa de suelos de la cuenca se obtuvo del Mapa Digital de Suelos del Departamento de Boyacá, elaborado por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), este mapa temático representa la distribución de las características del suelo, determinadas mediante el levantamiento general de suelos del departamento de Boyacá a escala 1:100.000, publicado el año 2004. Suministra información importante acerca del recurso suelo, a través de la descripción e interpretación de sus ambientes edafogenéticos, sus características físicas, químicas, mineralógicas y morfológicas, su taxonomía y distribución espacial.

El mapa de suelos se clasifica en Unidades Cartográficas de Suelos, las cuales cuentan con una simbología que hace relación al paisaje, lo que también permite conocer el tipo de material existente, el clima, los suelos presentes, es decir su taxonomía y las fases más importantes, aspectos asociados con su aplicación al manejo. En la leyenda del mapa se describen estos aspectos y se adicionan otros, tales como el perfil que los representa, sus características y las de los materiales que los generan, así como las referidas al paisaje y al área que ocupan. De esta manera, un mapa de suelos se constituye en un documento integral del ambiente y de sus características; en síntesis,



representa la repartición geográfica de los suelos y de las condiciones biofísicas en las que están inscritos (Malagón Castro, 2001).

El mapa de suelos de la cuenca fue cargado al modelo SWAT en formato ráster *.tif*, junto con un archivo *.csv* que relaciona un identificador con el nombre de cada clase de suelo.

Adicionalmente, SWAT requiere de una base de datos con características físicas de los suelos de la cuenca, las propiedades físicas del suelo gobiernan el movimiento del agua y el aire a través del perfil y tienen un impacto importante en el ciclo del agua dentro de la HRU. El archivo de entrada del suelo define las propiedades físicas de todas las capas del suelo y se compone de la información descrita en la Tabla 5-10.

Tabla 5-10. Parámetros físicos del suelo requeridos para ejecutar el modelo SWAT

Variable	Descripción
SNAM	Nombre del suelo
HYDGRP	Grupo hidrológico del suelo (A, B, C o D)
SOL_ZMX	Profundidad máxima de enraizamiento del perfil del suelo (mm)
ANION_EXCL	Fracción de porosidad (espacio vacío) de la que se excluyen los aniones
SOL_CRK	Volumen potencial o máximo de fisuras del perfil del suelo expresado como fracción del volumen total del suelo
TEXTURE	Textura de la capa de suelo
SOL_Z	Profundidad desde la superficie del suelo hasta el fondo de la capa (mm)
SOL_BD	Densidad aparente húmeda (Mg/m^3 o g/cm^3)
SOL_AWC	Capacidad de agua disponible de la capa de suelo (mm H_2O/mm suelo)
SOL_K	Conductividad hidráulica saturada (mm/hr)
SOL_CBN	Contenido de carbono orgánico (% peso del suelo)
SOL_CLAY	Contenido de arcilla (% peso del suelo)
SOL_SILT	Contenido de limo (% peso del suelo).
SOL_SAND	Contenido de arena (% peso del suelo)
SOL_ROCK	Contenido de fragmentos de roca (% peso total)
SOL_ALB	Albedo del suelo húmedo
USLE_K	Ecuación USLE factor de erosionabilidad del suelo (K)

Para el caso de la cuenca en estudio, el contenido de carbono orgánico, arcilla, limo, arena y fragmentos de roca se obtuvo de los mapas de *SoilGrids*, el cual produce mapas de las propiedades del suelo para todo el mundo con una resolución espacial media con un tamaño de celda de 250 m (Poggio et al., 2021).



Para calcular el contenido de agua disponible, la conductividad hidráulica saturada, y la densidad aparente, se empleó *Soil Water Characteristics*, un programa incluido con la instalación de SPAW (*Soil-Plant-Air-Water*) que se utiliza para simular la tensión, la conductividad y la capacidad de retención de agua del suelo en función de la textura del suelo (U.S. Department of Agriculture, 2016).

El albedo de la superficie del suelo se estimó en función de la materia orgánica, como lo propone Baumer (1990):

$$A = \frac{0.6}{\exp[0.4 * OM]}$$

Ecuación 5-3

donde,

A = albedo del suelo

OM = materia orgánica del suelo (%)

La materia orgánica fue calculada a partir de la ecuación propuesta en el capítulo 22 de la documentación de archivos de entrada/salida SWAT, versión 2012.

$$OM = 1.72 * OrgC$$

Ecuación 5-4

donde,

OM = materia orgánica del suelo (%)

$orgC$ = porcentaje de contenido de carbono orgánico de la capa (%)

La ecuación USLE factor de erosionabilidad del suelo (K), se calculó a partir de la ecuación alternativa propuesta por Williams (1995) y descrita a continuación:

$$K_{USLE} = f_{csand} * f_{cl-si} * f_{orgc} * f_{hisand}$$

Ecuación 5-5

$$f_{csand} = \left(0.2 + 0.3 * \exp \left[-0.256 * m_s * \left(1 - \frac{m_{silt}}{100} \right) \right] \right)$$

Ecuación 5-6



$$f_{cl-si} = \left(\frac{m_{silt}}{m_c + m_{silt}} \right)^{0.3}$$

Ecuación 5-7

$$f_{orgC} = \left(1 - \frac{0.0256 * orgC}{orgC + exp [3.72 - 2.95 * orgC]} \right)$$

Ecuación 5-8

$$f_{hisand} = \left(1 - \frac{0.7 * \left(1 - \frac{m_s}{100} \right)}{\left(1 - \frac{m_s}{100} \right) + exp [-5.51 + 22.9 * \left(1 - \frac{m_s}{100} \right)]} \right)$$

Ecuación 5-9

donde,

K_{USLE} = factor de erosionabilidad del suelo (K)

f_{csand} = factor que da factores de erosionabilidad del suelo bajos para suelos con altos contenidos de arena gruesa y valores altos para suelos con poca arena

f_{cl-si} = factor que proporciona factores de erosionabilidad bajos para suelos con altas proporciones de arcilla a limo

f_{orgC} = factor que reduce la erosionabilidad del suelo en suelos con alto contenido de carbono orgánico

f_{hisand} = factor que reduce la erosionabilidad del suelo para suelos con contenidos de arena extremadamente altos

m_{silt} = porcentaje de contenido de limo (partículas de 0,002 a 0,05 mm de diámetro)

m_c = porcentaje de contenido de arcilla (partículas < 0,002 mm de diámetro)

m_s = porcentaje de contenido de arena (partículas de 0,05 a 2,00 mm de diámetro)

$orgC$ = porcentaje de contenido de carbono orgánico de la capa (%)

- **Datos meteorológicos:** El modelo SWAT requiere de un resumen estadístico de parámetros denominado generador meteorológico y de los datos climáticos diarios. SWAT usa el generador meteorológico para simular datos climáticos diarios



representativos para una subcuenca. El generador es usado en dos casos: cuando el usuario especifica que se utilizará el clima simulado o cuando hay datos faltantes (Minga, 2022). Los datos meteorológicos diarios incorporados en el modelo corresponden a la precipitación, la temperatura máxima y mínima, la radiación solar, la humedad relativa y la velocidad del viento, estos tres últimos son requeridos para calcular la evapotranspiración por el método Penman-Monteith.

Los datos de precipitación utilizados fueron los datos observados de las estaciones pluviométricas y pluviográficas del IDEAM y los datos de precipitación diaria de CHIRPS, cada uno de estos datos fueron corridos por separado en el modelo SWAT, es decir, se realizó una primera corrida con los datos de precipitación observada y una segunda corrida con los datos de precipitación de CHIRPS, estos datos fueron acompañados de la temperatura máxima y mínima, la radiación solar, la humedad relativa y la velocidad del viento a nivel diario, los cuales fueron descargados del producto ERA5. Los datos meteorológicos fueron guardados en archivos de texto (.txt), siguiendo la estructura que se establece en la guía rápida del usuario, en la cual la primera línea corresponde a la fecha inicial de la serie de datos y a partir de la segunda línea los datos como tal.

El resumen estadístico de parámetros denominado generador meteorológico, se elaboró a partir de la macro de Excel disponible en el catálogo de herramientas meteorológicas de SWAT, llamada *Macro WGN Excel*, la cual está diseñada para calcular las estadísticas de las estaciones meteorológicas necesarias para crear archivos de estaciones meteorológicas de usuario para SWAT. Los parámetros estadísticos del generador meteorológico (WGN) se presentan en la Tabla 5-11.

Tabla 5-11. Parámetros estadísticos del generador meteorológico (WGN)

Parámetro	Descripción
STATION	Nombre de la estación meteorológica
WLATITUDE	Latitud de la estación utilizada para crear los parámetros estadísticos (grados)
WLONGITUDE	Longitud de la estación utilizada para crear los parámetros estadísticos (grados)
WELEV	Elevación de la estación utilizada para crear los parámetros estadísticos (m)
RAIN_YRS	El número de años de datos de precipitación máxima mensual de 0.5 h usados para definir valores para RAIN_HHMX (1) - RAIN_HHMX (12)



Parámetro	Descripción
TMPMX (mes)	Temperatura máxima diaria media del aire por mes (°C)
TMPMN (mes)	Temperatura mínima diaria media del aire por mes (°C)
TMPSTDMX (mes)	Desviación estándar de la temperatura máxima diaria del aire en el mes (°C)
TMPSTDMN (mes)	Desviación estándar de la temperatura mínima diaria del aire en el mes (°C)
PCPMM (mes)	Precipitación media mensual (mm H ₂ O)
PCPSTD (mes)	Desviación estándar de la precipitación diaria en el mes (mm H ₂ O/día)
PCPSKW (mes)	Coeficiente de sesgo para la precipitación diaria en el mes.
PR_W1 (mes)	Probabilidad de un día húmedo después de un día seco en el mes
PR_W2 (mes)	Probabilidad de un día húmedo después de un día húmedo en el mes
PCPD (mes)	Número medio de días de precipitación en el mes
RAINHHMX (mes)	Precipitación máxima de 0.5 horas en todo el período de registro del mes (mm H ₂ O)
SOLARAV (mes)	Radiación solar media diaria del mes (MJ/m ² /día)
DEWPT (mes)	Humedad relativa (fracción)
WNDVAV (mes)	Velocidad media diaria del viento en el mes (m/s)

5.6.2. Ejecución del modelo

La configuración y ejecución del modelo SWAT se realizó a partir del uso de dos herramientas:

- a) QSWAT, una interfaz en QGIS para la delimitación de la cuenca, subcuencas y creación de las Unidades de Respuesta Hidrológica (HRUs).
- b) *SWAT Editor*, una interfaz para modificar entradas y ejecutar el modelo.

Para la delimitación de la cuenca y las subcuencas, se requirió el DEM y la salida de la cuenca (exutorio), correspondiente a la ubicación de la estación limnigráfica El Caracol. Se usó una red hídrica generada en QSWAT.

Posteriormente se crearon las HRUs, para lo cual fue necesario incorporar el mapa de uso y cobertura del suelo y el mapa de suelos, con sus respectivas tablas asociadas y definir la clasificación de las pendientes. Las áreas que contienen el mismo uso/cobertura del suelo, tipo de suelo y que se encuentran en el mismo rango de pendiente se agrupan en cada subcuenca para formar unidades de respuesta hidrológica (HRUs).



Una vez creadas las Unidades de Respuesta Hidrológica, se procedió a ingresar los datos meteorológicos dentro de la interfaz *SWAT Editor*, para que el programa creara las respectivas tablas de entrada y proceder con la ejecución del modelo, en donde se definieron los periodos de simulación y la cantidad de años de calentamiento del modelo. En la Figura 5.20, se presenta un diagrama general del proceso de simulación del modelo SWAT.

Para la configuración inicial de SWAT se plantearon 4 modelos diferentes variando el método de cálculo de la evapotranspiración potencial - PET (correspondientes a los métodos de *Hargreaves* y *Penman-Monteith*) y el método de estimación diario del número de curva - CN (correspondientes a los métodos *Plant ET* y *Soil Moisture*), con el fin de elegir la mejor configuración del modelo en función de los criterios de evaluación estadística (NSE y R^2) para realizar las simulaciones hidrológicas y el proceso de calibración y validación de las mismas.

En el presente estudio se corrió una simulación por cada uno de los datos de precipitación (precipitación observada y precipitación del producto), y cada una de estos datos se corrieron tres veces, una para cada mapa de uso y cobertura del suelo (mapa de UCS del año 2000, mapa de UCS del año 2018 y mapa de UCS del año 2050).

5.6.3. Calibración y validación del modelo

Para la calibración del modelo, se empleó el software SWAT-CUP 2012, una herramienta desarrollada por Karim C. Abbaspour, que permite realizar calibración estocástica del modelo hidrológico a partir de los resultados almacenados en la carpeta "TxtInOut". La manera como SWAT-CUP trabaja es corriendo un gran número de simulaciones (mayor a 500) haciendo una combinación aleatoria de valores de los parámetros seleccionados dado que para cada parámetro no existe un valor único sino un rango de valores definidos por el usuario. Estos rangos deben ser cuidadosamente seleccionados y asignados para que tengan un sentido físico (Carrillo Peña, 2018).

Los rangos de los parámetros fueron determinados utilizando una tabla suministrada por la herramienta SWAT-CUP, la cual define los rangos físicamente posibles. La variación de los valores de los parámetros se realizó haciendo cambios absolutos a los valores de los parámetros (v) o cambios relativos a los mismos (r). Teniendo en cuenta las especificaciones del manual de usuario Abbaspour (2015), se aplicaron cambios relativos a los parámetros relacionados con propiedades físicas y con referencia espacial como son



los casos de los parámetros curva número (CN2), la profundidad de los diferentes horizontes de suelo (SOL_Z) o la conductividad hidráulica del suelo (SOL_K).

En la Tabla 5-12, se presentan los parámetros utilizados en la calibración del modelo, los cuales fueron seleccionados por su alta sensibilidad de acuerdo con la revisión de la documentación existente y también de acuerdo con los parámetros empleados en la calibración del modelo CEQUEAU, de modo que, si bien no fueron los mismos, se encontraron relacionados.

Tabla 5-12. Parámetros de calibración del modelo SWAT

No.	Parámetro	Descripción	Mín.	Máx.
1	CN2	Numero de Curva método SCS	35	98
2	ALPHA_BF	Factor alfa de flujo base (días)	0	1
3	GW_DELAY	Retraso del agua subterránea (días)	0	500
4	GWQMN	Profundidad umbral de agua en el acuífero poco profundo necesaria para que se produzca el flujo de retorno (mm)	0	5000
5	GW_REVAP	Coefficiente de "reevaporación" del agua subterránea	0.02	0.2
6	GWHT	Altura inicial del agua subterránea (m)	0	25
7	REVAPMN	Profundidad umbral del agua en el acuífero poco profundo para que se produzca la "reevaporación" (mm)	0	500
8	RCHRG_DP	Fracción de percolación de acuíferos profundo	0	1
9	ESCO	Factor de compensación de la evaporación del suelo	0	1
10	EPCO	Factor de compensación de la absorción de agua de la vegetación	0	1
11	DDRAIN	Profundidad hasta el drenaje subterráneo (mm)	0	2000
12	DEP_IMP	Profundidad hasta la capa impermeable en el perfil del suelo (mm)	0	6000
13	SURLAG	Tiempo de retraso de la escorrentía superficial	0.05	24
14	SOL_K	Conductividad hidráulica saturada (mm/h)	0	2000
15	SOL_AWC	Capacidad de agua disponible de la capa de suelo (mm/mm)	0	1

Teniendo en cuenta que SWAT, requiere como mínimo dos años de calentamiento, los cuales fueron 1981 y 1982, el periodo de calibración de modelo fue de 1983 a 2008, es decir, el 62 % de los años de todo el periodo de modelación, mientras que el periodo de



validación correspondió al periodo 2009-2022, es decir al 33 % de los años de todo el periodo de modelación.

La calibración del modelo se realizó a partir de los resultados de la simulación que tuvo como entrada los datos de precipitación observada y el mapa de uso y cobertura del suelo del año 2000.

Para la validación del modelo, se ejecutó nuevamente el programa SWAT con los valores de los parámetros calibrados, para el periodo 2009-2022.

Los criterios estadísticos utilizados para evaluar la eficiencia tanto de la calibración como de la validación fueron el coeficiente de eficiencia NSE, el porcentaje de sesgo (PBIAS) y el coeficiente de determinación R^2 , mismos que se empelaron en la calibración y validación del modelo CEQUEAU y cuya descripción se presenta en el numeral 5.5.3 del presente documento.

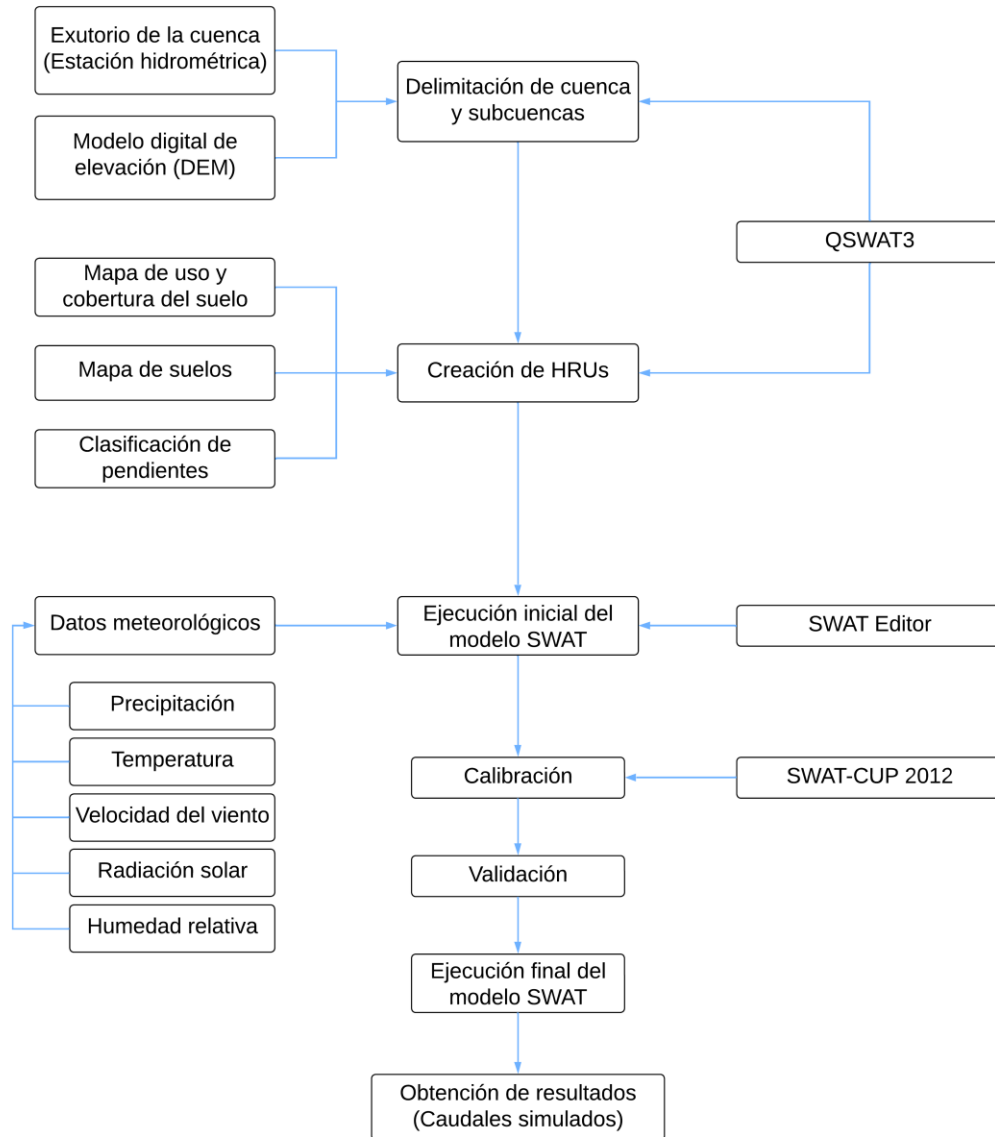


Figura 5.20. Proceso de modelación con SWAT a nivel de HRUs

5.7. Análisis comparativo de los modelos hidrológicos CEQUEAU y SWAT

El análisis comparativo entre los modelos hidrológicos CEQUEAU y SWAT, se basó en el análisis de los siguientes criterios:

- La identificación de información requerida para correr cada modelo, destacando las variaciones en los datos de entrada necesarios, como la topografía, usos y tipos del suelo e información climatológica.
- Métodos de cálculo de algunos parámetros importantes dentro del balance hidrológico, como la evapotranspiración.



- El proceso de calibración y validación de ambos modelos, enfocado en los parámetros de calibración específicos de cada modelo, analizando cómo estos influyen en la precisión de las simulaciones.
- Comparación de los caudales simulados por CEQUEAU y SWAT con respecto a los caudales observados en la estación hidrométrica.

5.8. Análisis del impacto del uso y cobertura del suelo en el rendimiento hídrico de la cuenca

Teniendo en cuenta que el objetivo general del presente trabajo evaluar el impacto del uso y cobertura del suelo (UCS) en el caudal de la cuenca del río Garagoa, empleando los modelos hidrológicos CEQUEAU y SWAT, a continuación, se describe como se evaluaron los impactos del UCS con ambos modelos hidrológicos:

- **Modelo CEQUEAU:** Considerando la ocupación del suelo que permite CEQUEAU, la cual corresponde únicamente a la existencia de lagos, bosques, ciénegas y otros, fue necesario realizar una reclasificación de los mapas de uso y cobertura del suelo, en donde, las coberturas de bosque se clasificaron dentro de la categoría bosque, los cuerpos de agua se clasificaron dentro de la categoría lagos y al no presentarse ciénegas en la zona de estudio, las coberturas de arbustal, área agrícola, pastizal y zonas urbanas se clasificaron dentro de la categoría de otros. Dicha reclasificación se realizó para los mapas de uso y cobertura del suelo del año 2000 y 2018 y para el mapa proyectado al año 2050.

Teniendo en cuenta lo anterior fue necesario generar tres archivos fisiográficos (*.PHY); uno para cada mapa de UCS (2000, 2018, 2050), estos archivos incluyen el porcentaje de ocupación de las coberturas: lagos, bosques y ciénegas para cada una de las celdas de la cuadrícula generada para simular con CEQUEAU.

De acuerdo con lo anterior, el análisis del impacto del uso y cobertura del suelo en el rendimiento hídrico de la cuenca con el modelo CEQUEAU, se enfocó en la cobertura de bosques, es decir, se analizó el impacto que tiene la disminución de la cobertura de bosques en la producción hídrica de la cuenca, a partir de la simulación de los caudales a la salida de la cuenca del río Garagoa para los años 2000, 2018 y 2050.

- **Modelo SWAT:** En cuanto al análisis del impacto del uso y cobertura del suelo en el rendimiento hídrico de la cuenca con el modelo SWAT, se tuvo en cuenta también los mapas de uso y cobertura del suelo para los años 2000, 2018 y 2050, con la clasificación



inicial propuesta: (1) arbustal, (2) área agrícola, (3) bosque, (4) cuerpo de agua, (5) pastizal y (6) zona urbana, teniendo en cuenta que el modelo SWAT, presenta una amplia base de datos de categorías de uso y cobertura del suelo, para la vinculación con esta base de datos, las diferentes clases de UCS se agruparon y clasificaron de acuerdo con los códigos de coberturas de la base de datos de SWAT. Con el fin realizar la comparación de los resultados obtenidos con el modelo CEQUEAU y el modelo SWAT, se realizó también un análisis enfocado en los impactos de la cobertura de bosque sobre el rendimiento hídrico de la cuenca.

La evaluación de los impactos del cambio de uso y cobertura del suelo en el rendimiento hídrico de la cuenca, se realizó con base en el caudal del río Garagoa que fue simulado en los modelos hidrológicos, a partir de los proyectos que presentaron la mejor validación y calibración para cada uno de los datos de precipitación incorporados (precipitación observada y precipitación CHIRPS).

La evaluación del impacto actual de los cambios de uso de la tierra en el caudal de salida de la cuenca se evaluó entre el UCS 2000 y el UCS 2018, mientras que la evaluación del impacto futuro se evaluó entre el UCS de 2018 y el UCS de 2050, el periodo de clima para la evaluación de los impactos en los tres escenarios de UCS correspondió al periodo 1983-2022. La variación de caudal se analizó a escala diaria y mensual.

6. RESULTADOS

En este capítulo se especifican los resultados obtenidos en el presente estudio, los cuales se estructuran de la siguiente forma: (1) información hidrométrica, (2) información meteorológica, (3) uso y cobertura del suelo, (4) modelación hidrológica con CEQUEAU, (5) modelación hidrológica con SWAT, (6) análisis comparativo de los modelos hidrológicos y (7) impactos del uso y cobertura del suelo en el caudal de la cuenca.

6.1. Información hidrométrica

La información hidrométrica analizada corresponde a la estación limnigráfica “El Caracol”, la cual se ubica en la salida la cuenca. Esta información se empleó para calibrar y validar los modelos hidrológicos, en la Figura 6.1, se representan los caudales medios diarios para el periodo 1981-2022 y en la Figura 6.2, los caudales medios diarios interanuales para el mismo periodo.

El periodo en el cual se presentan caudales más altos en el río Garagoa es de abril a noviembre, siendo julio el mes en el que se presentan los caudales más altos; los valores de caudales más bajos se presentan en los meses de diciembre, enero, febrero y marzo, lo anterior corresponde con el comportamiento de las precipitaciones en la cuenca.

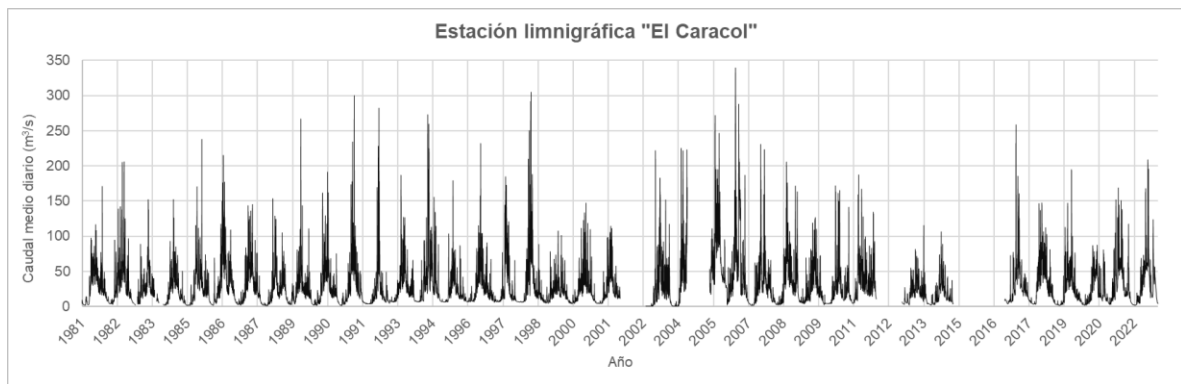


Figura 6.1. Caudales medios diarios del río Garagoa (Periodo 1981-2022)

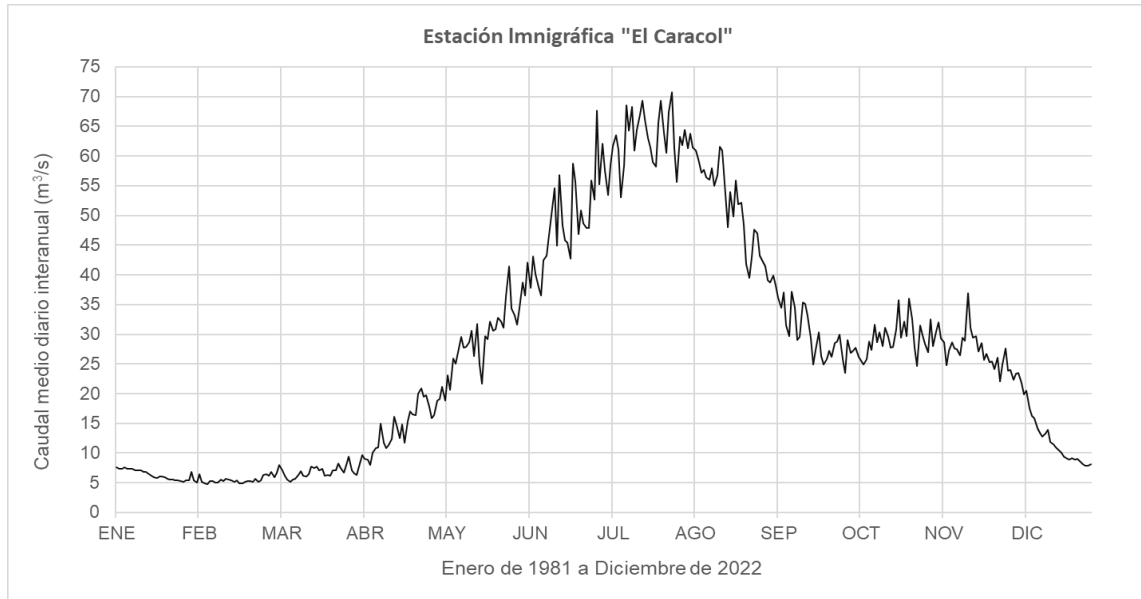


Figura 6.2. Hidrograma medio diario interanual (1981-2022) del río Garagoa en El Caracol

Los caudales medios mensuales de la cuenca del río Garagoa para el periodo 1981-2022, se presentan en la Figura 6.3.

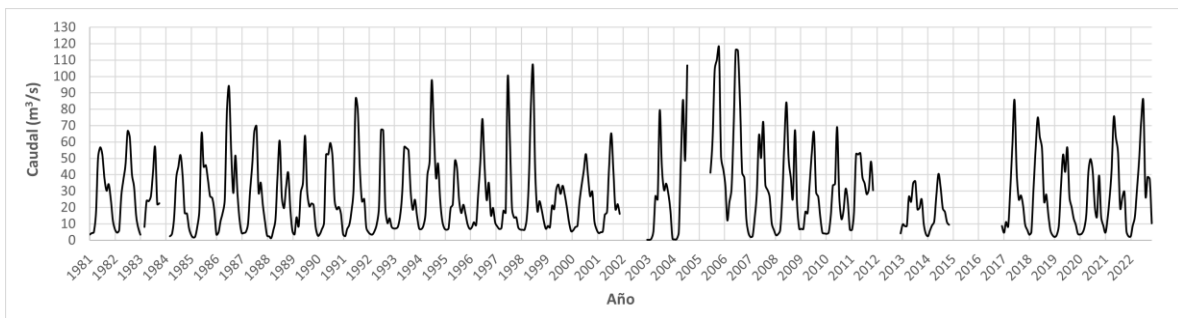


Figura 6.3. Hidrograma medio mensual (1981-2022) del río Garagoa en El Caracol

En cuanto al análisis de las subseries mensuales, en la Figura 6.4, se presentan los valores atípicos de caudal por mes, los meses con mayor presencia de valores atípicos son de septiembre a diciembre con más del 9 % de datos atípicos, sin embargo, en los 12 meses se presentan valores atípicos extremos, lo cuales al ser revisados con la series de precipitación, el inventario de eventos climáticos extremos, con los valores diarios de caudal consecutivos y la estacionalidad de los mismos, permitieron inferir que en su mayoría son valores de caudal extremos y no datos erróneos, sin embargo, para la calibración y validación de los modelos no se tuvieron en cuenta los años de registro de caudal 2005 y



2006, debido a la ausencia de datos para los primeros meses del año 2005 y el valor de los datos atípicos en el año 2006 que no fueron posible corroborar.

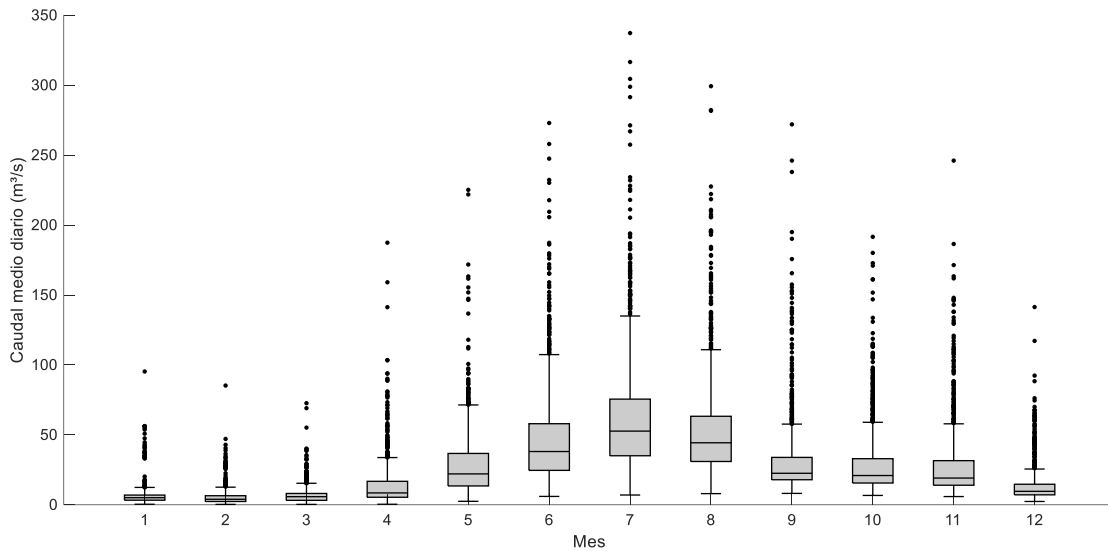


Figura 6.4. Distribución de datos subseries mensuales de caudal

En la Tabla 6-1, se presenta la cantidad de datos faltantes y atípicos por mes, así como la descripción de los datos estadísticos de los mismos.

Tabla 6-1. Datos faltantes, datos atípicos y resumen estadístico de la distribución de datos de caudal

MES	Datos faltantes		Datos atípicos		Descripción de datos					Caudal promedio (m³/s)
	No.	%	No.	%	Extremo inferior	Q1	Mediana	Q2	Extremo superior	
ENE	194	15	52	5	0.4	3.3	5.1	7.0	12.4	6.0
FEB	199	17	54	5	0.3	2.4	4.0	6.5	12.6	5.1
MAR	155	12	83	7	0.3	3.2	5.8	8.1	15.4	6.4
ABR	150	12	83	7	0.4	5.4	8.5	16.8	33.8	14.1
MAY	158	12	58	5	2.5	13.5	22.1	36.7	71.4	28.3
JUN	150	12	69	6	6.0	24.6	38.1	58.0	107.4	48.5
JUL	126	10	69	6	7.0	35.1	52.7	75.6	135.0	61.0
AGO	142	11	69	6	8.0	31.0	44.4	63.3	110.9	52.2
SEP	151	12	97	9	8.2	17.9	22.5	33.9	57.7	32.1
OCT	155	12	100	9	6.7	15.6	20.9	33.0	59.0	29.3
NOV	181	14	92	9	5.9	14.0	19.1	31.6	57.9	28.1
DIC	155	12	112	10	2.4	7.1	9.6	14.7	25.6	13.6



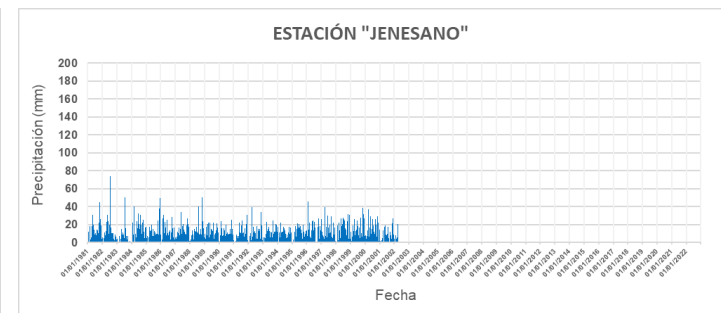
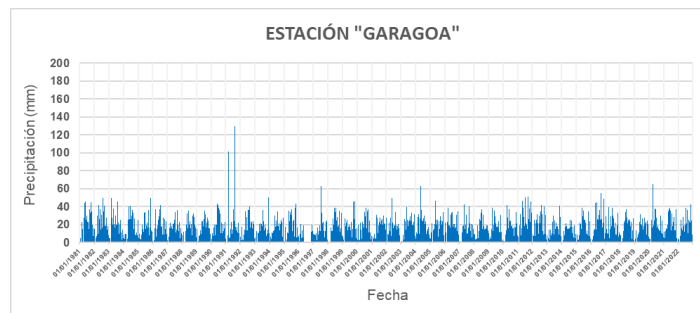
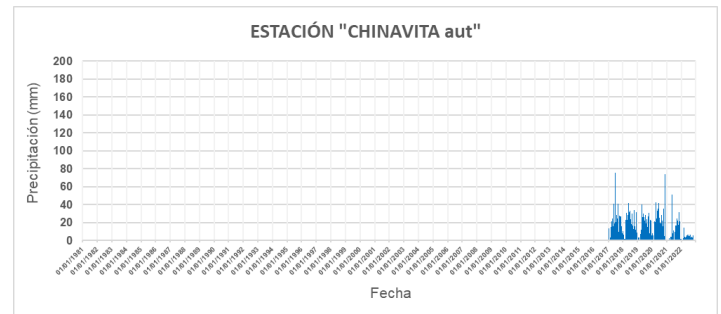
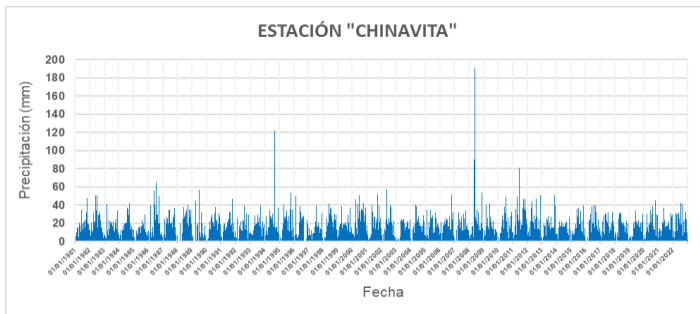
En el Anexo A, se presenta el inventario del “Consolidado anual de emergencias” publicado por la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres para el departamento de Boyacá, información empleada en la revisión de los datos atípicos de la serie de caudales de la estación El Caracol.

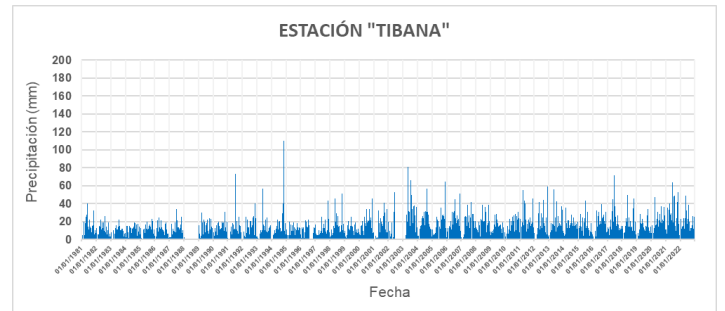
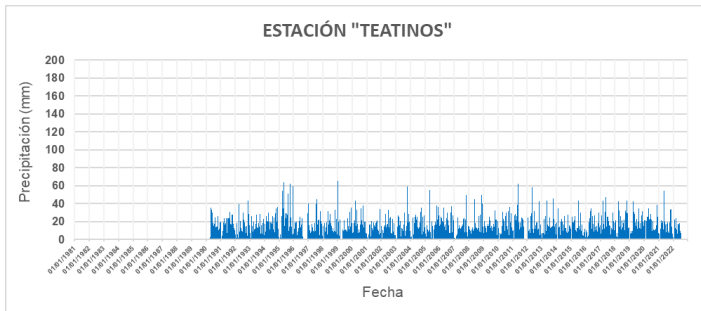
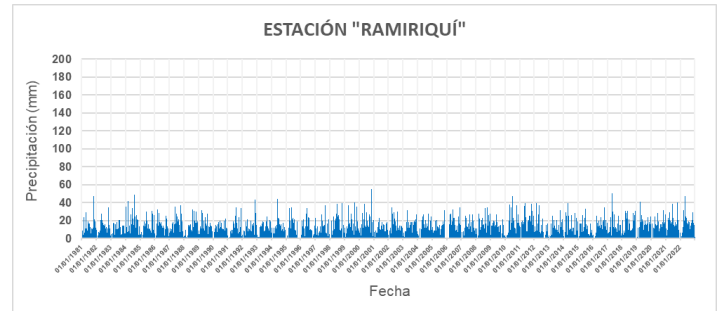
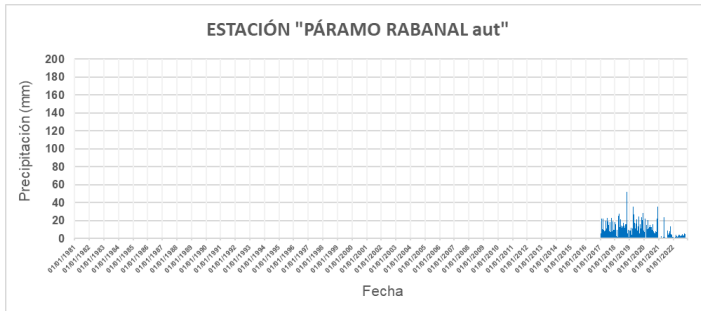
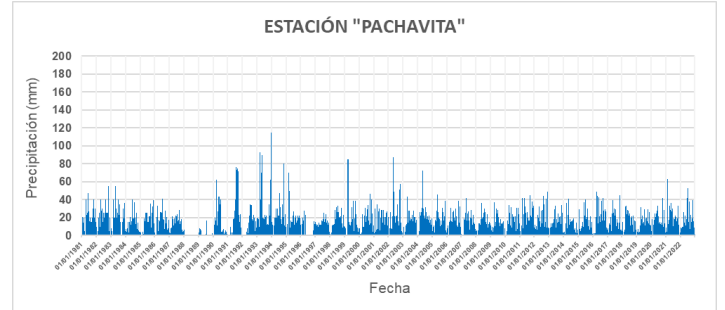
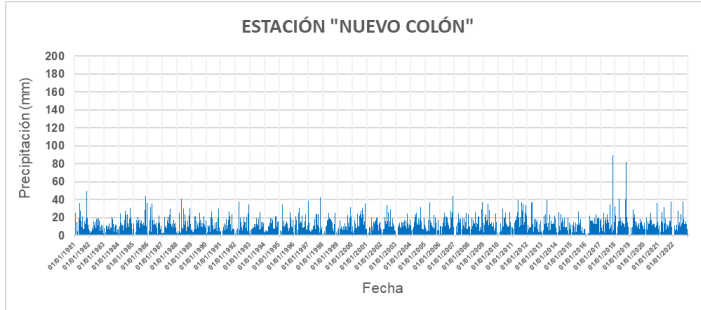
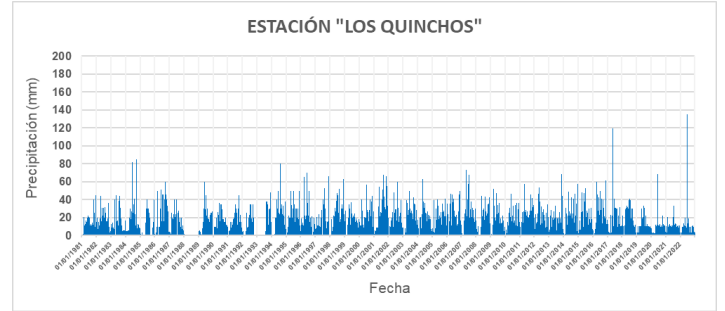
6.2. Información meteorológica

La información meteorológica analizada corresponde a los datos de precipitación de las 16 estaciones ubicadas en la cuenca y a la precipitación obtenida de los productos satelitales CHIRPS e IMERG, en esta sección se presenta el análisis de esta información, incluyendo la validación de los productos satelitales con la información observada.

6.2.1. Precipitación observada

En la Figura 6.5, se presenta gráficamente la precipitación diaria de las 16 estaciones de la cuenca, para el periodo 1981-2022.





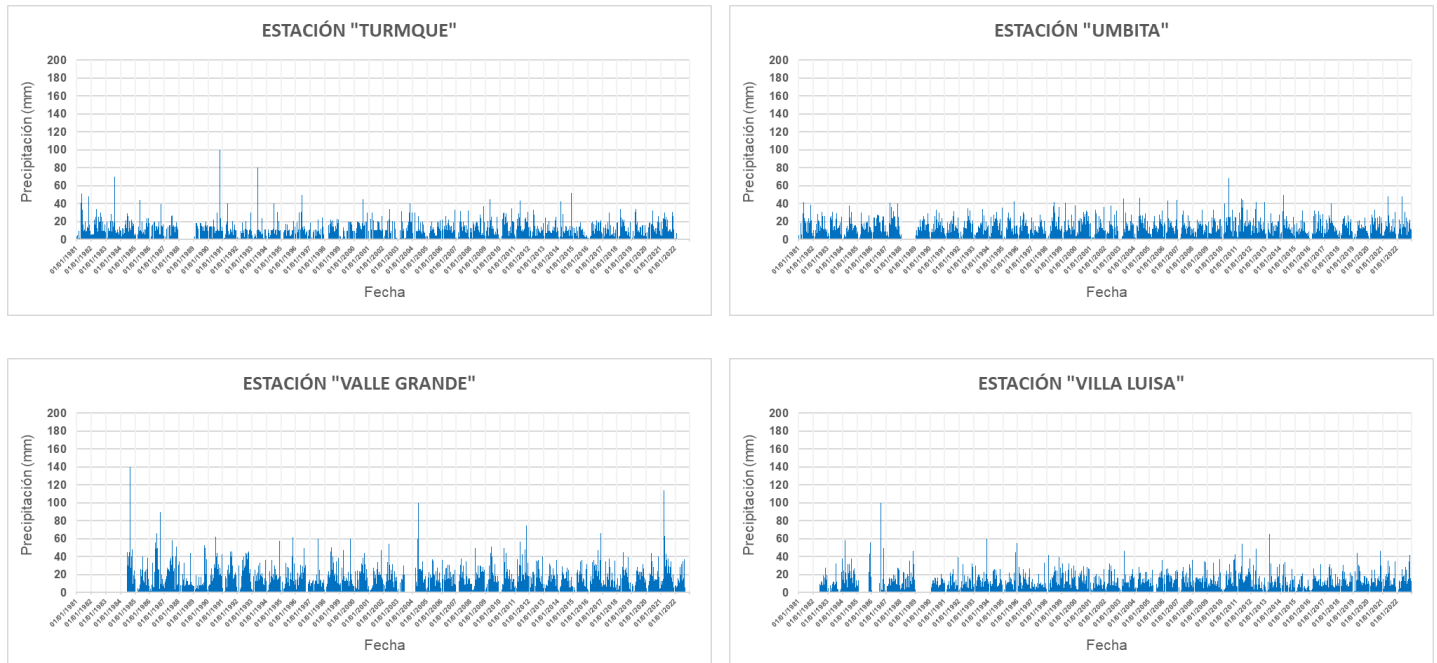


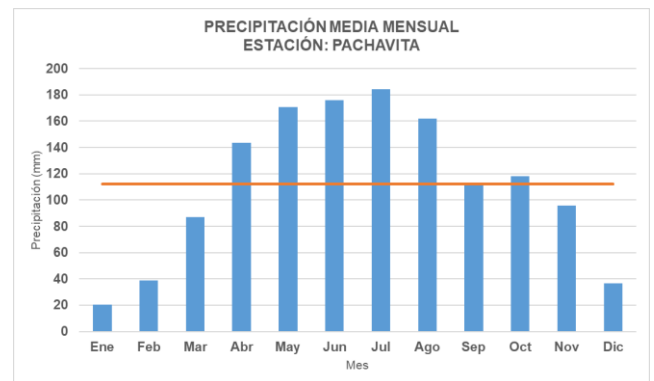
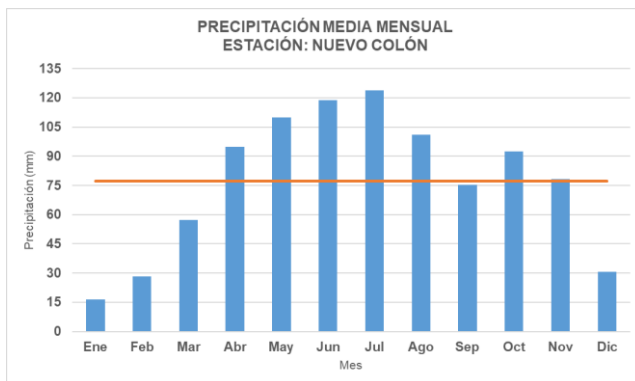
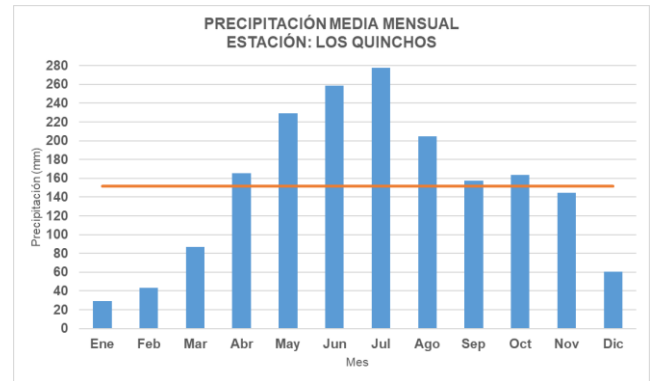
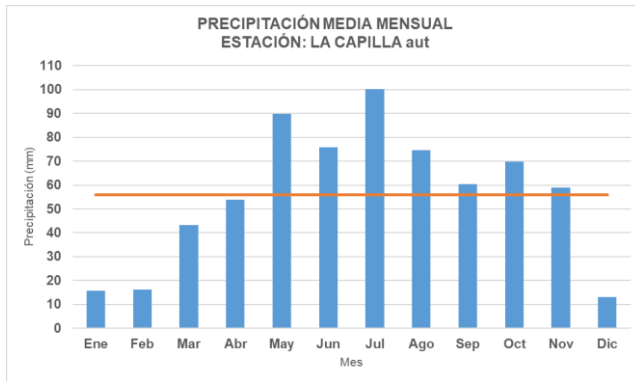
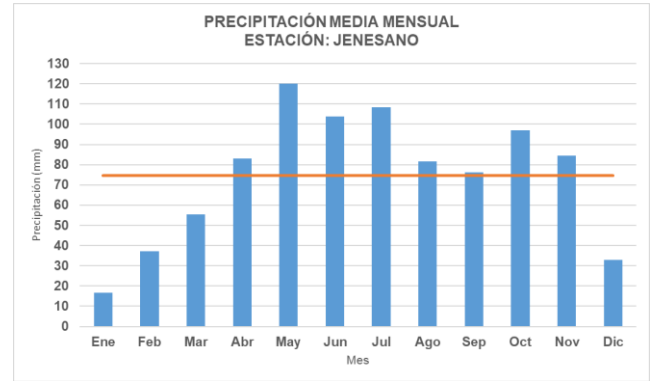
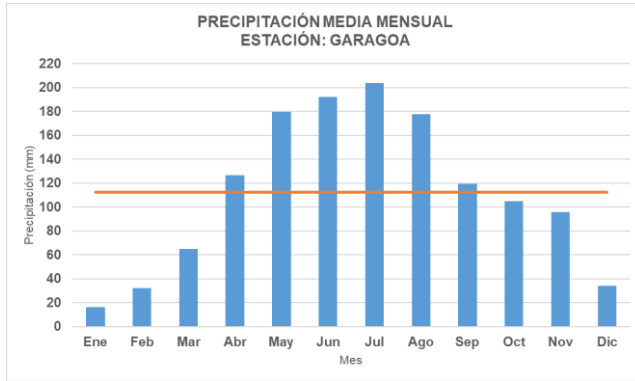
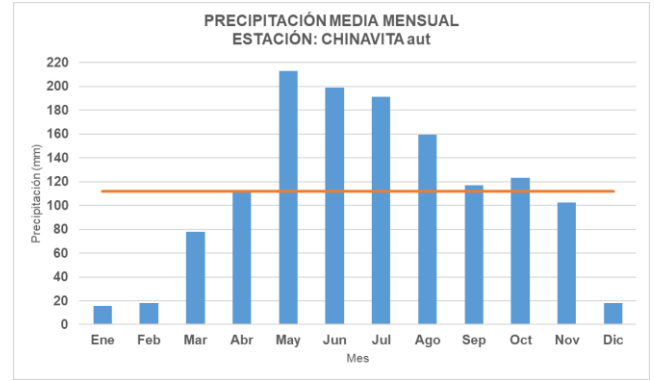
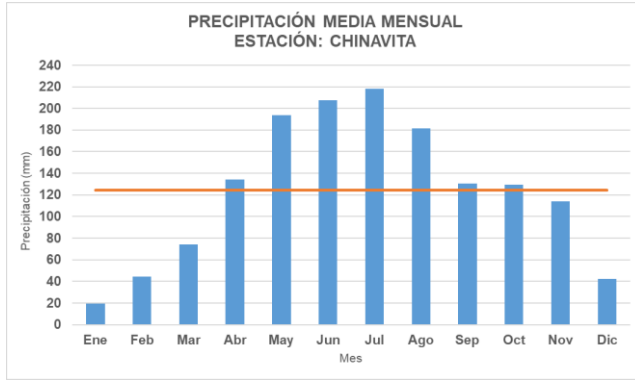
Figura 6.5. Precipitación diaria de las 16 estaciones de la cuenca, periodo 1981-2022

En general el comportamiento de la precipitación en la cuenca es de carácter monomodal, el periodo en el que se registran mayores precipitaciones es de abril a noviembre y el mes más lluvioso corresponde al mes de julio.

Las estaciones ubicadas en la parte norte de la cuenca presentan un comportamiento levemente diferente al presentar dos periodos de precipitaciones altas, correspondientes a los periodos de abril a agosto y de octubre a noviembre.

Los meses que presentan las precipitaciones más bajas en todas las estaciones corresponden a enero, febrero y diciembre.

En la Figura 6.6, se presentan las gráficas de precipitación media mensual de las 16 estaciones de la cuenca para el periodo 1981-2022, cabe aclarar que no todas las estaciones tienen datos completos en dicho periodo, las estaciones automáticas denotadas con la abreviación "aut" junto a su nombre tienen un periodo de registro del año 2017 al año 2022, por lo que puede inferir en la presentación de un régimen de precipitación distinto a las estaciones convencionales con información desde el año 1981.



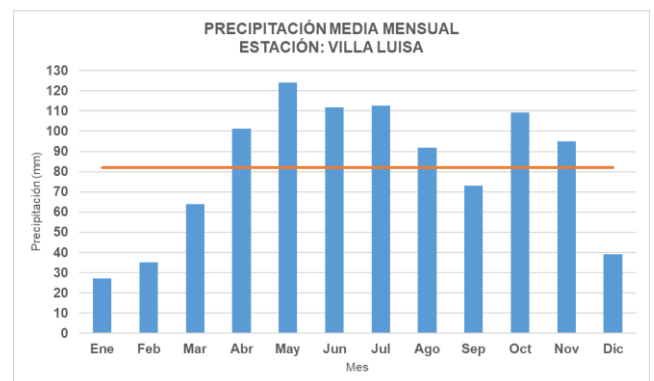
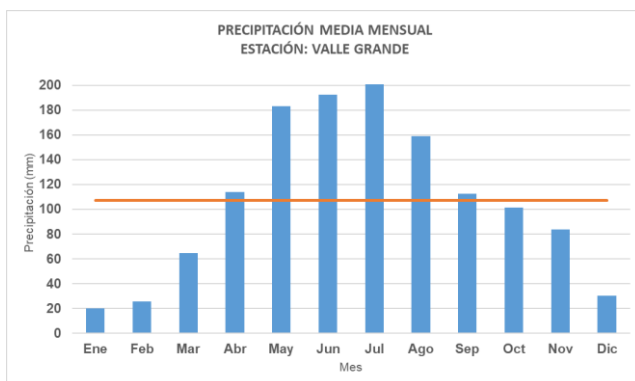
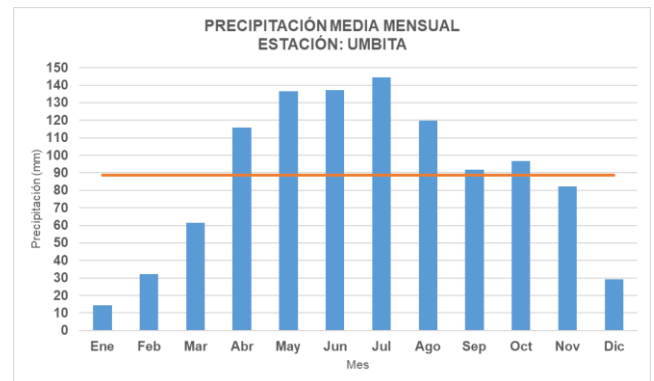
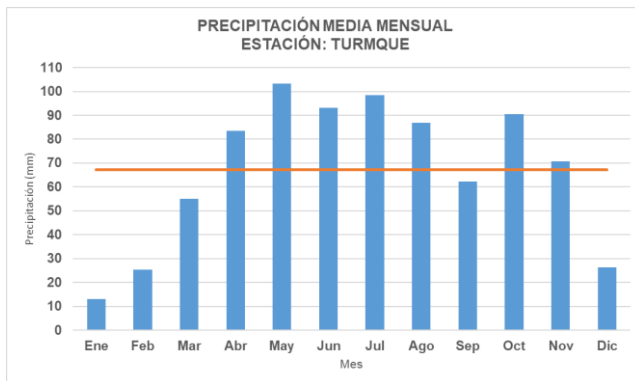
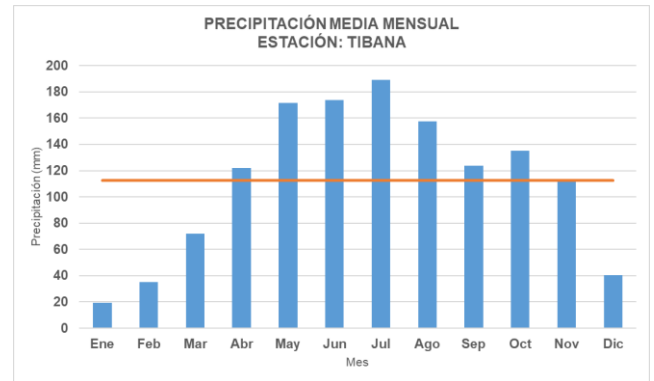
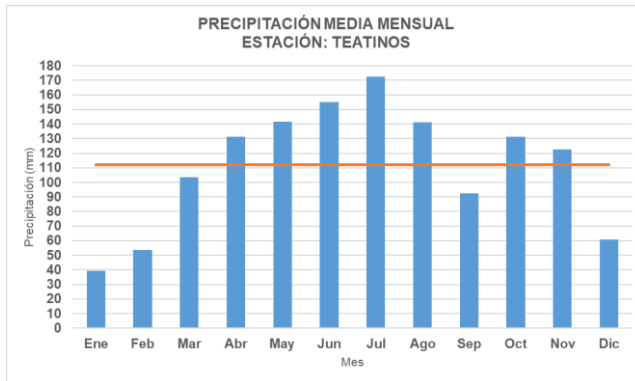
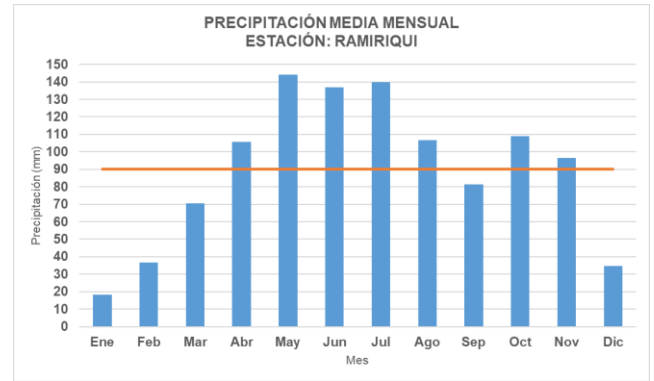
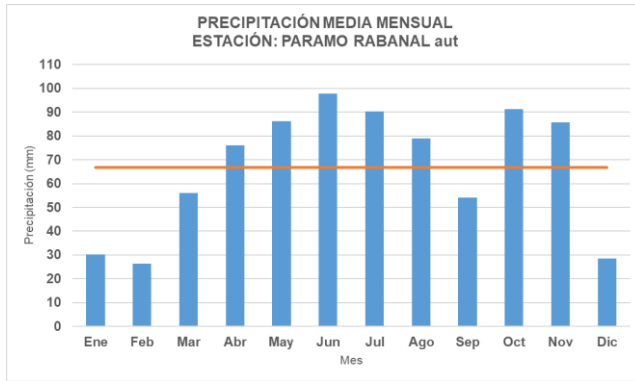


Figura 6.6. Precipitación media mensual de las 16 estaciones de la cuenca, periodo 1981-2022

En la Figura 6.7, se representa la distribución espacial de la precipitación media anual de la cuenca, obtenida a partir de la interpolación de las estaciones de registro de precipitación instaladas en la cuenca, la cual varía entre los 800 y 1690 mm, la parte alta de la cuenca es la que presenta precipitaciones más bajas, mientras que la zona media y baja de la cuenca presenta las precipitaciones más altas.

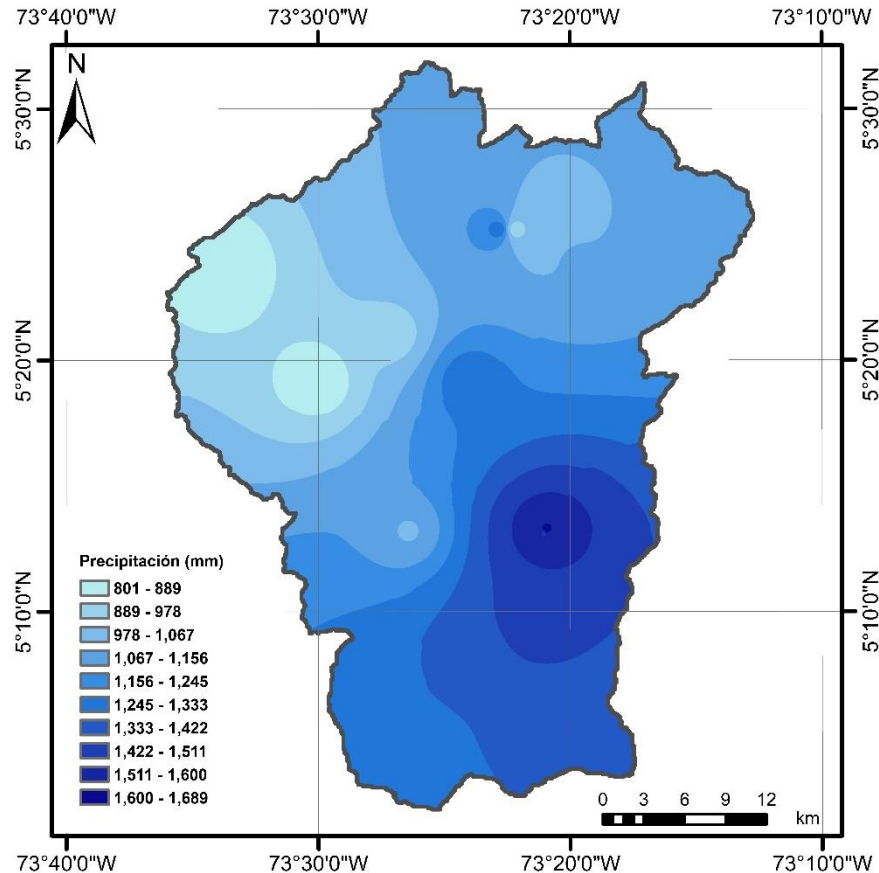


Figura 6.7. Distribución espacial de la precipitación media anual en la cuenca

6.2.2. Validación de datos de precipitación CHIRPS e IMERG

La validación de los productos satelitales se realizó a partir del análisis del coeficiente de determinación (R^2) tanto a nivel diario como mensual entre las precipitaciones calculadas por el producto satelital y las precipitaciones observadas en las estaciones climatológicas instaladas en la cuenca. Para el caso del producto CHIRPS, se comparó el periodo 1981-2022 y para el producto IMERG, se comparó el periodo 2000-2022. En la Tabla 6-2, se presentan los resultados de validación de datos de precipitación CHIRPS e IMERG con base en los coeficientes de determinación.



Tabla 6-2. Resultados de validación de datos de precipitación CHIRPS e IMERG (Coeficientes de determinación)

Estación	Coeficiente de determinación (R ²)			
	CHIRPS diario	CHIRPS mensual	IMERG diario	IMERG mensual
PARAMO RABANAL - AUT [35075080]	0.03	0.17	0.04	0.04
CHINAVITA - AUT [35075070]	0.07	0.42	0.10	0.27
LA CAPILLA - AUT [35085080]	0.06	0.19	0.10	0.14
TIBANA [35070040]	0.03	0.58	0.06	0.43
TURMEQUE [35070030]	0.02	0.56	0.05	0.46
NUEVO COLÓN [35075010]	0.03	0.75	0.05	0.49
RAMIRIQUÍ [35070010]	0.03	0.79	0.06	0.59
VILLA LUISA [35075030]	0.03	0.71	0.06	0.65
TEATINOS [35070310]	0.03	0.59	0.04	0.44
JENESANO [35070220]	0.04	0.67	0.04	0.76
VALLE GRANDE [35070550]	0.02	0.76	0.03	0.65
GARAGOA [35070080]	0.04	0.85	0.07	0.73
UMBITA [35070050]	0.03	0.81	0.07	0.67
LOS QUINCHOS [35070060]	0.02	0.70	0.04	0.46
PACHAVITA [35070210]	0.03	0.71	0.07	0.69
CHINAVITA [35070070]	0.03	0.77	0.06	0.67

En la Figura 6.8, se presenta la distribución de las 16 estaciones de la cuenca con su respectivo nombre y valor de los coeficientes de determinación (R²) resultantes de la validación de los productos CHIRPS en IMERG, a nivel diario y mensual.

Los valores de coeficientes de determinación (R²) a nivel diario fueron muy bajos en comparación con los valores mensuales, a nivel diario ambos productos presentaron correlaciones no satisfactorias, mientras que a nivel mensual el producto CHIRPS presentó una mejor correlación que el producto IMERG.

Adicionalmente, de forma visual, se realizó la comparación de ambos productos a partir de la representación gráfica de la precipitación diaria para el periodo 2000-2022 o el periodo en donde se tenía información completa de las estaciones y ambos productos satelitales, para ser comparables (Ver Figura 6.9 a Figura 6.24).

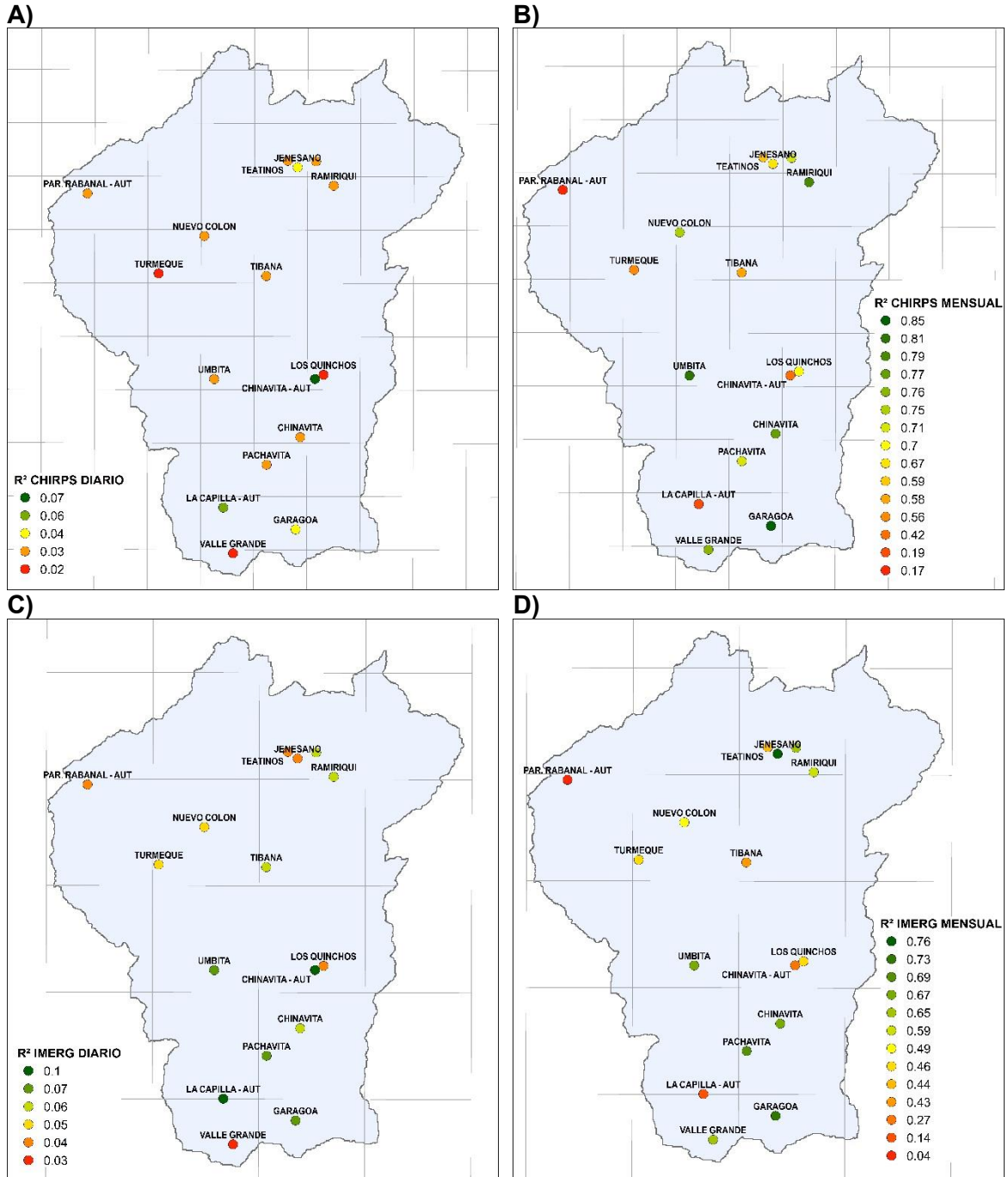


Figura 6.8. Coeficiente de determinación (R^2) entre precipitación diaria de estaciones y pixeles de los productos satelitales. A) CHIRPS a nivel diario, B) CHIRPS a nivel mensual, C) IMERG a nivel diario y D) IMERG a nivel mensual.

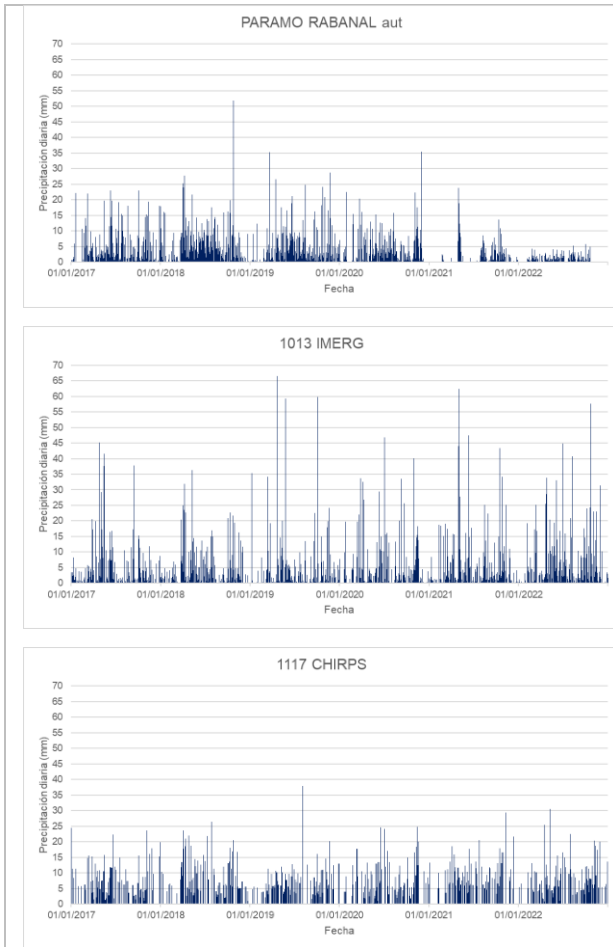


Figura 6.9. Precipitación diaria para el periodo 2000-2022, estación Paramo rabanal y pixeles correspondientes a los productos satelitales

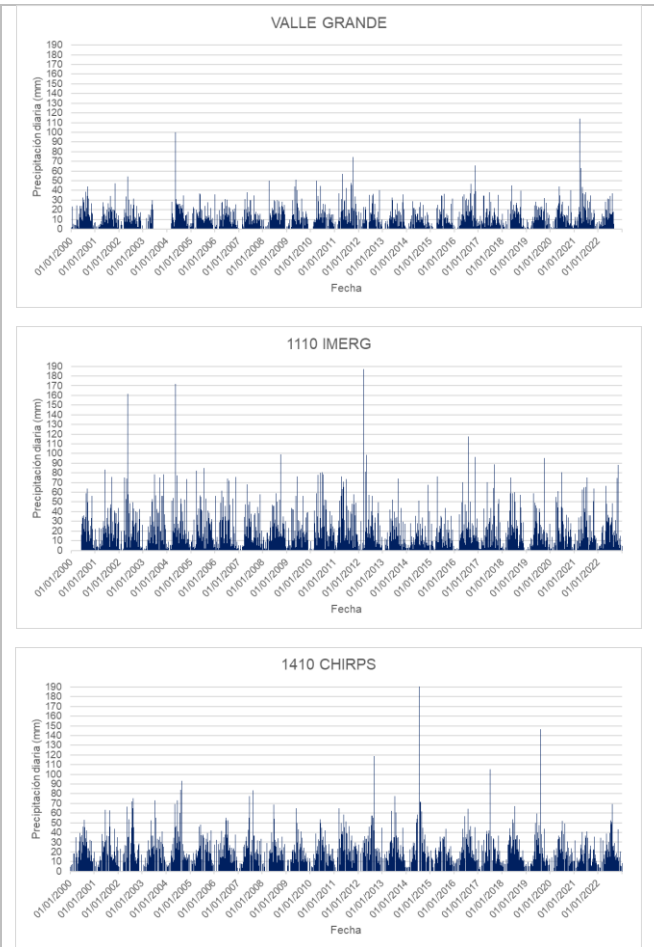


Figura 6.10. Precipitación diaria para el periodo 2000-2022, estación Valle grande y pixeles correspondientes a los productos satelitales

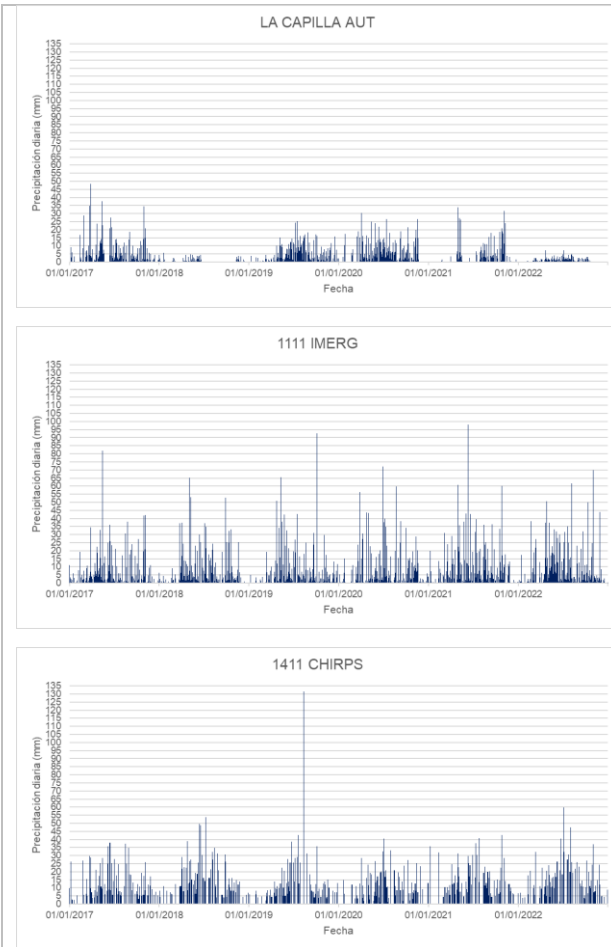


Figura 6.11. Precipitación diaria para el periodo 2000-2022, estación La Capilla aut y pixeles correspondientes a los productos satelitales

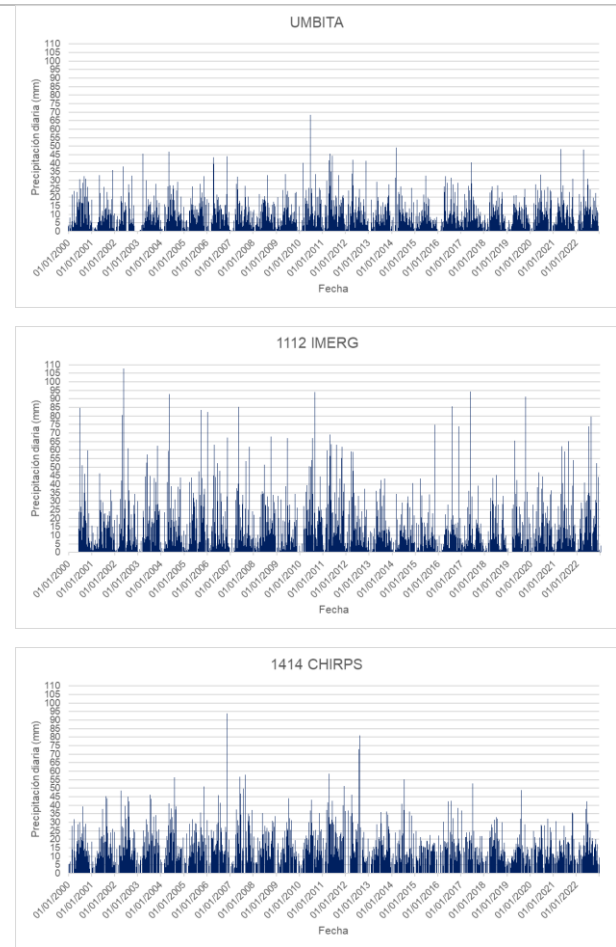


Figura 6.12. Precipitación diaria para el periodo 2000-2022, estación Umbita y pixeles correspondientes a los productos satelitales

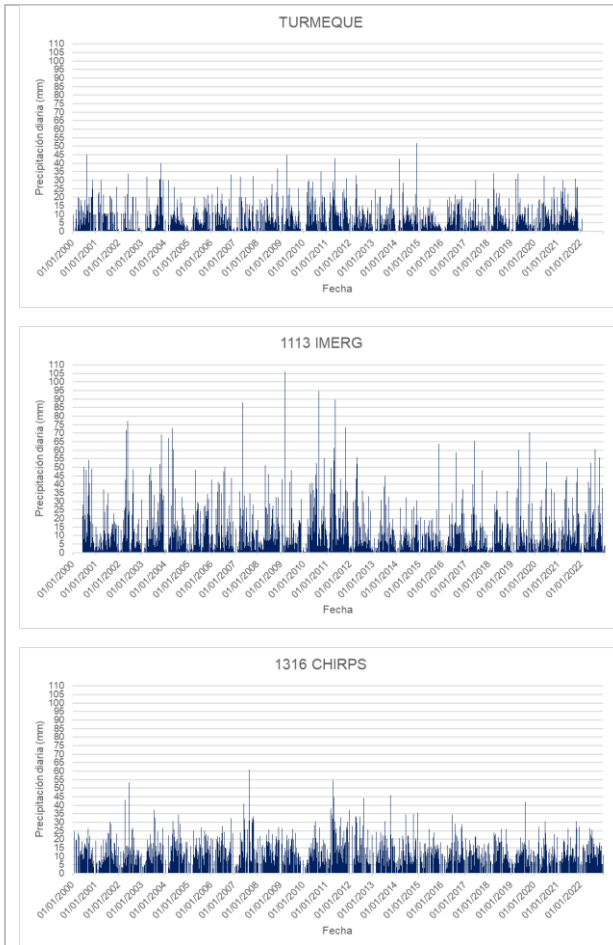


Figura 6.13. Precipitación diaria para el periodo 2000-2022, estación Turmequé y pixeles correspondientes a los productos satelitales

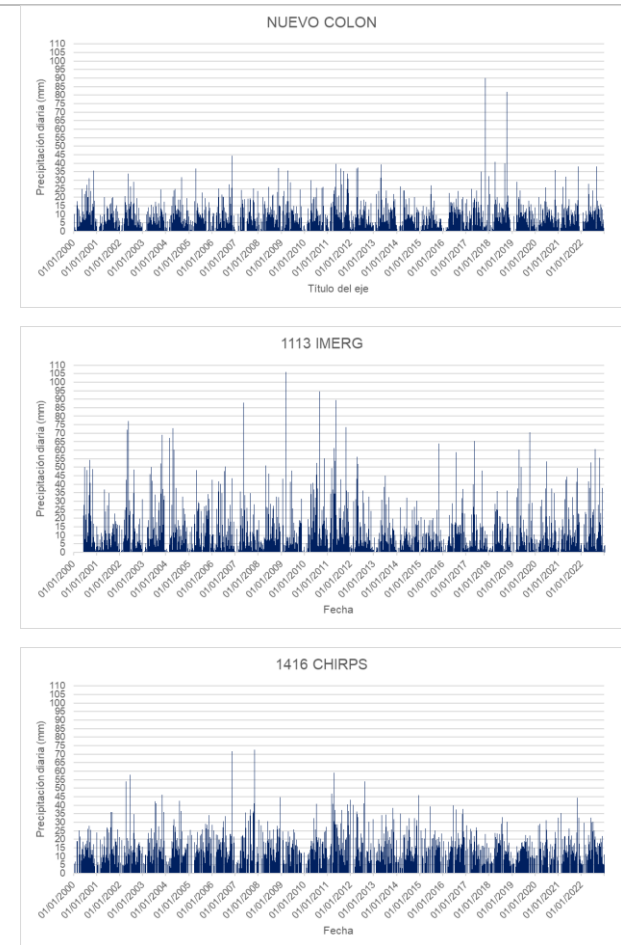


Figura 6.14. Precipitación diaria para el periodo 2000-2022, estación Nuevo Colón y pixeles correspondientes a los productos satelitales

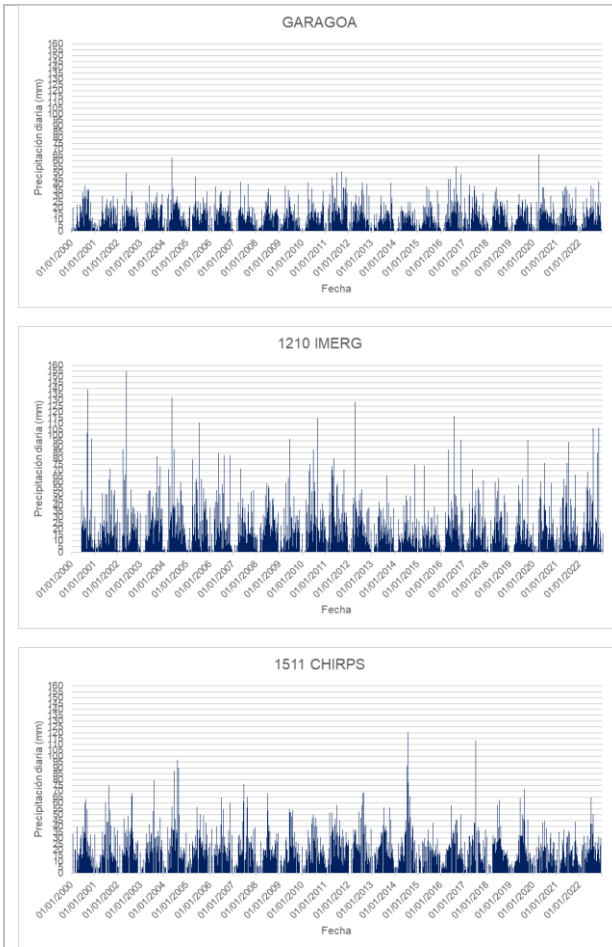


Figura 6.15. Precipitación diaria para el periodo 2000-2022, estación Garagoa y pixeles correspondientes a los productos satelitales

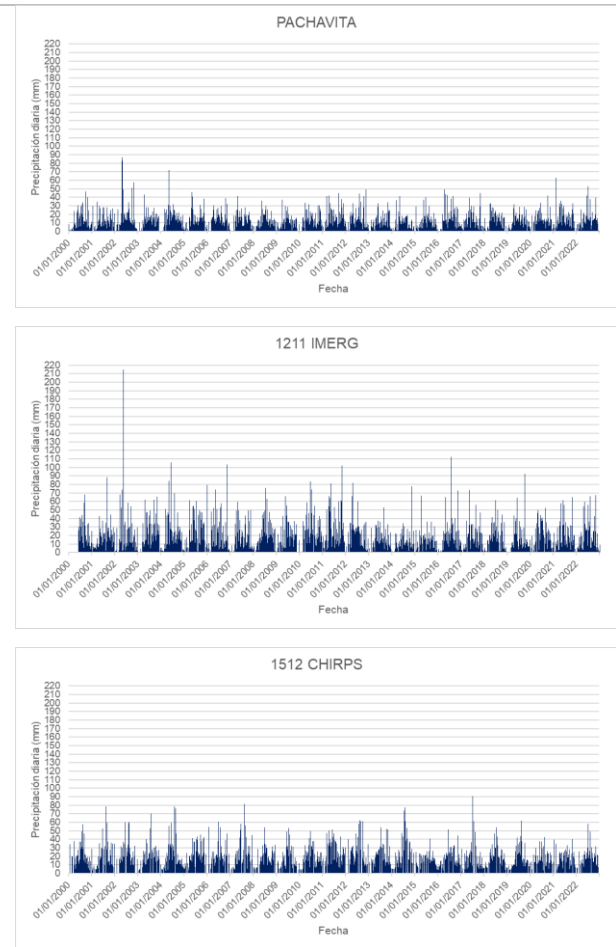


Figura 6.16. Precipitación diaria para el periodo 2000-2022, estación Pachavita y pixeles correspondientes a los productos satelitales

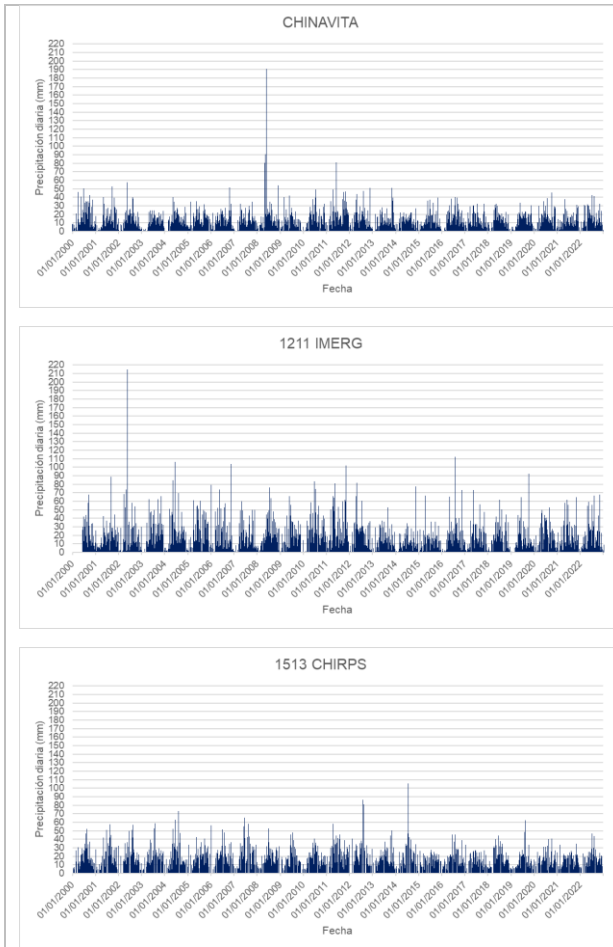


Figura 6.17. Precipitación diaria para el periodo 2000-2022, estación Chinavita y pixeles correspondientes a los productos satelitales

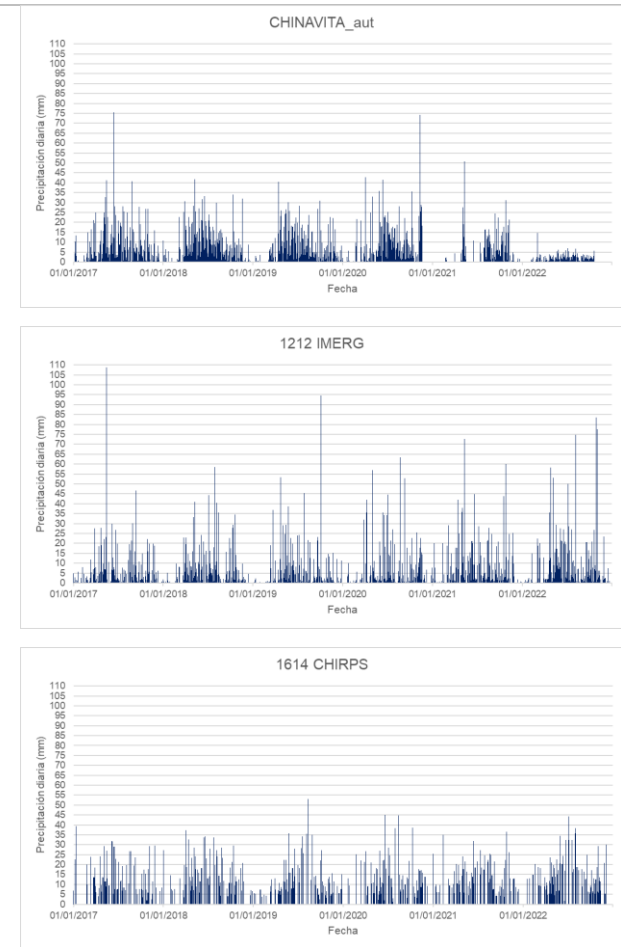


Figura 6.18. Precipitación diaria para el periodo 2000-2022, estación Chinavita aut y pixeles correspondientes a los productos satelitales

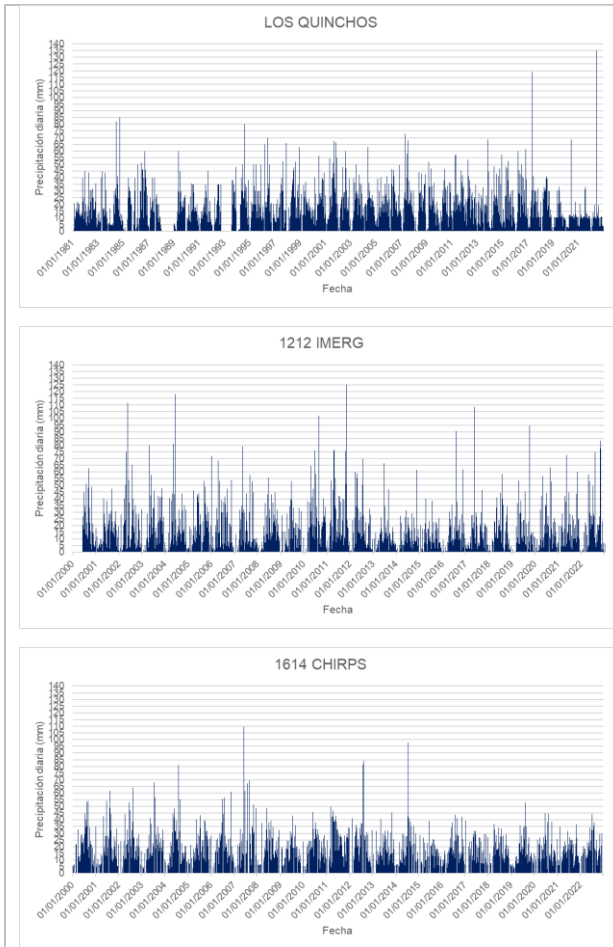


Figura 6.19. Precipitación diaria para el periodo 2000-2022, estación Los Quinchos y pixeles correspondientes a los productos satelitales

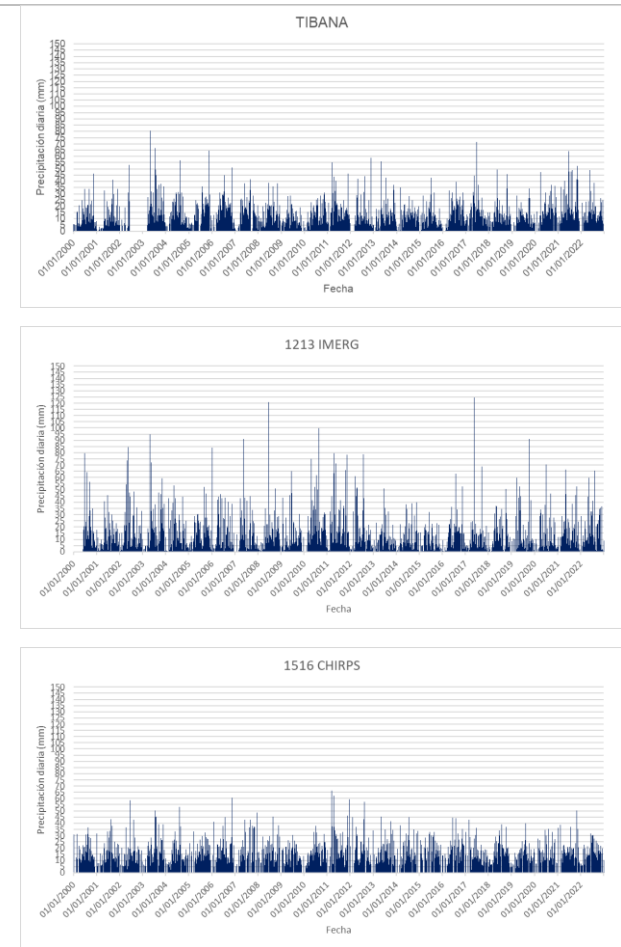


Figura 6.20. Precipitación diaria para el periodo 2000-2022, estación Tibana y pixeles correspondientes a los productos satelitales

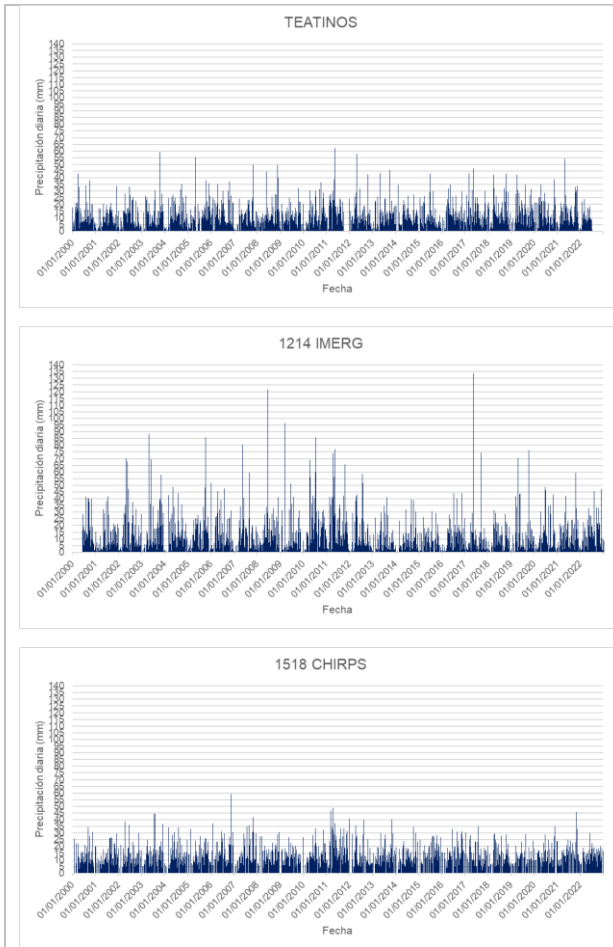


Figura 6.21. Precipitación diaria para el periodo 2000-2022, estación Teatinos y pixeles correspondientes a los productos satelitales

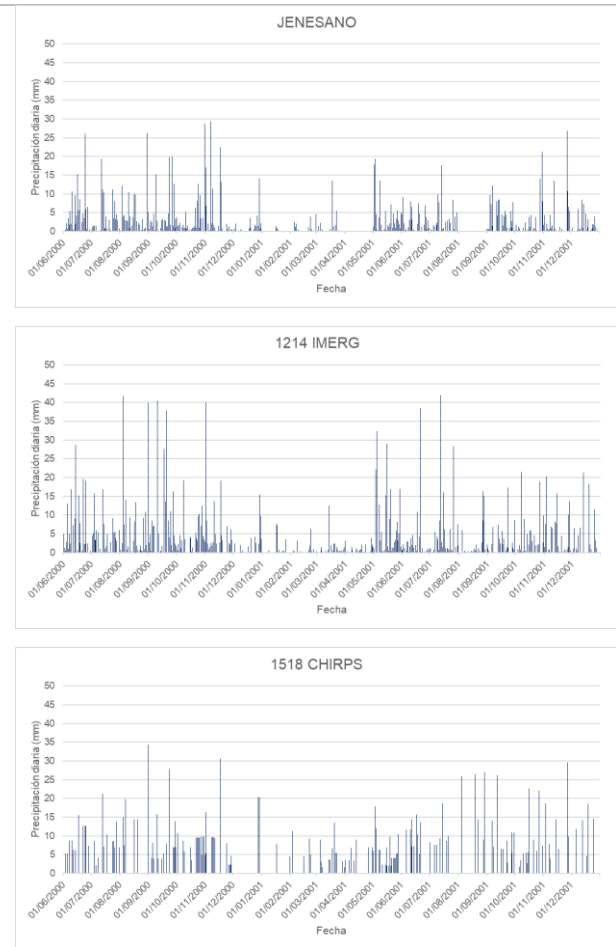


Figura 6.22. Precipitación diaria para el periodo 2000-2022, estación Jenesano y pixeles correspondientes a los productos satelitales

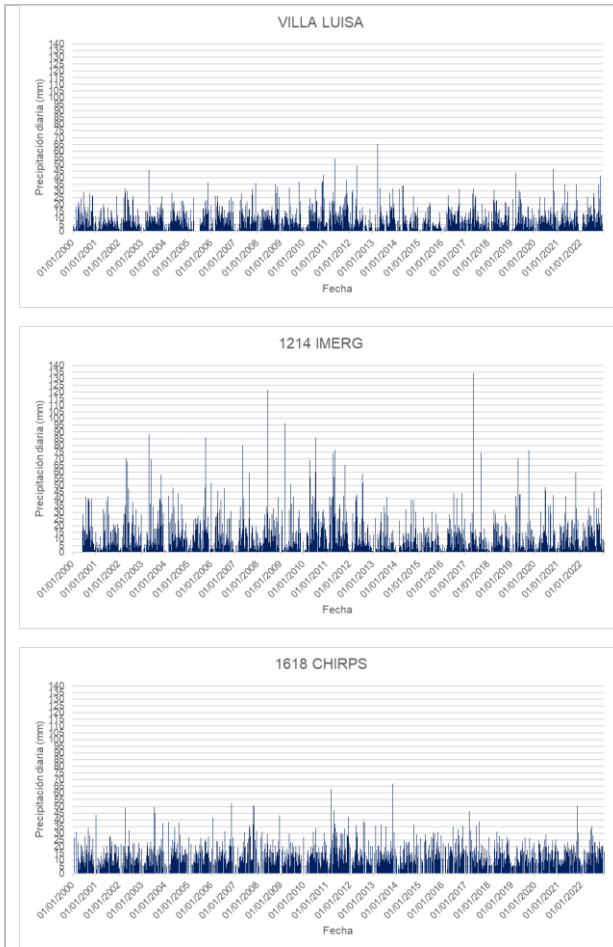


Figura 6.23. Precipitación diaria para el periodo 2000-2022, estación Villa Luisa y pixeles correspondientes a los productos satelitales

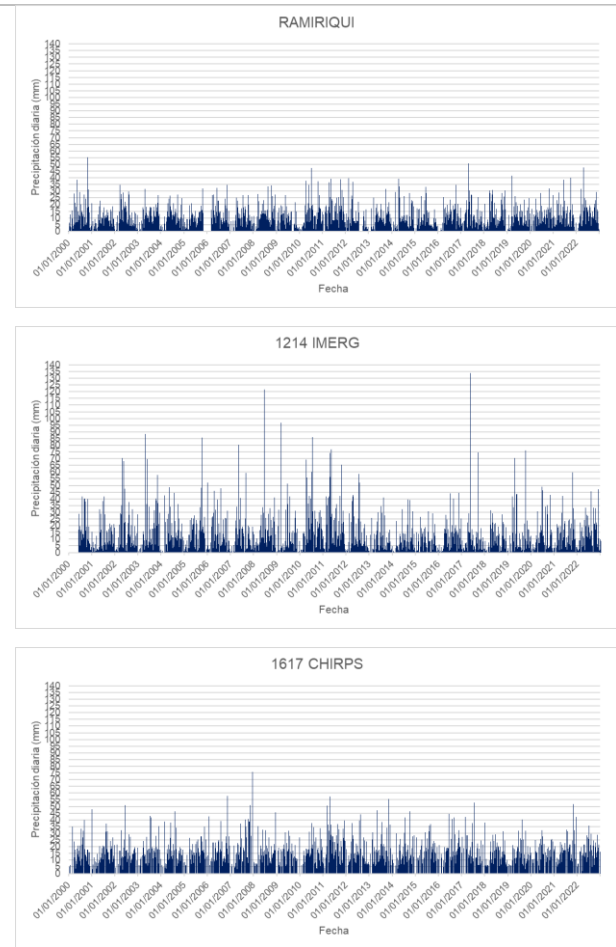


Figura 6.24. Precipitación diaria para el periodo 2000-2022, estación Ramiriquí y pixeles correspondientes a los productos satelitales

De acuerdo con las figuras anteriores, se evidencia que los datos de precipitación diaria del producto IMERG, presentan una mayor cantidad de picos, sobreestimando la precipitación tanto de las estaciones como del producto CHIRPS.

Para corroborar lo anterior, se realizó un análisis comparativo de los registros de datos de precipitación observada con los datos capturados por los productos satelitales por año para cada estación, en donde se identificaron los años de registro de la estación, los datos faltantes y los eventos con lluvia mayor a 0 mm, a 5 mm, a 10 mm y a 20 mm registrados por cada estación y por los dos productos satelitales (CHIRPS e IMERG). Con lo que fue posible identificar que en promedio:



- Con respecto a los eventos de lluvia mayor a 0 mm, CHIRPS registra menos que la estación, ya que registra aproximadamente el 46 % de los datos registrados por la estación; mientras que IMERG, registra más eventos, aproximadamente el 112 % de los eventos que registra la estación.
- Con respecto a los eventos de lluvia mayor a 5 mm, CHIRPS registra aproximadamente el 115 % de los datos registrados por la estación e IMERG, registra aproximadamente un 91 % de los eventos que registra la estación.
- Con respecto a los eventos de lluvia mayor a 10 mm, CHIRPS registra más que la estación, ya que registra aproximadamente el 140 % de los datos registrados por la estación; IMERG, registra también más eventos, aproximadamente el 114 % de los eventos que registra la estación.
- Con respecto a los eventos de lluvia mayor a 20 mm, CHIRPS registra más que la estación, ya que registra aproximadamente el 203 % de los datos registrados por la estación; IMERG, registra también más eventos, aproximadamente el 217 % de los eventos que registra la estación.

En función de lo anterior fue posible inferir que el producto CHIRPS presenta deficiencias para registrar eventos de lluvia menores a 5 mm, ya que registra poco menos de la mitad de los eventos que registra la estación, mientras que IMERG si registra estos eventos, pero los sobreestima. Con respecto a los eventos de lluvia mayores a 5 y 10 mm, CHIRPS registra una mayor cantidad de eventos que la estación y el producto satelital IMERG. Para los eventos de lluvia mayor a 20 mm ambos productos registran más del doble de eventos que registra la estación, sin embargo, IMERG mostró una sobreestimación mayor que CHIRPS.

Los eventos de lluvia registrados por año para el periodo 2000-2022 tanto en las estaciones como en los productos satelitales CHIRPS e IMERG, se presentan en el Anexo B.

Adicionalmente, a partir de la validación de los productos CHIRPS e IMERG, fue posible identificar que las estaciones que presentaron una correlación mensual menor con ambos productos, corresponden a las tres estaciones automáticas: (1) La Capilla-aut, (2) Chinavita-aut y (3) Páramo Rabanal-aut, por lo que se decidió descartar dichas estaciones en la incorporación de los datos meteorológicos a los modelos hidrológicos CEQUEAU y SWAT, esto justificado también por el corto periodo de registro que tienen estas estaciones, al haber sido instaladas en el año 2017. Dado lo anterior, en las simulaciones hidrológicas que se utilizó como entrada la precipitación observada para ambos modelos, se incluyó



únicamente la información registrada en las 13 estaciones convencionales presentes en la cuenca.

De acuerdo con los resultados de validación de los productos CHIRPS e IMERG, la modelación hidrológica en el presente estudio se realizó inicialmente con los datos de precipitación registrados por las 13 estaciones instaladas en la cuenca y posteriormente se realizó la modelación hidrológica con los datos de precipitación estimados por el producto CHIRPS, descartándose el uso de la información de precipitación del producto IMERG para las simulaciones hidrológicas.

6.2.3. Temperatura máxima y mínima

La temperatura máxima y mínima media mensual de la cuenca obtenida a partir de los indicadores agrometeorológicos desde 1979 hasta la actualidad derivados del reanálisis atmosférico del clima global (ERA5) publicados por el *Copernicus Climate Change Service* de la Unión Europea, se presenta en la Figura 6.25. La temperatura mínima media varía entre los 8.5 °C y 9.7 °C, siendo el mes de enero el que presenta la temperatura mínima más baja y los meses de abril y mayo la temperatura mínima más alta; en cuanto a la temperatura máxima media en la cuenca, esta varía de los 16.3 °C y 18 °C, siendo el mes de febrero el que presenta la temperatura más alta y el mes de julio el que presenta la temperatura máxima más baja.

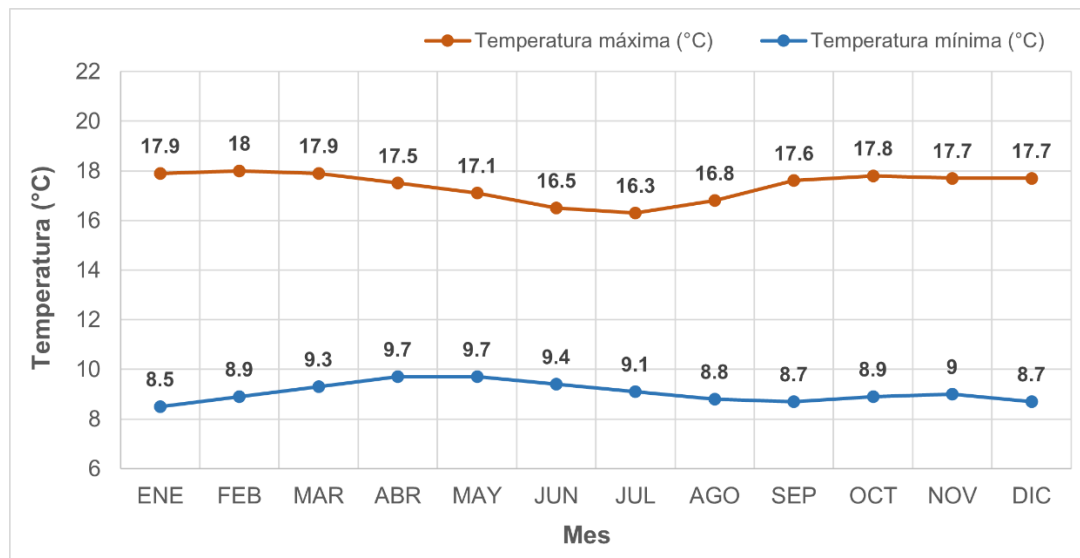


Figura 6.25. Temperatura máxima y mínima media mensual de la cuenca

En la Figura 6.26, se presenta la distribución espacial de la temperatura mínima en la cuenca y en la Figura 6.27, se presenta la distribución espacial de la temperatura máxima en la cuenca, a partir de los datos de temperatura de los 24 pixeles del producto ERA5, para ambos casos se evidencia que en la parte baja de la cuenca se presentan las temperaturas más altas, mientras que en la parte alta de la cuenca se presentan las temperaturas más bajas.

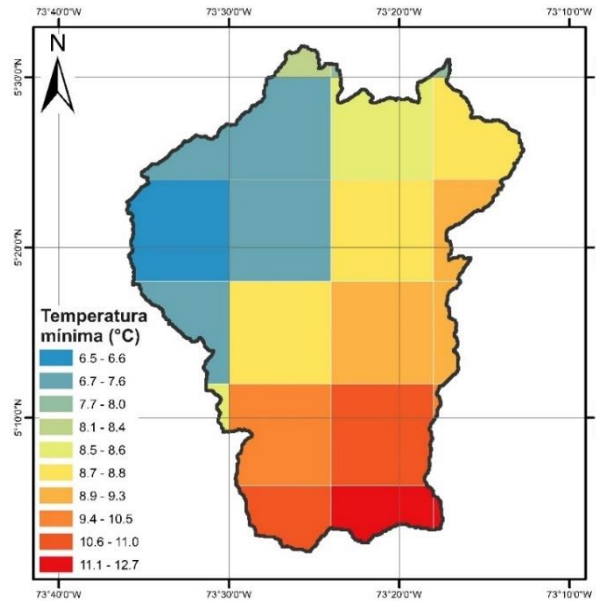


Figura 6.26. Distribución espacial de la temperatura mínima en la cuenca

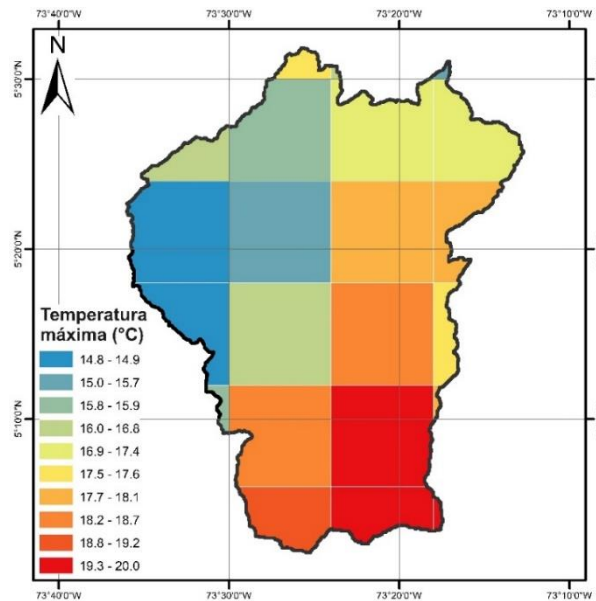


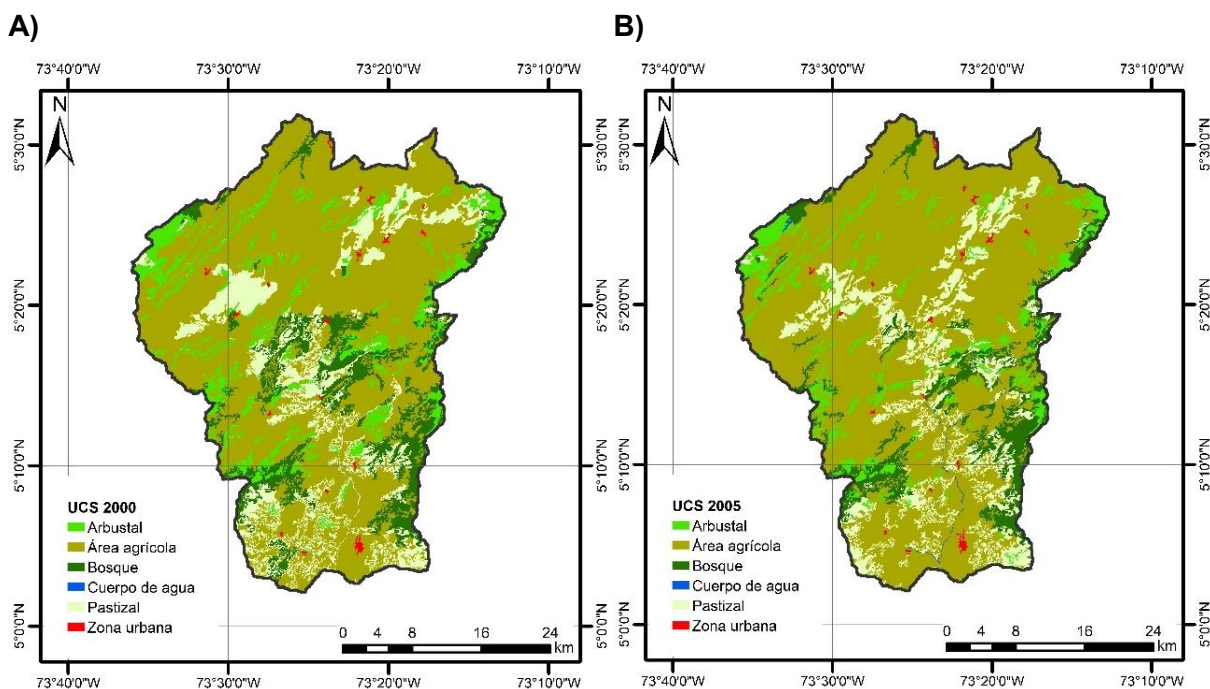
Figura 6.27. Distribución espacial de la temperatura máxima en la cuenca

6.3. Uso y cobertura del suelo (UCS)

En esta sección, se presentan los resultados de la obtención de mapas históricos del uso y cobertura del suelo, el análisis de cambios de dichos mapas y la proyección futura de cambio de uso y cobertura del suelo.

6.3.1. Mapas históricos y actuales del uso y cobertura del suelo

Los mapas que fueron analizados con el fin de homogenizar la información y realizar los análisis de cambio de uso y cobertura del suelo, para seleccionar los mapas de referencia y de cambio necesarios en la proyección del escenario de uso y cobertura del suelo futuro, corresponden a los mapas de los siguientes periodos: A) 2000-2002 (2000); B) 2005-2009 (2005), C) 2010-2012 (2010) y D) 2018, los cuales se presentan en la Figura 6.28.



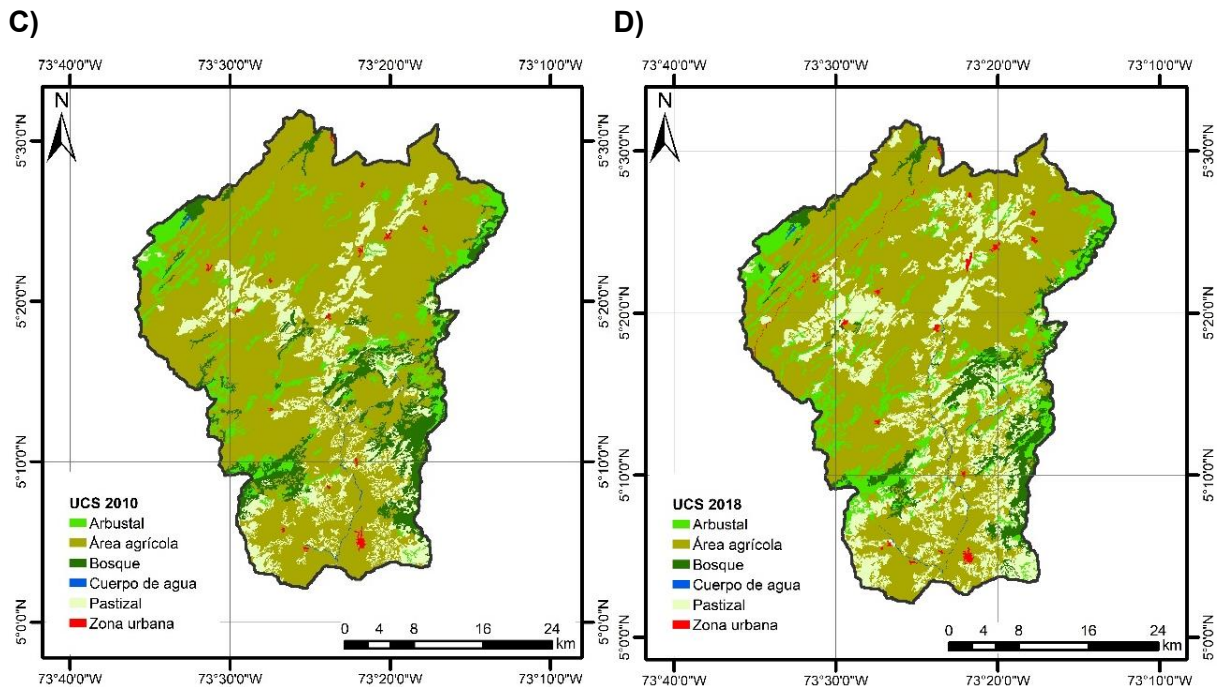


Figura 6.28. Mapas históricos y actuales del uso y cobertura del suelo. A) UCS - año 2000, B) UCS - año 2005, C) UCS - año 2010 y D) UCS - año 2018

En la Tabla 6-3 se presentan las áreas que ocupan cada una de las clases de UCS en la cuenca, para los mapas analizados y en la Figura 6.29, se presenta el porcentaje correspondiente a estas coberturas en la cuenca.

Tabla 6-3. Áreas de los usos/coberturas del suelo de los diferentes periodos

Uso/cobertura del suelo	Área (km ²)			
	2000	2005	2010	2018
Arbustal	145.45	117.23	119	157.58
Área agrícola	901.84	969.63	979.43	864.26
Bosque	164.65	131.1	126.47	89.74
Cuerpo de agua	2.93	2.91	2.8	3.21
Pastizal	199.51	193.22	187.08	297.37
Zona urbana	5.44	5.73	5.04	7.66

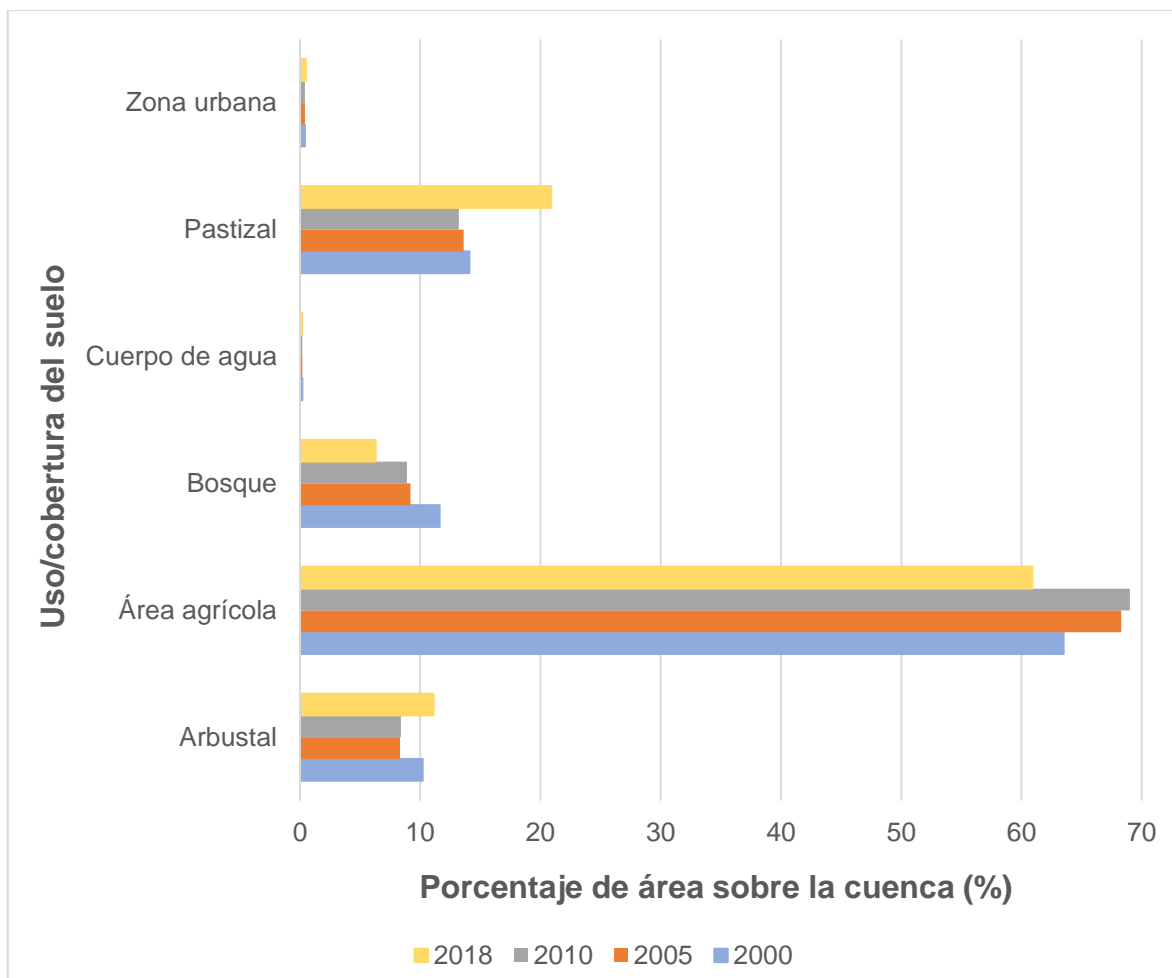


Figura 6.29. Áreas en porcentaje de las clases de uso/cobertura del suelo de los diferentes periodos en la cuenca

De la figura anterior, se observa que la cobertura de área agrícola es la que a lo largo de la historia ha predominado en el territorio de la cuenca, siempre ocupando más del 60% de esta, esta cobertura mostró un incremento del periodo 2000 a 2010, sin embargo, disminuyó al periodo 2018, sin dejar de ser la cobertura más representativa en la cuenca. La cobertura de pastizales es la siguiente predominante en la cuenca y ha mostrado un incremento importante en los últimos años. La cobertura de bosques, ha presentado una notable disminución en todos los periodos. La cobertura de arbustal presentó una disminución de los años 2000 a 2010, sin embargo, para el año 2018, presentó un incremento superando incluso el porcentaje de cobertura del año 2000. Las zonas urbanas han presentado un comportamiento variable a lo largo de los años en cuanto a su ocupación en el territorio, debido a que del periodo 2000 a 2005 presentó incremento, del periodo 2005 a 2010 presentó decremento y del año 2010 al 2018 presentó nuevamente un incremento.

6.3.2. Análisis de cambios del uso y cobertura del suelo en la cuenca

A partir de la observación y análisis de los cambios presentados en los cuatro mapas anteriores, se seleccionaron los mapas de los años 2000 y 2018 para realizar el análisis detallado de cambios del uso y cobertura del suelo en la cuenca.

En las Tabla 6-4 y Tabla 6-5 se presenta el área que ocupaba cada una de las coberturas del suelo en la cuenca para el año 2000 y 2018, respectivamente.

Tabla 6-4. Área de las coberturas del suelo en la cuenca año 2000

Año 2000	
UCS	Área (km ²)
Arbustal	145.45
Área agrícola	901.84
Bosque	164.65
Cuerpo de agua	2.93
Pastizal	199.51
Zona urbana	5.44

Tabla 6-5. Área de las coberturas del suelo en la cuenca año 2018

Año 2018	
UCS	Área (km ²)
Arbustal	157.58
Área agrícola	864.26
Bosque	89.74
Cuerpo de agua	3.21
Pastizal	297.37
Zona urbana	7.66

En las Figura 6.30 y Figura 6.31, se representa gráficamente el porcentaje de área que ocupaba cada una de las coberturas del suelo en la cuenca para el año 2000 y 2018, respectivamente.

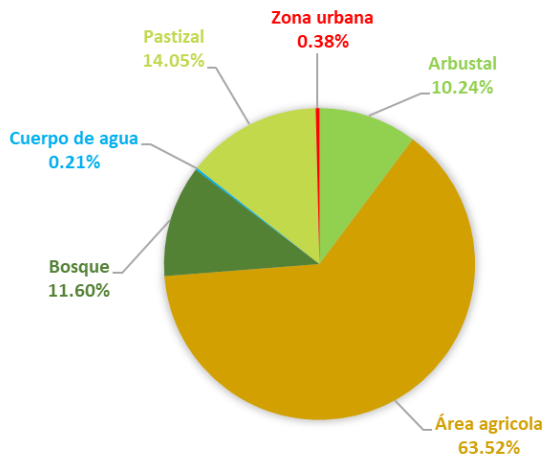


Figura 6.30. Porcentaje de área de las coberturas del suelo en la cuenca, año 2000

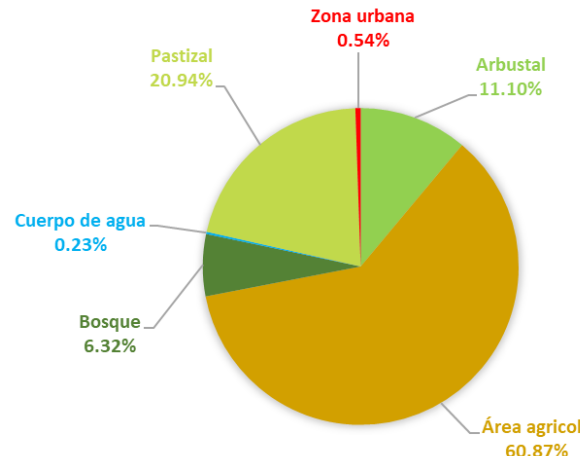


Figura 6.31. Porcentaje de área de las coberturas del suelo en la cuenca, año 2018



De acuerdo con la información anterior, del año 2000 al 2018 en la cuenca, se presentaron cambios muy representativos en la cobertura pastizal, al presentar un aumento del 49.1 %, la zona urbana también presentó un aumento del 42.6 % y la cobertura arbustal presentó un leve incremento del 8.3 %; las coberturas que disminuyeron fueron los bosques en un 45.5 % y el área agrícola con un decremento de 4.2 %.

En la Tabla 6-6 y Tabla 6-7, se presentan las ganancias y pérdidas entre los años 2000 y 2018 y el cambio neto entre los años 2000 y 2018 por cobertura, respectivamente.

Tabla 6-6. Ganancias y pérdidas entre 2000 y 2018

Ganancias y pérdidas entre 2000 y 2018 (km²)		
Arbustal	-62.34	74.47
Área agrícola	-216.22	178.64
Bosque	-99.37	24.46
Cuerpo de agua	-1.48	1.76
Pastizal	-92.46	190.32
Zona urbana	-1.7	3.92

Tabla 6-7. Cambio neto entre 2000 y 2018

Cambio neto por categoría (km²)	
Arbustal	12.13
Área agrícola	-37.58
Bosque	-74.91
Cuerpo de agua	0.28
Pastizal	97.86
Zona urbana	2.22

En cuanto a las contribuciones al cambio neto por cada una de las seis categorías de uso y cobertura del suelo, durante el periodo 2000-2018, la cobertura de bosque fue la que más contribuyó a la cobertura arbustal, puesto que 18.25 km² de cobertura de bosque se transformaron en cobertura arbustal, así mismo, la cobertura de bosque fue la que más contribuyó en la cobertura de área agrícola, al transformarse 37.18 km² de bosque en áreas agrícolas. Para el caso de las coberturas de pastizales y zonas urbanas, el área agrícola fue la que más contribuyó, al transformarse 76.75 km² de área agrícola en pastizal y 2.13 km² de área agrícola en zona urbana. Lo anterior se presenta en detalle en la Figura 6.32 y en la Tabla 6-8, en donde se representa en valores negativos la cantidad de área que perdió cada cobertura y en valores positivos la cantidad de área que ganó, por cada categoría de UCS.

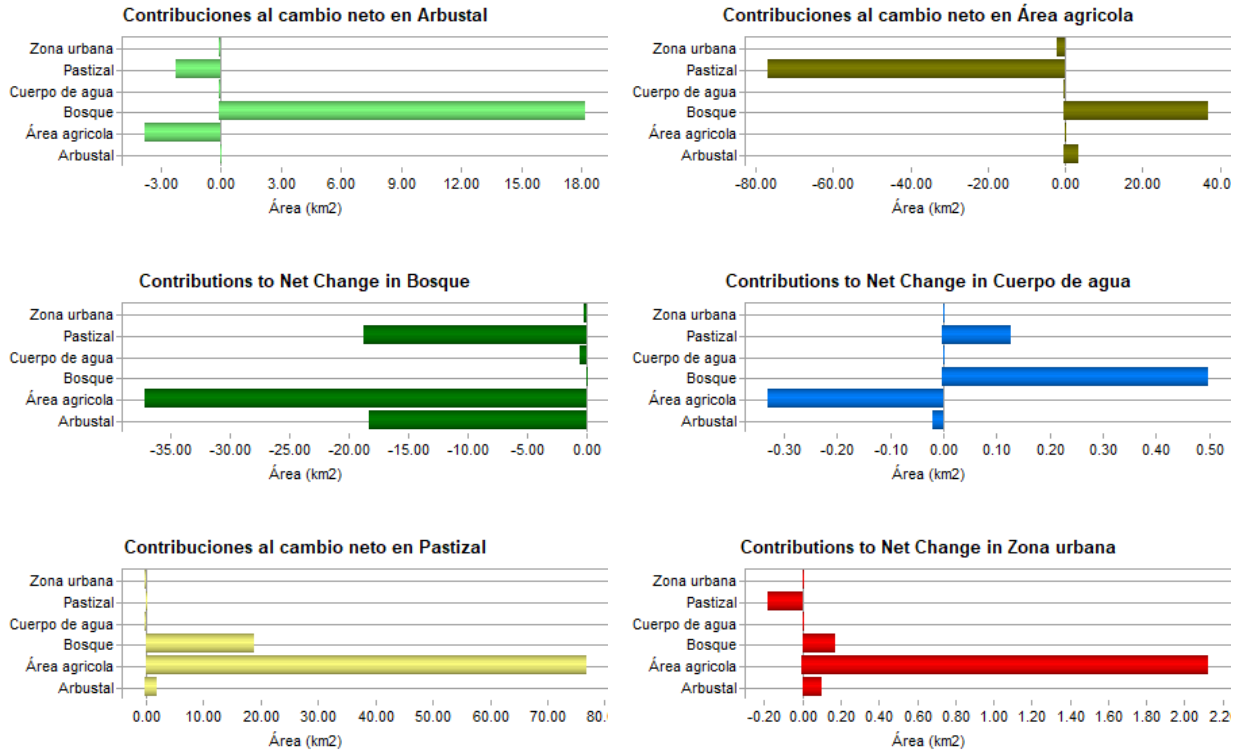


Figura 6.32. Contribuciones al cambio neto por categoría

Tabla 6-8. Contribuciones al cambio neto por categoría (km²)

Contribuciones al cambio neto por categoría (km ²)					
Arbustal	0	Arbustal	3.79	Arbustal	-18.25
Área agrícola	-3.79	Área agrícola	0	Área agrícola	-37.18
Bosque	18.25	Bosque	37.18	Bosque	0
Cuerpo de agua	0.02	Cuerpo de agua	0.33	Cuerpo de agua	-0.5
Pastizal	-2.25	Pastizal	-76.75	Pastizal	-18.81
Zona urbana	-0.1	Zona urbana	-2.13	Zona urbana	-0.17
	12.13		-37.58		-74.91
Arbustal	-0.02	Arbustal	2.25	Arbustal	0.1
Área agrícola	-0.33	Área agrícola	76.75	Área agrícola	2.13
Bosque	0.5	Bosque	18.81	Bosque	0.17
Cuerpo de agua	0	Cuerpo de agua	-0.13	Cuerpo de agua	0
Pastizal	0.13	Pastizal	0	Pastizal	-0.18
Zona urbana	0	Zona urbana	0.18	Zona urbana	0
	0.28		97.86		2.22

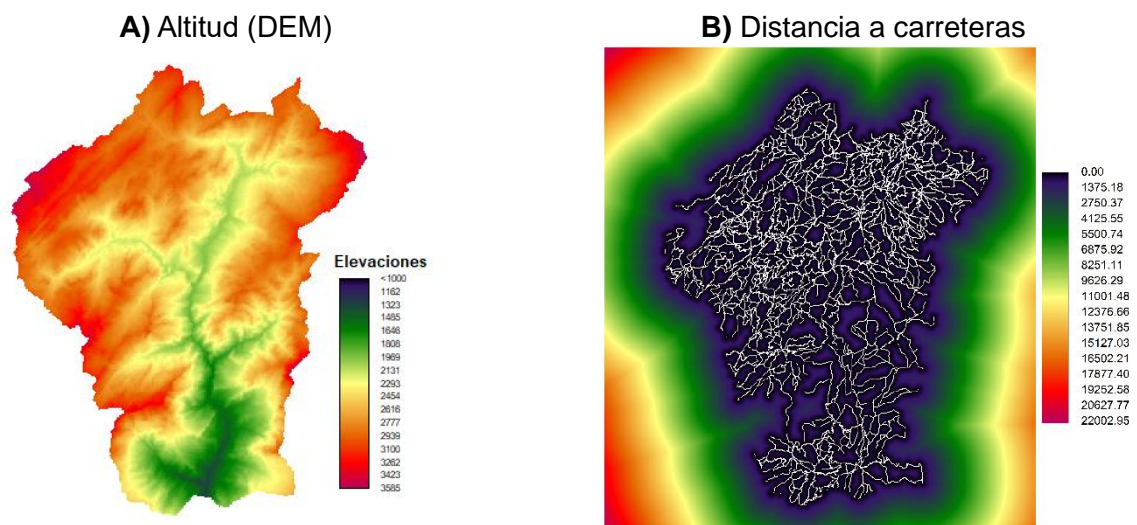
6.3.3. Escenario futuro de cambio de uso y cobertura del suelo

Para la proyección del escenario futuro de cambio de uso y cobertura del suelo (año 2050), se incluyeron en el modelo LCM las transiciones y variables explicativas presentadas en la Tabla 6-9.

Tabla 6-9. Transiciones y variables explicativas empleadas en la proyección del escenario futuro de cambio de uso y cobertura del suelo

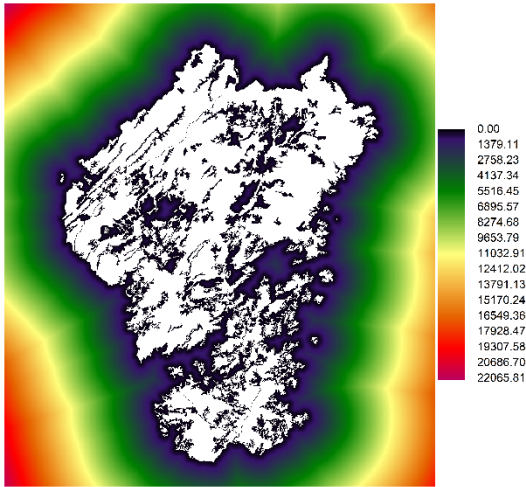
Transiciones	Variables explicativas
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Arbustal a área agrícola ✓ Área agrícola a arbustal ✓ Área agrícola a pastizal ✓ Área agrícola a zona urbana ✓ Bosque a área agrícola 	<ul style="list-style-type: none"> A) Altitud (DEM) B) Distancia a carreteras C) Distancia a zonas agrícolas D) Cambio de Área agrícola a Zona urbana E) Todos los cambios de cobertura a Pastizal F) Todos los cambios de cobertura a Área agrícola G) Precipitación media anual H) Evidence likelihood de todos los cambios de cobertura a Área agrícola I) Evidence likelihood de todos los cambios de cobertura a Pastizal J) Evidence likelihood de todos los cambios de cobertura a Zona Urbana K) Distancia a centros poblados

En la Figura 6.33 se presentan las ocho variables explicativas empleadas en la proyección del escenario futuro de cambio de uso y cobertura del suelo.

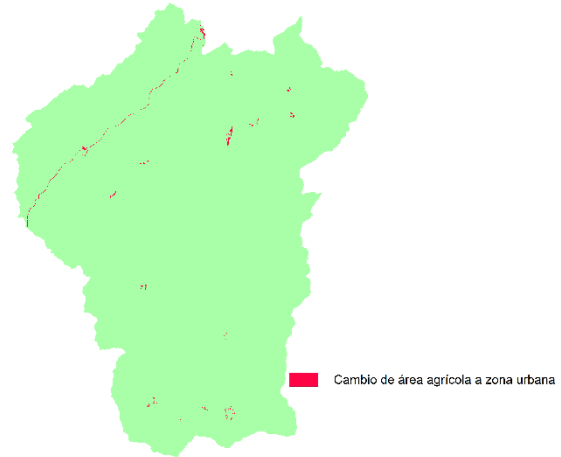




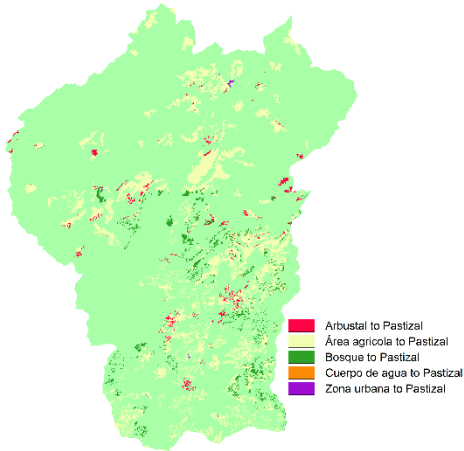
C) Distancia a zonas agrícolas



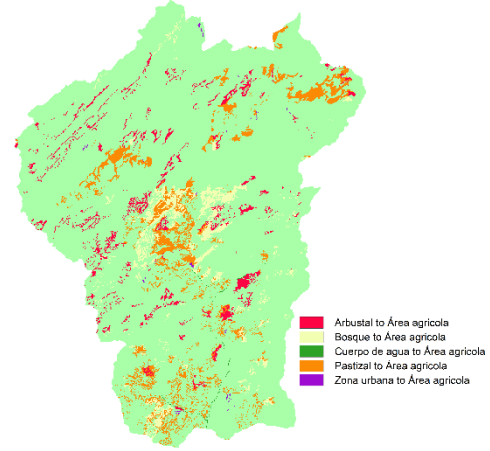
D) Cambio de Área agrícola a Zona urbana



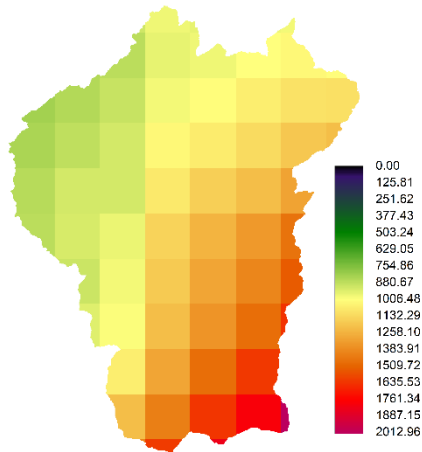
E) Todos los cambios de cobertura a Pastizal



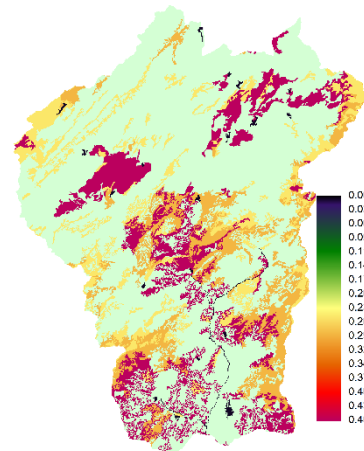
F) Todos los cambios de cobertura a Área agrícola



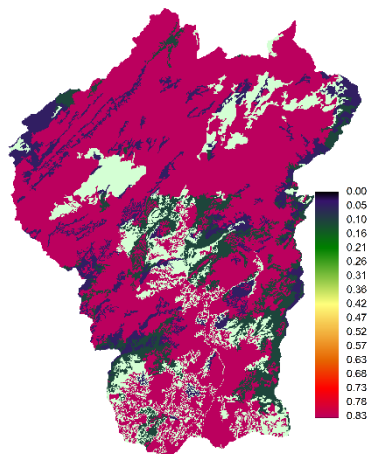
G) Precipitación media anual



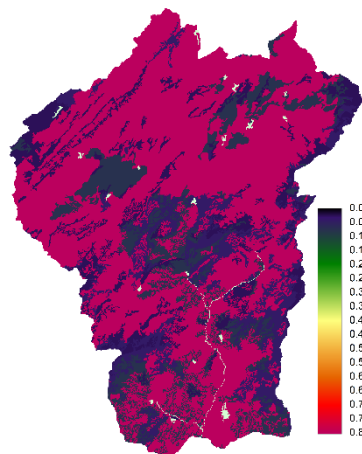
H) Evidence likelihood de todos los cambios de cobertura a Área agrícola



I) *Evidence likelihood* de todos los cambios de cobertura a Pastizal



J) *Evidence likelihood* de todos los cambios de cobertura a Zona Urbana



K) Distancia a centros poblados

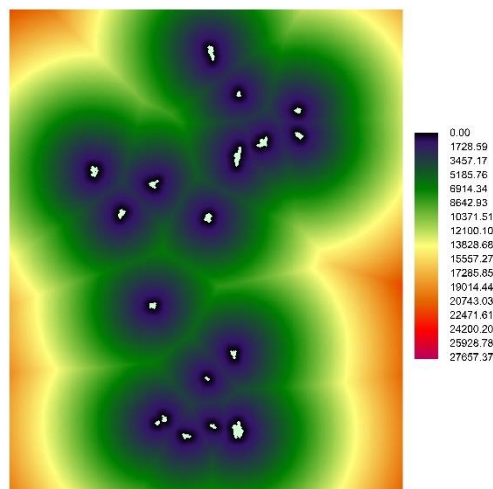


Figura 6.33. Variables explicativas empleadas en el modelo de predicción de cambios

Tras correr el modelo de transiciones potenciales de red neuronal de perceptrón multicapa (MLP) con las entradas (transiciones y variables explicativas) anteriormente presentadas, se obtuvo una tasa de precisión de 94.2 %, lo que representa un resultado satisfactorio. La variable explicativa más influyente fue “*Evidence likelihood* de todos los cambios de cobertura a Pastizal”, mientras que la menos influyente fue la “Distancia a carreteras”. En la Figura 6.34, se presenta el mapa de uso y cobertura del suelo proyectado al año 2050.

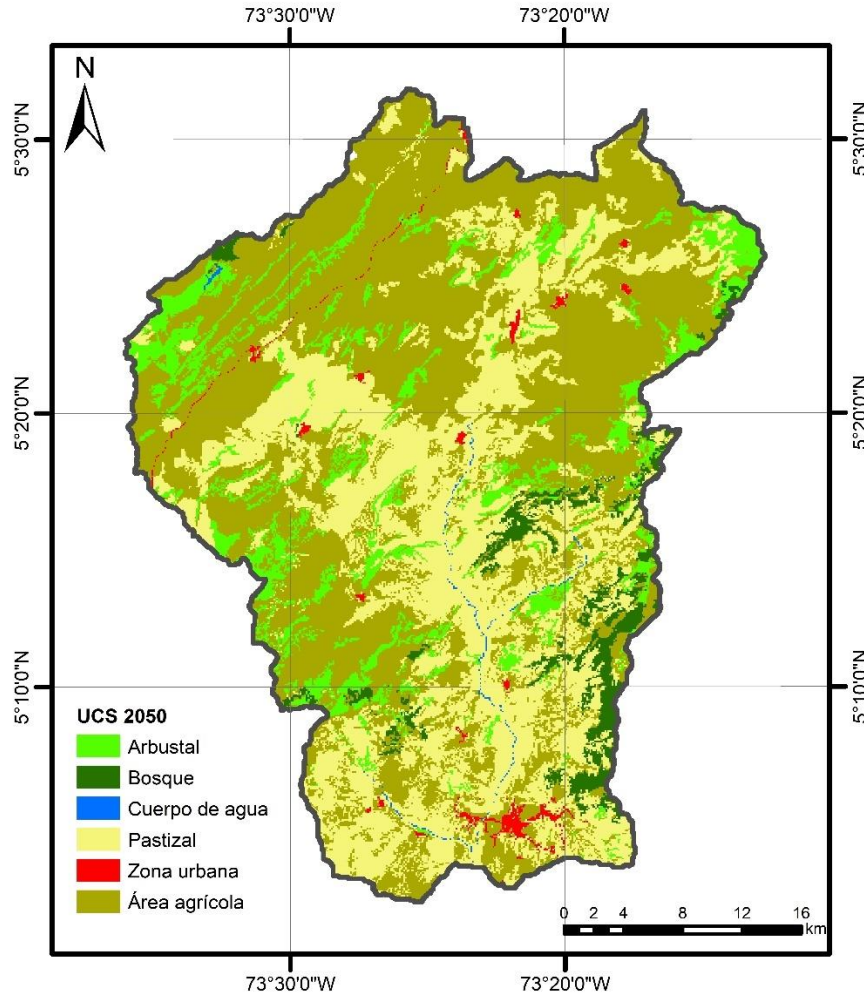


Figura 6.34. Uso y cobertura del suelo proyectado al año 2050

De acuerdo con la figura anterior, con respecto al año 2018, para el año 2050 la cobertura de pastizal presentará un aumento del 65.1 % y las zonas urbanas incrementarán un 58.4 %, las coberturas que presentarán una disminución serán: los bosques, con un decremento del 43.1 %, las áreas agrícolas que presentarán una disminución del 17.1 % y la cobertura arbustal, que disminuirá en un 7.2 %.

En la Figura 6.35 se presenta los mapas del año 2000, 2018 y el mapa resultante al año 2050 y en la Tabla 6-10, se presentan las áreas en km² y % ocupadas por cada clase de uso y cobertura de suelo en los años A) 2000, B) 2018 y C) 2050.

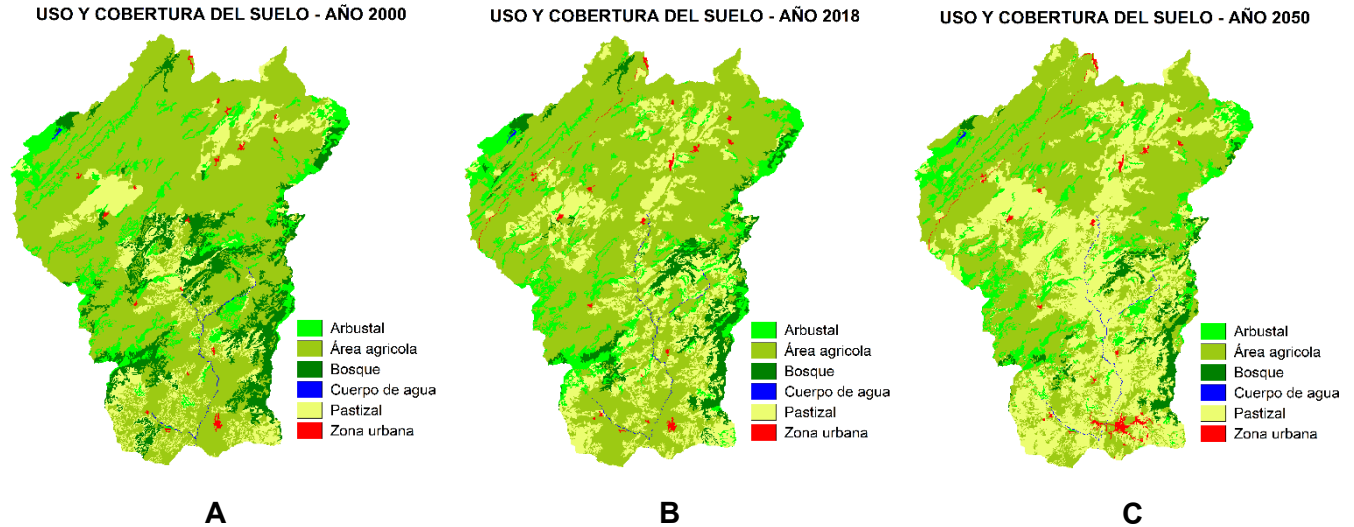


Figura 6.35. Mapas de uso y cobertura del suelo años A) 2000, B) 2018 y C) 2050

Tabla 6-10. Comparación de áreas de los mapas de UCS años 2000, 2018 y 2050

Uso/cobertura del suelo	2000		2018		2050	
	km ²	%	km ²	%	km ²	%
Arbustal	145.5	10.2	157.6	11.1	146.31	10.3
Área agrícola	901.8	63.5	864.3	60.9	716.09	50.4
Bosque	164.7	11.6	89.7	6.3	51.0	3.6
Cuerpo de agua	2.9	0.2	3.2	0.2	3.2	0.2
Pastizal	199.5	14.1	297.4	20.9	491	34.6
Zona urbana	5.4	0.4	7.7	0.5	12.2	0.9

A partir de los resultados obtenidos en el análisis de cambio de uso y cobertura del suelo, en la Tabla 6-11 se presenta en resumen el cambio porcentual de cada categoría de UCS para los periodos 2000-2018 y 2018-2050. Los valores con signo positivo indican un incremento de la cobertura en la cuenca, mientras que los valores con signo negativo indican una disminución de la cobertura en la cuenca.

Tabla 6-11. Cambio porcentual de UCS para los periodos 2000-2018 y 2018-2050

Uso/cobertura del suelo	Periodo 2000-2018	Periodo 2018-2050
Arbustal	8.3 %	-7.2 %
Área agrícola	-4.2 %	-17.1 %
Bosque	-45.5 %	-43.1 %
Cuerpo de agua	10.3 %	0.0 %
Pastizal	49.1 %	65.1 %
Zona urbana	42.6 %	58.4 %

6.3.3.1. Validación del modelo de predicción de uso y cobertura del suelo

Para la validación del modelo de predicción de cambio de UCS, se generó la imagen de uso y cobertura del suelo al año 2023 (Figura 6.36) y se validó contra la imagen de puntos aleatorios presentados en Figura 6.37.

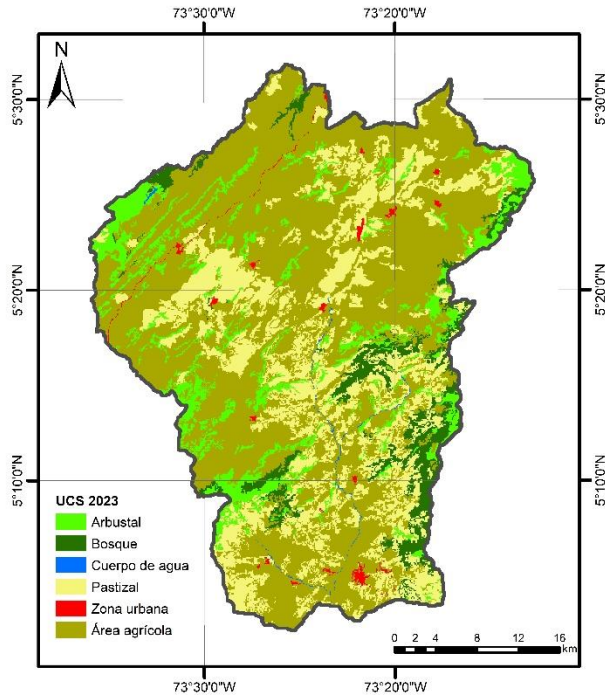


Figura 6.36. Uso y cobertura del suelo proyectado al año 2023

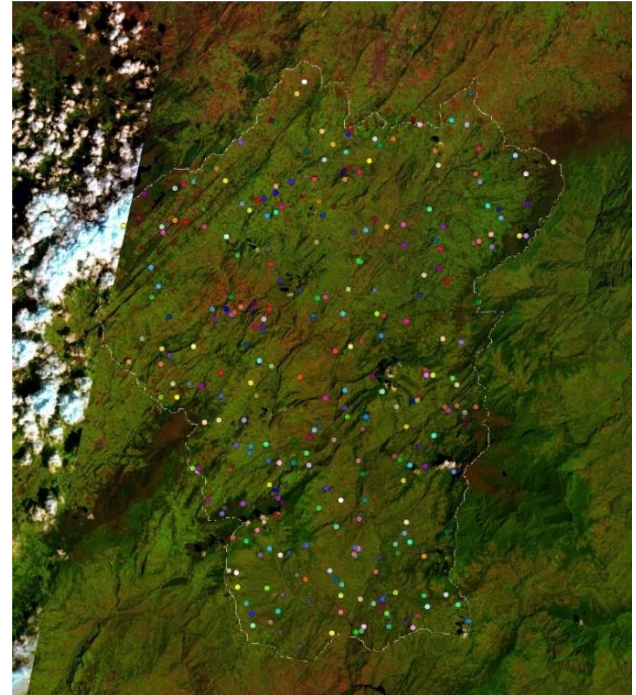


Figura 6.37. Puntos aleatorios sobre imagen satelital del año 2023

La validación del mapa de uso y cobertura del suelo proyectado al año 2023, en términos de índice de Kappa fue de 0.83 (satisfactorio).

6.4. Modelación hidrológica con CEQUEAU

En este numeral se presentan los resultados obtenidos en la modelación hidrológica con CEQUEAU. En la Figura 6.38 y Figura 6.39, se muestra el modelo digital de elevación (DEM) y el mapa de cobertura de suelo utilizados para generar la malla en el módulo del *software* TerrSet para ejecutar el modelo CEQUEAU:

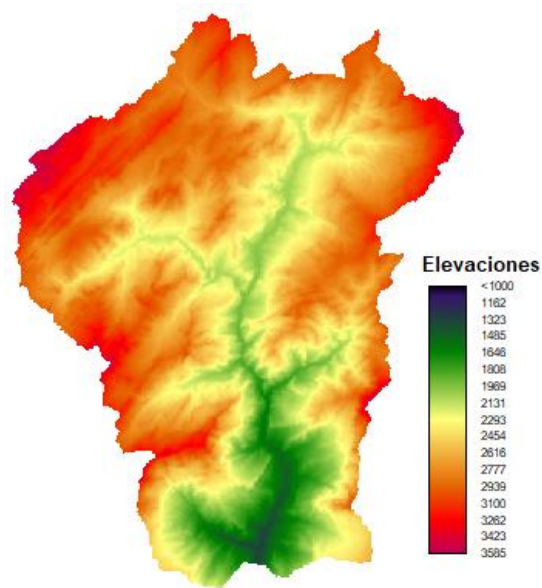


Figura 6.38. Modelo Digital de Elevación

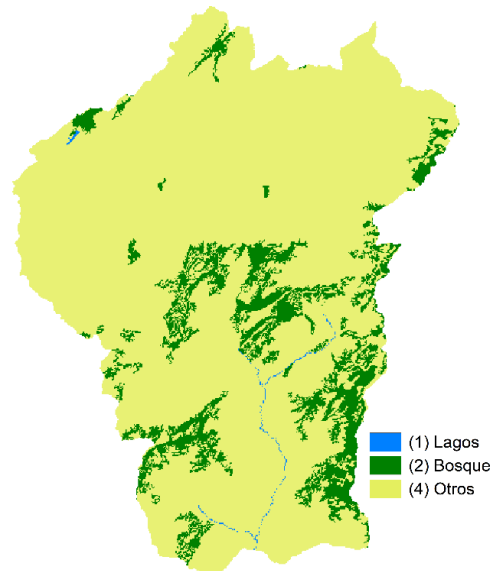


Figura 6.39. Cobertura de suelo utilizada en CEQUEAU (año 2000)

La generación de las mallas para la modelación en CEQUEAU de los datos de precipitación observados y los obtenidos del producto CHIRPS, se realizó con una dimensión de celda de 5.5x5.5 km (Figura 6.40).

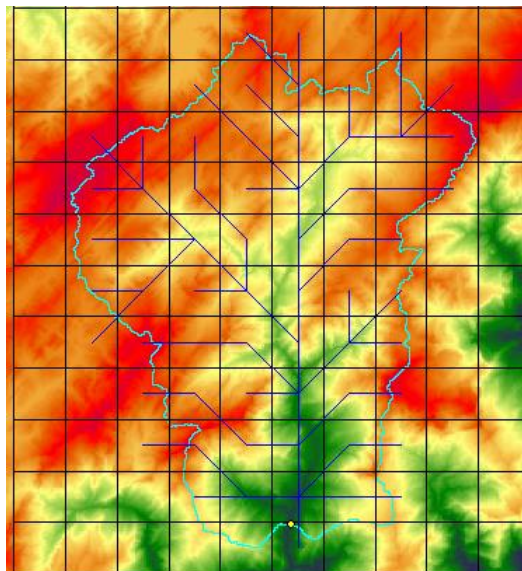


Figura 6.40. Malla generada para modelación en CEQUEAU de datos de precipitación observados y de CHIRPS

6.4.1. Simulaciones con parámetros iniciales en CEQUEAU

En este numeral se presentan los resultados obtenidos de las primeras simulaciones en CEQUEAU para cada uno de los proyectos: (1) Simulación con datos de precipitación observada y (2) Simulación con datos de precipitación CHIRPS.

Teniendo en cuenta que el modelo SWAT requiere de mínimo dos años de “calentamiento” para ejecutar las simulaciones, los resultados de modelación hidrológica, tanto para el modelo CEQUEAU como para SWAT, se presentan para un periodo de 40 años, del año 1983 al año 2022.

Las simulaciones iniciales, es decir sin parámetros calibrados, se corrieron con el archivo fisiográfico correspondiente al uso y cobertura del suelo del año 2000.

6.4.1.1. Simulación inicial con datos de precipitación observados

En la Figura 6.41, se presenta la referencia de cuadros enteros empleados en la modelación con datos de precipitación observados y temperatura del producto ERA5, en total 64 cuadros intersecan con la cuenca y en 13 de estos se encuentran ubicadas las estaciones meteorológicas.

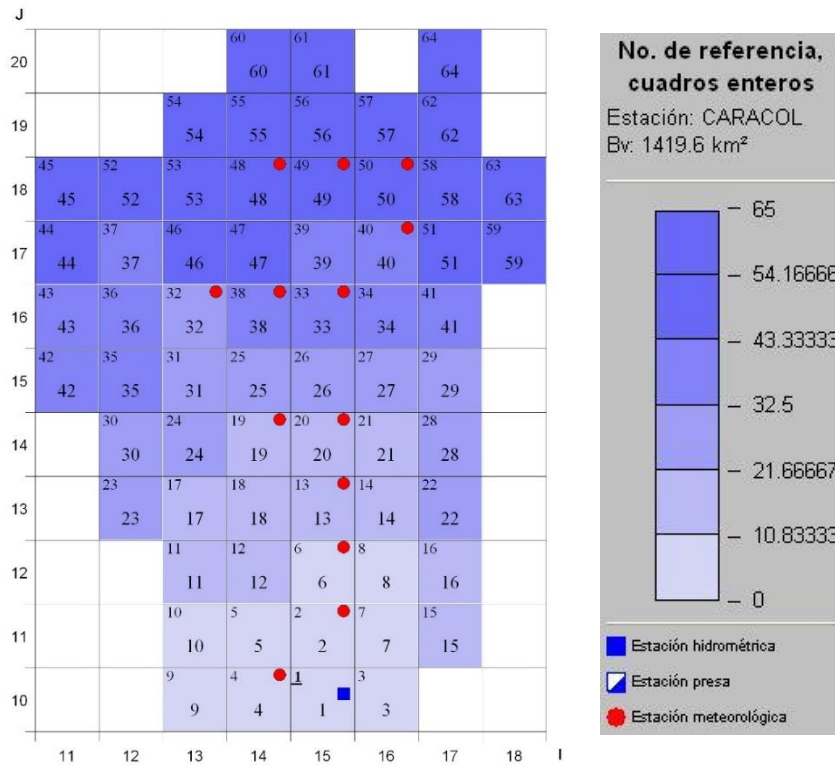


Figura 6.41. Referencia de cuadros enteros - Modelación con precipitación observada

En la Tabla 6-12, se presenta el caudal medio diario interanual observado y el simulado con CEQUEAU para el periodo 1983-2022. En la Figura 6.42, se representan gráficamente los caudales mensuales observados y simulados con CEQUEAU, también para el periodo 1983-2022, de esta simulación inicial se obtuvo un NSE = 0.56, calificado como satisfactorio de acuerdo con Moriasi et al. (2015). De manera general el caudal simulado presenta un comportamiento similar al observado, en cuanto a la representación de meses con menor y mayor caudal, sin embargo, en la mayoría de años el caudal simulado sobreestima el observado, a excepción de algunos años caudalosos como 1986, 1989, 1994, 1997, 2003, 2004, 2009 y 2017, en donde el caudal observado es mayor que el simulado.

Tabla 6-12. Caudal medio diario interanual observado y simulado con CEQUEAU (1983-2022) - Modelación con datos de precipitación observada

Caudal observado (m ³ /s)	Caudal simulado (m ³ /s)
25.99	36.97

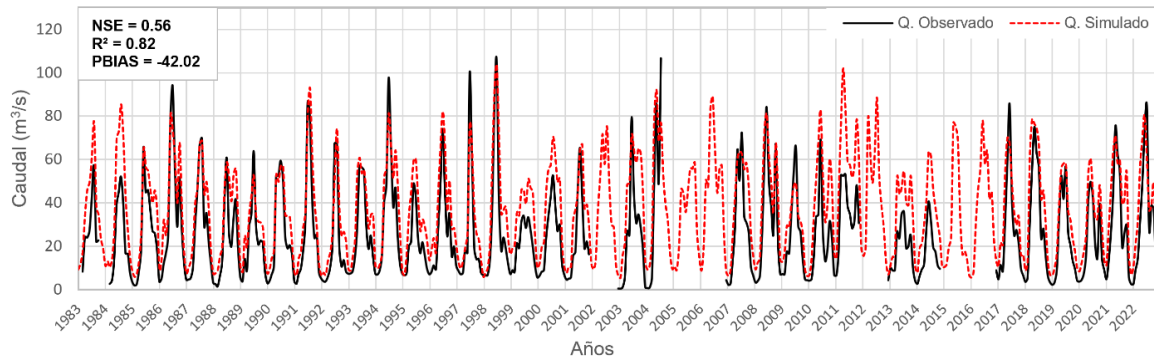


Figura 6.42. Hidrogramas mensuales de caudales observados y simulados en CEQUEAU (1983-2022), usando precipitación observada y parámetros iniciales

6.4.1.2. Simulación inicial con datos de precipitación CHIRPS

En la Figura 6.43, se presenta la referencia de cuadros enteros empleados en la modelación con datos de precipitación del producto CHIRPS y datos de temperatura del producto ERA5, en total 64 cuadros intersecan con la cuenca y en cada uno de estos cuadros se encuentra ubicada una “estación meteorológica”, adicionalmente, se incluyeron 24 estaciones más de acuerdo con el recuadro de pixeles de los productos satelitales, es decir en total se incluyeron 88 cuadros con información meteorológica.

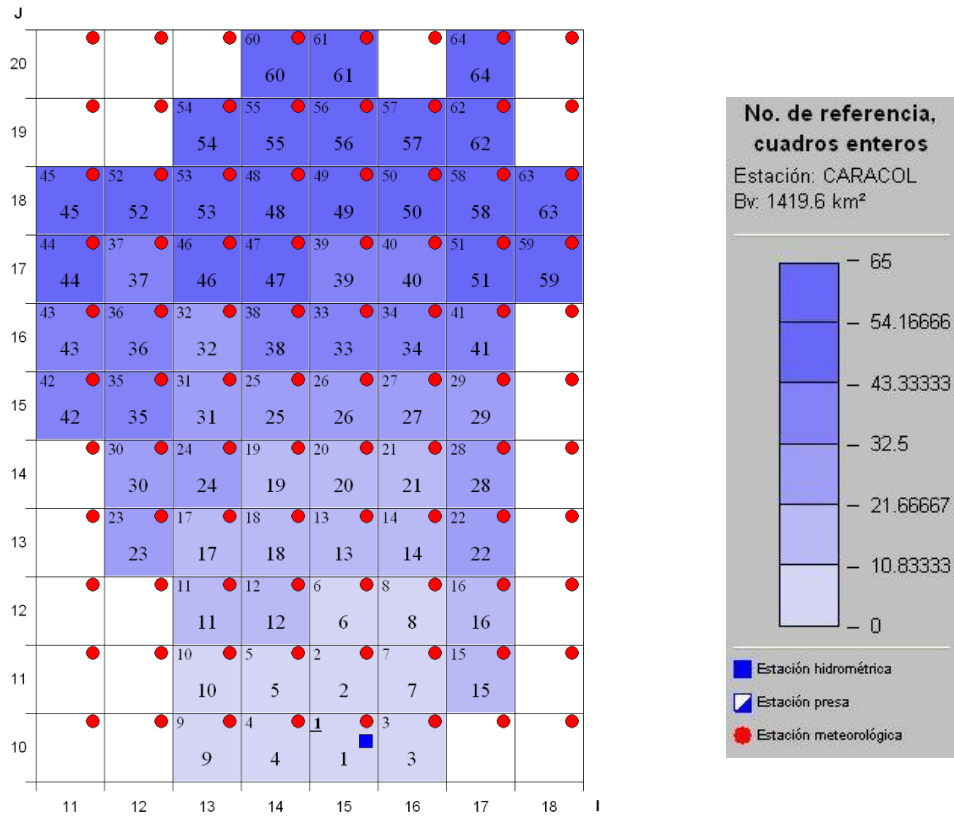


Figura 6.43. Referencia de cuadros enteros - Modelación con precipitación CHIRPS

En la Tabla 6-13, se presenta el caudal medio diario interanual observado y el simulado con CEQUEAU para el periodo 1983-2022. En la Figura 6.44, se representan gráficamente los caudales mensuales observados y simulados con CEQUEAU, también para el periodo 1983-2022, de esta simulación inicial se obtuvo un NSE = 0.53, calificado como satisfactorio de acuerdo con Moriasi et al. (2015). De manera general el caudal simulado presenta un comportamiento similar al observado, en cuanto a la representación de meses con menor y mayor caudal, sin embargo, se presenta tanto sobreestimación como subestimación de los caudales, en cuanto a los meses más caudalosos aproximadamente en 12 de los 40 años del periodo de simulación se sobreestiman y en 20 años se subestiman, es decir los picos más altos de caudal no logran ser representados por el modelo; con respecto a los meses menos caudalosos, en todo el periodo de simulación, el modelo sobreestima el caudal.

Tabla 6-13. Caudal medio diario interanual observado y simulado con CEQUEAU (1983-2022) - Modelación con datos de precipitación CHIRPS

Caudal observado (m ³ /s)	Caudal simulado (m ³ /s)
25.99	35.72

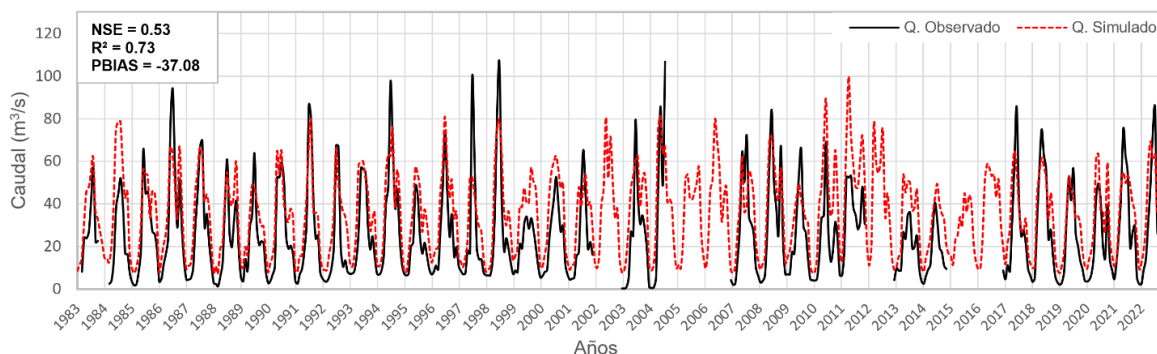


Figura 6.44. Hidrogramas mensuales de caudales observados y simulados en CEQUEAU (1983-2022), usando precipitación CHIRPS y parámetros iniciales

6.4.2. Simulaciones con parámetros calibrados en CEQUEAU

La Tabla 6-14, presenta los parámetros ajustados en el proceso de calibración del modelo CEQUEAU, el cual se realizó a partir de los resultados iniciales obtenidos en la simulación hidrológica con datos de precipitación observada e información de uso y cobertura del suelo del año 2000.

Tabla 6-14. Parámetros ajustados en el proceso de la calibración del modelo CEQUEAU

No.	Parámetro	Valor inicial	Valor calibrado	Rango	
				Mín.	Máx.
1	CIN	0.09	0.83	0.05	1.0
2	CVNB	0.002	0.024	0.001	0.1
3	CVNH	0.041	1.0	0.05	0.3
4	HINT	32.96	52.52	20	100
5	HINF	17.31	57.02	20	100
6	EVNAP	0.273	0.0	0	0.5
7	XINFMA	93.05	30.61	10	100
8	HMAR	165.28	5.92	100	300
9	HNAP	147.34	80.68	50	200
10	XAA	1.67	2.49	0.5	3.0
11	HPOT	30	23.36	20	200
12	HSOL	150	824.49	50	900
13	TRI	0.1	0.0	0.0	0.2
14	CVSI	0.061	0.45	0.05	0.5
15	HRIMP	1.0	24.94	0.0	30



6.4.2.1. Simulación con parámetros calibrados, usando datos de precipitación observados

En este numeral se presentan los resultados obtenidos de las simulaciones en CEUQUEAU con parámetros calibrados, a partir de los datos de precipitación observados y temperatura ERA5, para cada mapa de UCS (años 2000, 2018 y 2050).

6.4.2.1.1. Uso y cobertura del suelo - año 2000

En la Tabla 6-15, se presenta el caudal medio diario interanual observado (25.99 m³/s) y simulado con CEQUEAU (25.63 m³/s) para el periodo 1983-2022, a partir de los datos de precipitación observada y para el mapa de uso y cobertura del suelo del año 2000, el caudal simulado presenta una subestimación del -1.39 % con respecto al caudal observado.

Con respecto a los caudales medios mensuales interanuales observados y simulados con CEQUEAU (periodo 1983-2022), presentados en la Tabla 6-16, se evidencia una subestimación de algunos meses con caudales bajos (febrero y marzo) y de los meses con caudales más altos (julio y agosto), el resto de meses presentan una leve sobreestimación.

Tabla 6-15. Caudal medio diario interanual observado y simulado con CEQUEAU (1983-2022) - Modelación con datos de precipitación observados (UCS 2000)

Caudal observado (m ³ /s)	Caudal simulado (m ³ /s)
25.99	25.63

Tabla 6-16. Caudales medios mensuales interanuales observados y simulados con CEQUEAU (1983-2022) - Modelación con datos de precipitación observados (UCS 2000)

Mes	Q. Observado (m ³ /s)	Q. Simulado (m ³ /s)	Δ (%)
Enero	5.24	6.01	14.67
Febrero	4.64	3.34	-28.05
Marzo	6.75	4.86	-28.11
Abril	13.29	13.81	3.86
Mayo	27.83	30.23	8.65
Junio	46.49	46.56	0.15
Julio	61.78	54.34	-12.04
Agosto	52.27	46.89	-10.30
Septiembre	27.21	30.55	12.29
Octubre	25.92	28.42	9.65
Noviembre	25.25	26.96	6.75
Diciembre	12.75	14.14	10.93

Los caudales simulados y observados en el periodo de calibración (Figura 6.45) mostraron un buen ajuste a un paso de tiempo mensual, obteniéndose un NSE de 0.88 (muy bueno) y a nivel diario interanual un NSE de 0.94 (muy bueno). En general, se puede observar una subestimación en los meses más caudalosos, a excepción de los años 1984, 1999 y 2000, en donde el caudal simulado sobreestima el caudal observado. Los meses menos caudalosos presentaron una leve subestimación en la mayoría de los años.

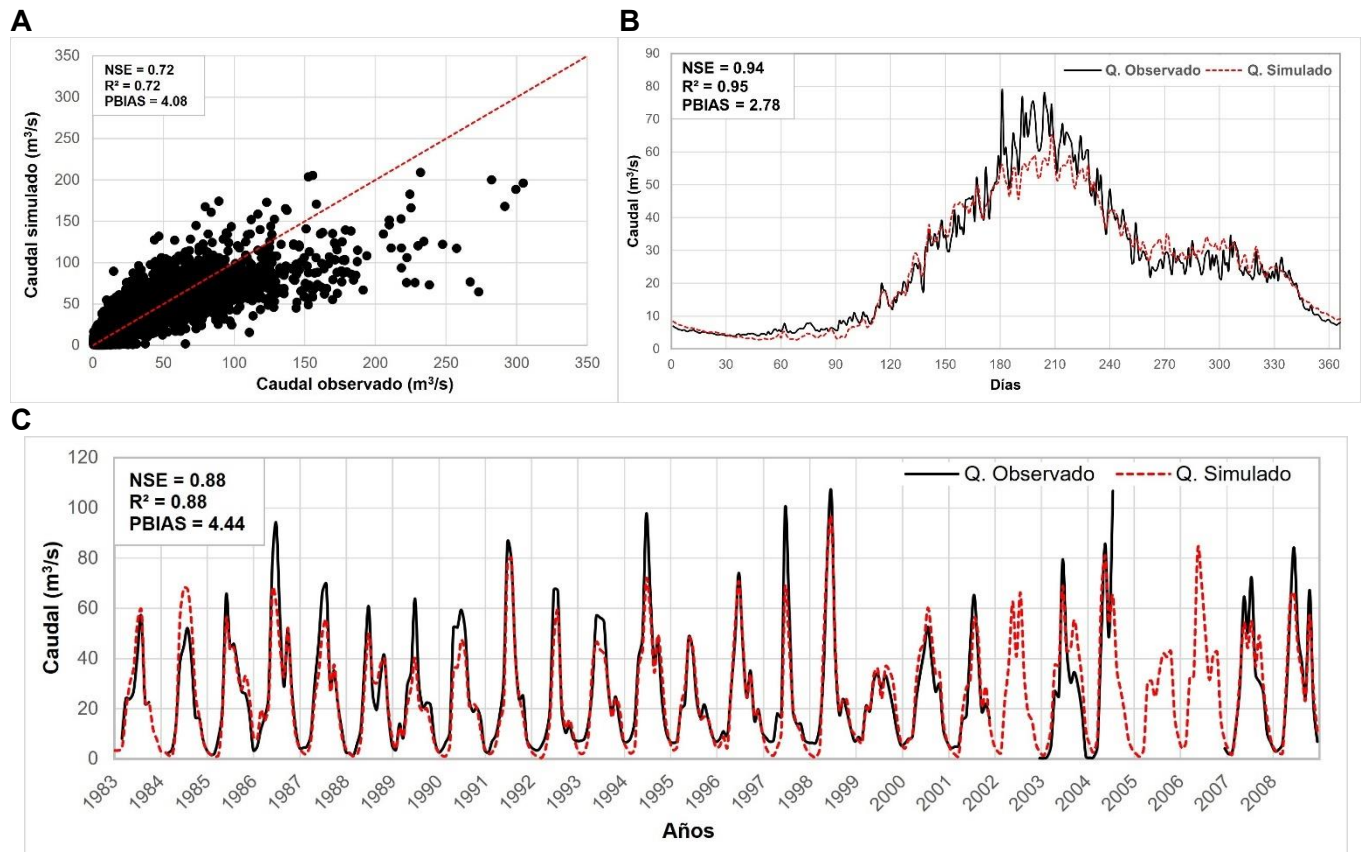


Figura 6.45. Comparación de caudales observados y simulados en CEQUEAU (periodo de calibración: 1983-2008), usando datos de precipitación observada y UCS del año 2000.

A) Diagrama de dispersión de los caudales diarios observados y simulados. B)

Hidrograma interanual de los caudales diarios observados y simulados. C) Hidrogramas mensuales de los caudales observados y simulados.

Para el periodo de validación (Figura 6.46) en los caudales simulados y observados a un paso de tiempo mensual se presentó un NSE de 0.78 (bueno) y a nivel diario interanual el NSE fue de 0.91 (muy bueno). El error porcentual (PBIAS) disminuyó un 7 % en comparación con la evaluación del periodo de calibración.

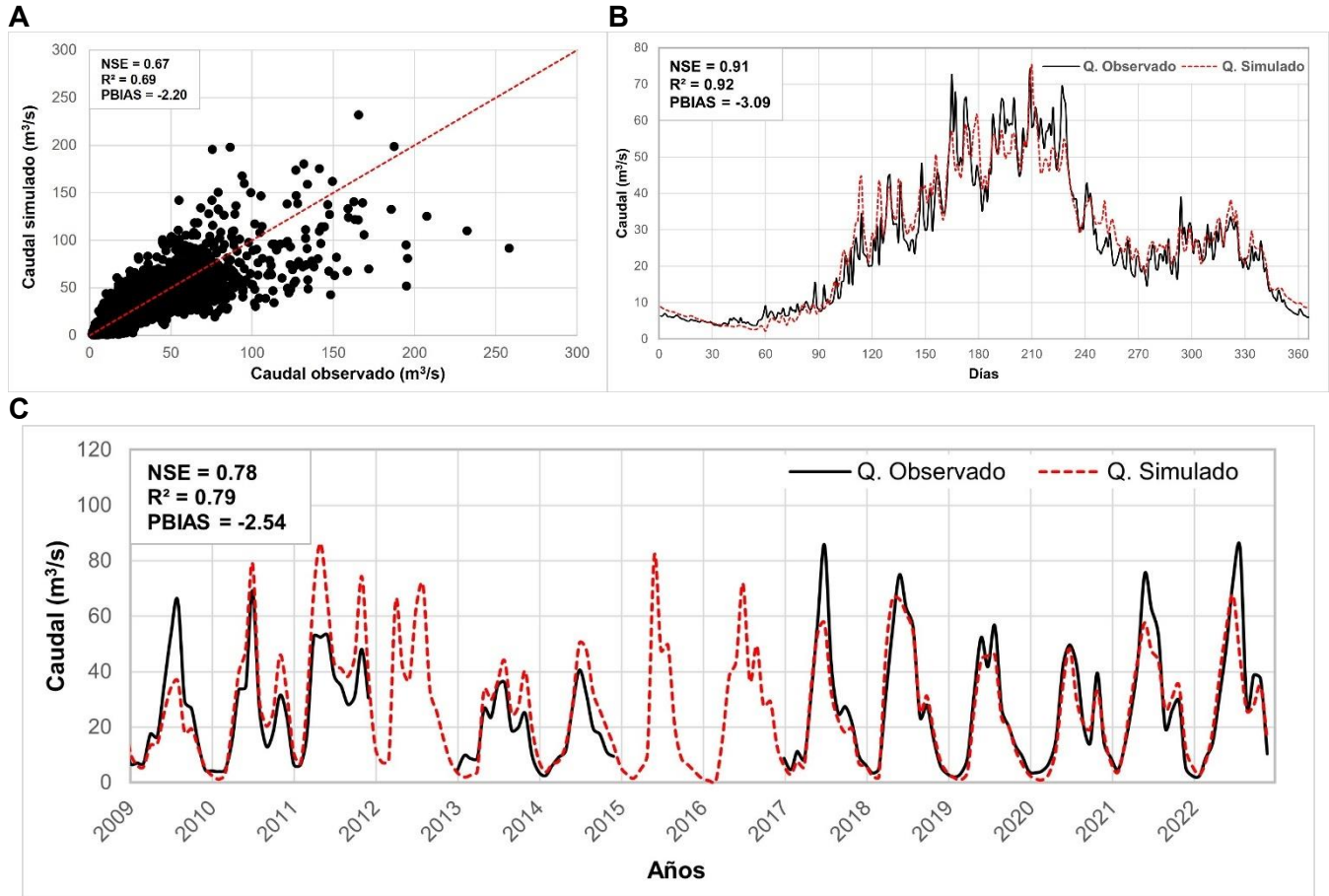


Figura 6.46. Comparación de caudales observados y simulados en CEQUEAU (periodo de validación: 2009-2022), usando datos de precipitación observada y UCS del año 2000.

A) Diagrama de dispersión de los caudales diarios observados y simulados. B)

Hidrograma interanual de los caudales diarios observados y simulados. C) Hidrogramas

mensuales de los caudales observados y simulados.

Los caudales simulados y observados en todo el periodo de simulación (Figura 6.47) mostraron un buen ajuste a un paso de tiempo mensual, obteniéndose un NSE de 0.85 (muy bueno) y a nivel diario interanual un NSE de 0.95 (muy bueno). En general, se puede observar una subestimación en los meses más caudalosos a excepción de los años 1984, 1999, 2000 y el periodo 2010-2014, en donde el caudal simulado sobreestima el caudal observado. Los meses menos caudalosos presentaron una leve subestimación en la mayoría de los años.

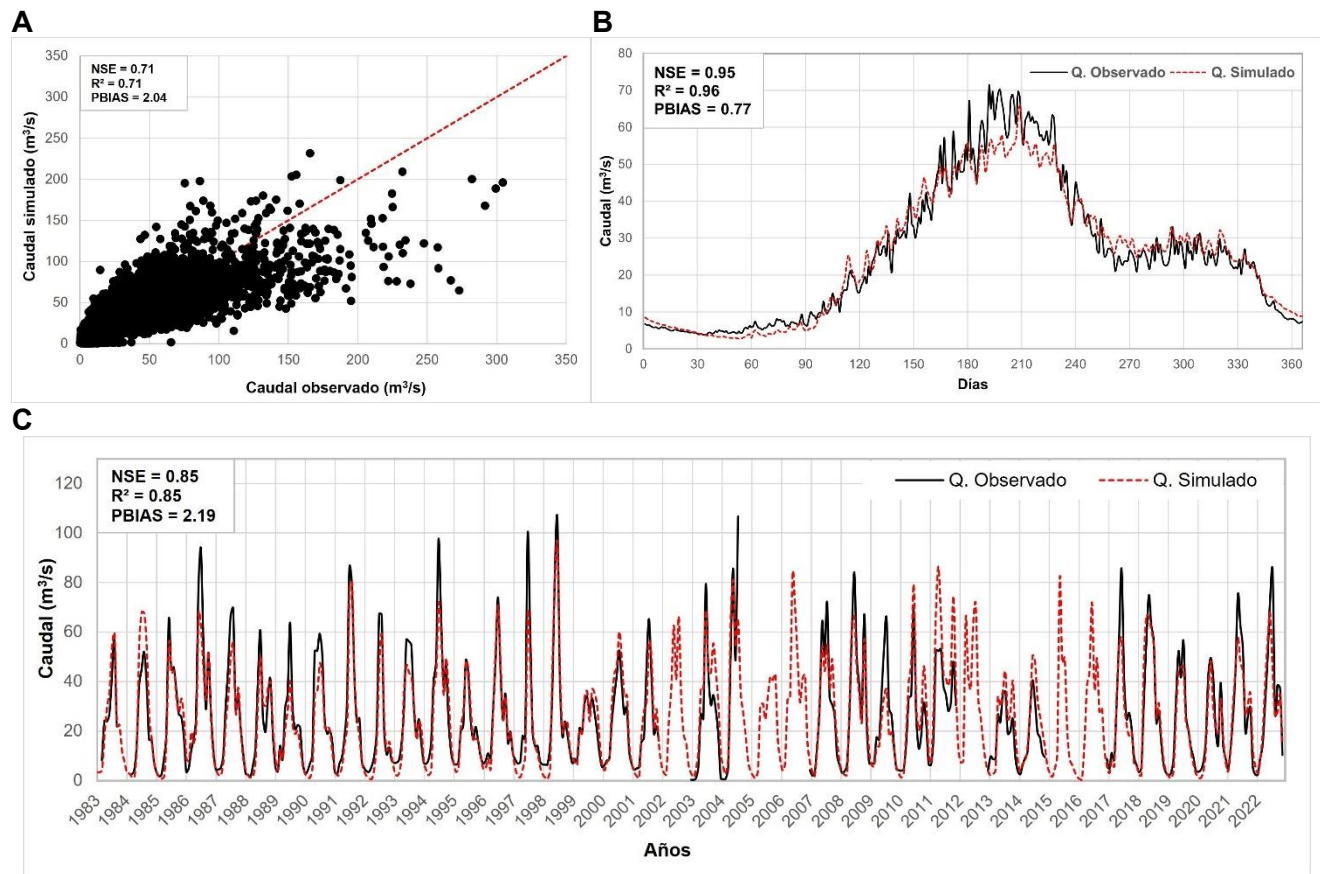


Figura 6.47. Comparación de caudales observados y simulados en CEQUEAU (periodo de simulación: 1983-2022), usando datos de precipitación observada y UCS del año 2000.

A) Diagrama de dispersión de los caudales diarios observados y simulados. B) Hidrograma interanual de los caudales diarios observados y simulados. C) Hidrogramas mensuales de los caudales observados y simulados.

6.4.2.1.2. Uso y cobertura del suelo - año 2018

En la Tabla 6-17, se presenta el caudal medio diario interanual observado ($25.99 \text{ m}^3/\text{s}$) y simulado con CEQUEAU ($25.92 \text{ m}^3/\text{s}$) para el periodo 1983-2022, a partir de los datos de precipitación observada y para el mapa de uso y cobertura del suelo del año 2018, el caudal simulado presenta una leve subestimación del -0.27% con respecto al caudal observado.

Con respecto a los caudales medios mensuales observados y simulados con CEQUEAU (periodo 1983-2022), presentados en la Tabla 6-18, se evidencia una subestimación de algunos meses con caudales bajos (febrero y marzo) y de los meses con caudales más altos (julio y agosto), el resto de meses presentan una leve sobreestimación.



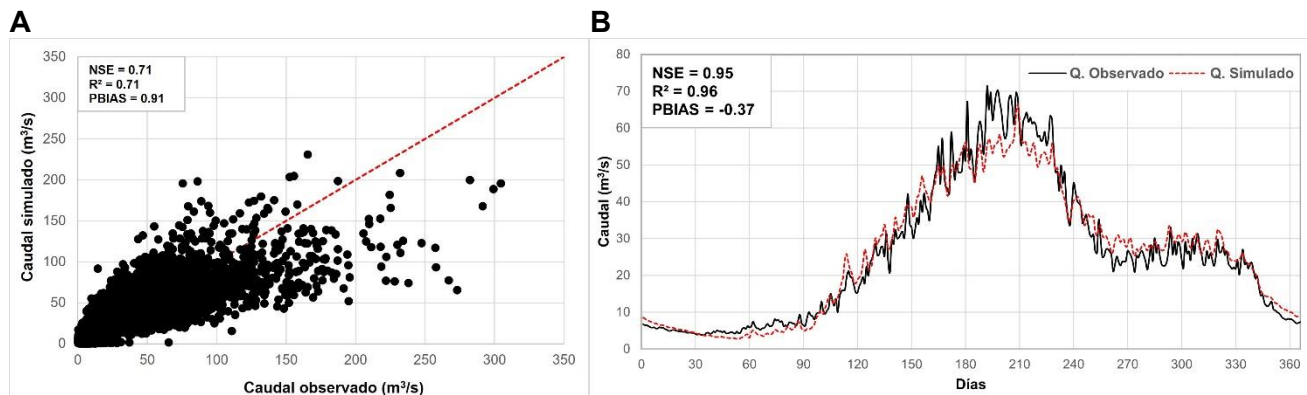
Tabla 6-17. Caudal medio diario interanual observado y simulado con CEQUEAU (periodo 1983 2022) - Modelación con datos de precipitación observados (UCS 2018)

Caudal observado (m ³ /s)	Caudal simulado (m ³ /s)
25.99	25.92

Tabla 6-18. Caudales medios mensuales observados y simulados con CEQUEAU (periodo 1983 2022) - Modelación con datos de precipitación observados y temperatura ERA5 (UCS 2018)

Mes	Q. Observado (m ³ /s)	Q. Simulado (m ³ /s)	Δ (%)
Enero	5.24	6.05	15.41
Febrero	4.64	3.37	-27.45
Marzo	6.75	4.95	-26.70
Abril	13.29	14.10	6.09
Mayo	27.83	30.77	10.58
Junio	46.49	47.07	1.25
Julio	61.78	54.78	-11.33
Agosto	52.27	47.26	-9.60
Septiembre	27.21	30.89	13.54
Octubre	25.92	28.80	11.12
Noviembre	25.25	27.29	8.07
Diciembre	12.75	14.27	11.91

Los caudales simulados y observados en el periodo de simulación (Figura 6.48) mostraron un buen ajuste a un paso de tiempo mensual, obteniéndose un NSE de 0.85 (muy bueno) y a nivel diario interanual un NSE de 0.95 (muy bueno). En general, se puede observar una subestimación en los meses más caudalosos, a excepción de los años 1984, 1999, 2000 y el periodo 2010-2014, en donde el caudal simulado sobreestima el caudal observado. Los meses menos caudalosos presentaron una leve subestimación en la mayoría de los años.



C

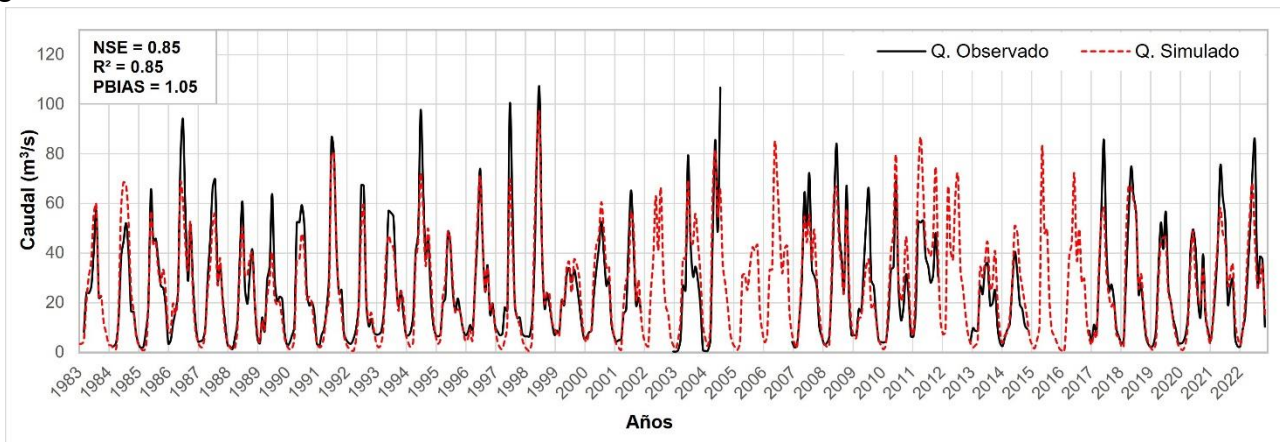


Figura 6.48. Comparación de caudales observados y simulados en CEQUEAU (periodo de simulación: 1983-2022), usando datos de precipitación observada y UCS del año 2018.

A) Diagrama de dispersión de los caudales diarios observados y simulados. B) Hidrograma interanual de los caudales diarios observados y simulados. C) Hidrogramas mensuales de los caudales observados y simulados.

6.4.2.1.3. Uso y cobertura del suelo - año 2050

En la Tabla 6-19, se presenta el caudal medio diario interanual observado ($25.99 \text{ m}^3/\text{s}$) y simulado con CEQUEAU ($26.08 \text{ m}^3/\text{s}$) para el periodo 1983-2022, a partir de los datos de precipitación observada y para el mapa de uso y cobertura del suelo del año 2050, el caudal simulado presenta una leve sobreestimación del 0.35 % con respecto al caudal observado.

Con respecto a los caudales medios mensuales observados y simulados con CEQUEAU (periodo 1983-2022), presentados en la Tabla 6-20, se evidencia una subestimación de algunos meses con caudales bajos (febrero y marzo) y de los meses con caudales más altos (julio y agosto), el resto de meses presentan una leve sobreestimación.

Tabla 6-19. Caudal medio diario interanual observado y simulado con CEQUEAU (periodo 1983-2022) - Modelación con datos de precipitación observados (UCS 2050)

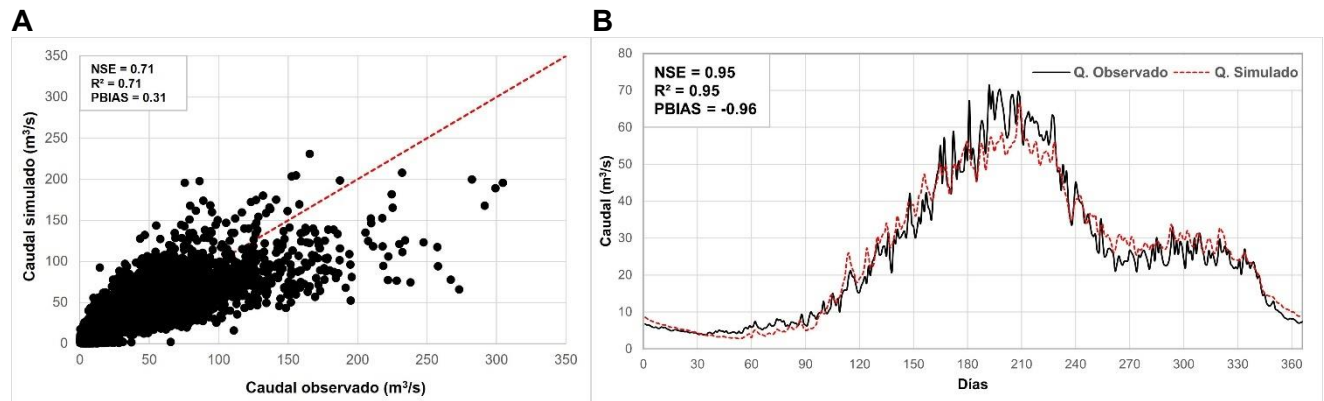
Caudal observado (m^3/s)	Caudal simulado (m^3/s)
25.99	26.08



Tabla 6-20. Caudales medios mensuales observados y simulados con CEQUEAU (periodo 1983-2022) - Modelación con datos de precipitación observados (UCS 2050)

Mes	Q. Observado (m³/s)	Q. Simulado (m³/s)	Δ (%)
Enero	5.24	6.07	15.89
Febrero	4.64	3.39	-26.99
Marzo	6.75	5.01	-25.78
Abril	13.29	14.26	7.29
Mayo	27.83	31.05	11.59
Junio	46.49	47.33	1.80
Julio	61.78	55.00	-10.98
Agosto	52.27	47.45	-9.24
Septiembre	27.21	31.06	14.16
Octubre	25.92	29.00	11.88
Noviembre	25.25	27.47	8.77
Diciembre	12.75	14.34	12.47

Los caudales simulados y observados en el periodo de simulación (Figura 6.49) mostraron un buen ajuste a un paso de tiempo mensual, obteniéndose un NSE de 0.85 (muy bueno) y a nivel diario interanual un NSE de 0.95 (muy bueno). En general, se puede observar una subestimación en los meses más caudalosos, a excepción de los años 1984, 1999, 2000 y el periodo 2010-2014, en donde el caudal simulado sobreestima el caudal observado. Los meses menos caudalosos presentaron una leve subestimación en la mayoría de los años.



C

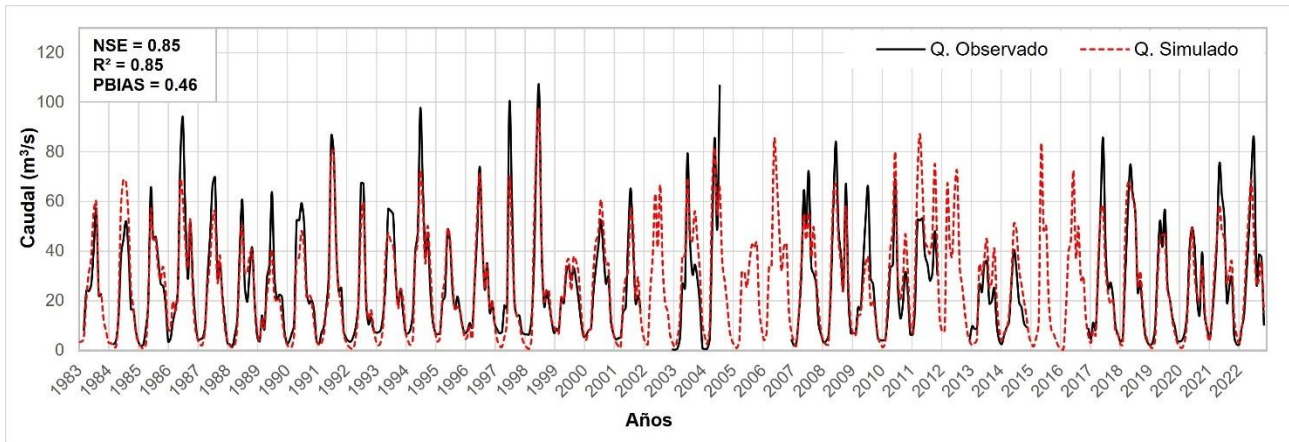


Figura 6.49. Comparación de caudales observados y simulados en CEQUEAU (periodo de simulación: 1983-2022), usando datos de precipitación observada y UCS del año 2050.

A) Diagrama de dispersión de los caudales diarios observados y simulados. B) Hidrograma interanual de los caudales diarios observados y simulados. C) Hidrogramas mensuales de los caudales observados y simulados.

6.4.2.1. Simulación con parámetros calibrados, usando datos de precipitación CHIRPS

En este numeral se presentan los resultados obtenidos de las simulaciones en CEUQUEAU con parámetros calibrados, a partir de los datos de precipitación CHIRPS y temperatura ERA5, para cada mapa de UCS (años 2000, 2018 y 2050).

6.4.2.1.1. Uso y cobertura del suelo - año 2000

En la Tabla 6-21, se presenta el caudal medio diario interanual observado ($25.99 \text{ m}^3/\text{s}$) y simulado con CEQUEAU ($24.58 \text{ m}^3/\text{s}$) para el periodo 1983-2022, a partir de los datos de precipitación CHIRPS y para el mapa de uso y cobertura del suelo del año 2000, el caudal simulado presenta una subestimación del -5.43% con respecto al caudal observado.

Con respecto a los caudales medios mensuales observados y simulados con CEQUEAU (periodo 1983-2022), presentados en la Tabla 6-22, se evidencia una subestimación de algunos meses con caudales bajos (febrero y marzo) y de los meses con caudales más altos (junio, julio y agosto), el resto de meses presentaron sobreestimación.



Tabla 6-21. Caudal medio diario interanual observado y simulado con CEQUEAU (periodo 1983-2022) - Modelación con datos de precipitación CHIRPS (UCS 2000)

Caudal observado (m ³ /s)	Caudal simulado (m ³ /s)
25.99	24.58

Tabla 6-22. Caudales medios mensuales observados y simulados con CEQUEAU (periodo 1983-2022) - Modelación con datos de precipitación CHIRPS (UCS 2000)

Mes	Q. Observado (m ³ /s)	Q. Simulado (m ³ /s)	Δ (%)
Enero	5.24	7.20	37.40
Febrero	4.64	3.74	-19.46
Marzo	6.75	3.86	-42.81
Abril	13.29	14.00	5.31
Mayo	27.83	29.78	7.02
Junio	46.49	44.58	-4.11
Julio	61.78	46.55	-24.66
Agosto	52.27	41.06	-21.46
Septiembre	27.21	27.64	1.58
Octubre	25.92	29.30	13.05
Noviembre	25.25	29.48	16.75
Diciembre	12.75	16.49	29.40

Los caudales simulados y observados en el periodo de simulación (Figura 6.50) mostraron un buen ajuste a un paso de tiempo mensual, obteniéndose un NSE de 0.74 (bueno) y a nivel diario interanual de 0.85 (muy bueno). En general, se puede observar una subestimación en los meses más caudalosos, a excepción de los años 1984, 1999 y el periodo 2010-2013, en donde el caudal simulado sobreestima el caudal observado. Los meses menos caudalosos presentaron una leve subestimación en la mayoría de los años.

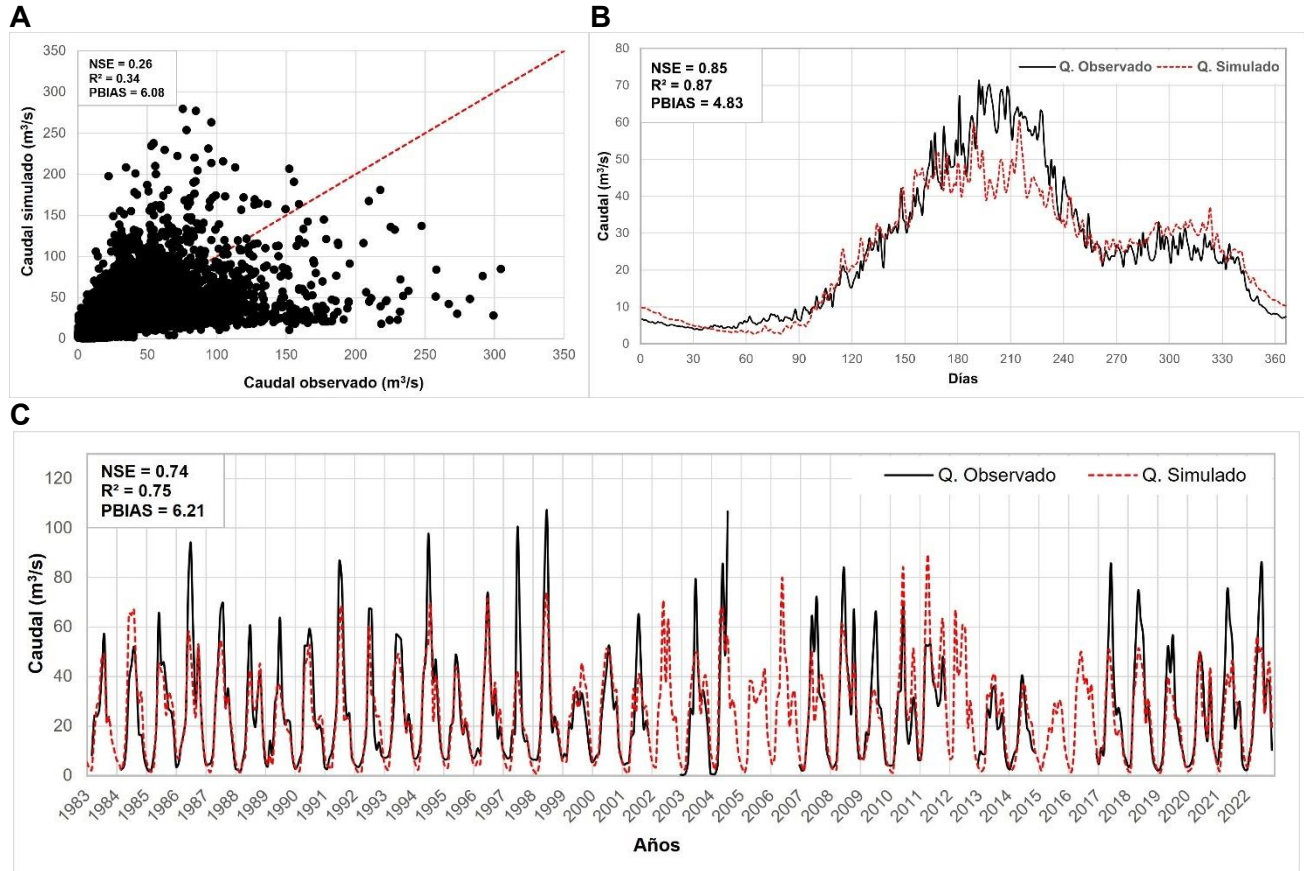


Figura 6.50. Comparación de caudales observados y simulados en CEQUEAU (periodo de simulación: 1983-2022), usando datos de precipitación CHIRPS y UCS del año 2000.

A) Diagrama de dispersión de los caudales diarios observados y simulados. B) Hidrograma interanual de los caudales diarios observados y simulados. C) Hidrogramas mensuales de los caudales observados y simulados.

6.4.2.1.2. Uso y cobertura del suelo - año 2018

En la Tabla 6-23, se presenta el caudal medio diario interanual observado ($25.99 \text{ m}^3/\text{s}$) y simulado con CEQUEAU ($24.87 \text{ m}^3/\text{s}$) para el periodo 1983-2022, a partir de los datos de precipitación CHIRPS y para el mapa de uso y cobertura del suelo del año 2018, el caudal simulado presenta una subestimación del -4.31% con respecto al caudal observado.

Con respecto a los caudales medios mensuales observados y simulados con CEQUEAU (periodo 1983-2022), presentados en la Tabla 6-24, se evidencia una subestimación de algunos meses con caudales bajos (febrero y marzo) y de los meses con caudales más altos (junio, julio y agosto), el resto de meses presentaron sobreestimación.



Tabla 6-23. Caudal medio diario interanual observado y simulado con CEQUEAU (periodo 1983-2022) - Modelación con datos de precipitación CHIRPS (UCS 2018)

Caudal observado (m ³ /s)	Caudal simulado (m ³ /s)
25.99	24.87

Tabla 6-24. Caudales medios mensuales observados y simulados con CEQUEAU (periodo 1983-2022) - Modelación con datos de precipitación CHIRPS (UCS 2018)

Mes	Q. Observado (m ³ /s)	Q. Simulado (m ³ /s)	Δ (%)
Enero	5.24	7.25	38.42
Febrero	4.64	3.78	-18.63
Marzo	6.75	3.95	-41.54
Abril	13.29	14.35	7.97
Mayo	27.83	30.30	8.91
Junio	46.49	45.06	-3.09
Julio	61.78	46.94	-24.01
Agosto	52.27	41.42	-20.76
Septiembre	27.21	27.96	2.76
Octubre	25.92	29.69	14.57
Noviembre	25.25	29.83	18.12
Diciembre	12.75	16.63	30.46

Los caudales simulados y observados en el periodo de simulación (Figura 6.51) mostraron un buen ajuste a un paso de tiempo mensual, obteniéndose un NSE de 0.74 (bueno) y a nivel diario interanual de 0.85 (muy bueno). En general, se puede observar una subestimación en los meses más caudalosos, a excepción de los años 1984, 1999 y el periodo 2010-2013, en donde el caudal simulado sobreestima el caudal observado. Los meses menos caudalosos presentaron una leve subestimación en la mayoría de los años.

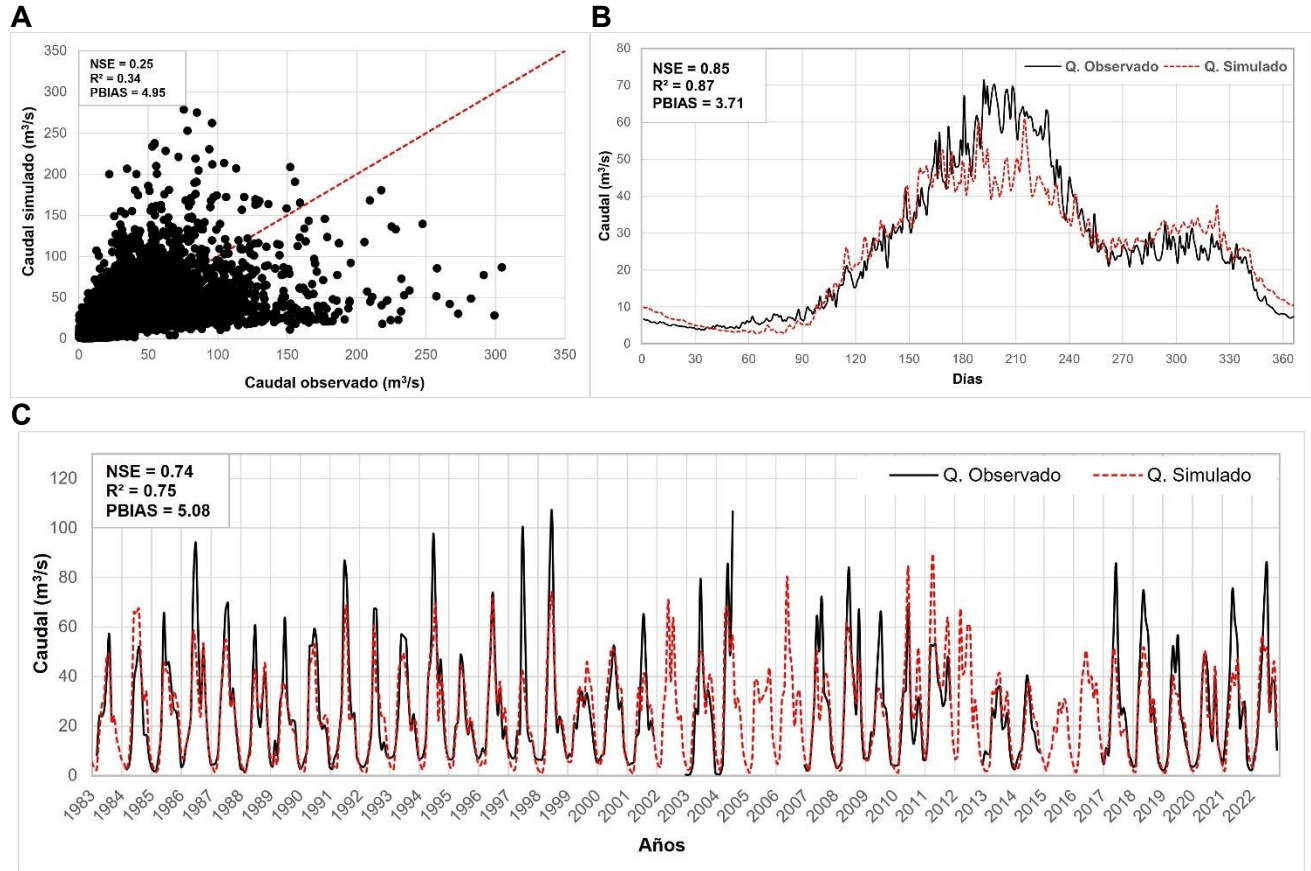


Figura 6.51. Comparación de caudales observados y simulados en CEQUEAU (periodo de simulación: 1983-2022), usando datos de precipitación CHIRPS y UCS del año 2018.

A) Diagrama de dispersión de los caudales diarios observados y simulados. B) Hidrograma interanual de los caudales diarios observados y simulados. C) Hidrogramas mensuales de los caudales observados y simulados.

6.4.2.1.3. Uso y cobertura del suelo - año 2050

En la Tabla 6-25, se presenta el caudal medio diario interanual observado ($25.99 m^3/s$) y simulado con CEQUEAU ($25.02 m^3/s$) para el periodo 1983-2022, a partir de los datos de precipitación CHIRPS y para el mapa de uso y cobertura del suelo del año 2050, el caudal simulado presenta una subestimación del -3.73 % con respecto al caudal observado.

Con respecto a los caudales medios mensuales observados y simulados con CEQUEAU (periodo 1983-2022), presentados en la Tabla 6-26, se evidencia una subestimación de algunos meses con caudales bajos (febrero y marzo) y de los meses con caudales más altos (junio, julio y agosto), el resto de meses presentaron sobreestimación.



Tabla 6-25. Caudal medio diario interanual observado y simulado con CEQUEAU (periodo 1983-2022) - Modelación con datos de precipitación CHIRPS (UCS 2050)

Caudal observado (m ³ /s)	Caudal simulado (m ³ /s)
25.99	25.02

Tabla 6-26. Caudales medios mensuales observados y simulados con CEQUEAU (periodo 1983-2022) - Modelación con datos de precipitación CHIRPS (UCS 2050)

Mes	Q. Observado (m ³ /s)	Q. Simulado (m ³ /s)	Δ (%)
Enero	5.24	7.28	38.94
Febrero	4.64	3.79	-18.27
Marzo	6.75	3.99	-40.88
Abril	13.29	14.54	9.35
Mayo	27.83	30.58	9.89
Junio	46.49	45.28	-2.60
Julio	61.78	47.14	-23.70
Agosto	52.27	41.60	-20.41
Septiembre	27.21	28.13	3.39
Octubre	25.92	29.92	15.42
Noviembre	25.25	30.01	18.84
Diciembre	12.75	16.70	31.03

Los caudales simulados y observados en el periodo de simulación (Figura 6.52) mostraron un buen ajuste a un paso de tiempo mensual, obteniéndose un NSE de 0.74 (bueno) y a nivel diario interanual de 0.85 (muy bueno). En general, se puede observar una subestimación en los meses más caudalosos, a excepción de los años 1984, 1999 y el periodo 2010-2013, en donde el caudal simulado sobreestima el caudal observado. Los meses menos caudalosos presentaron una leve subestimación en la mayoría de los años.

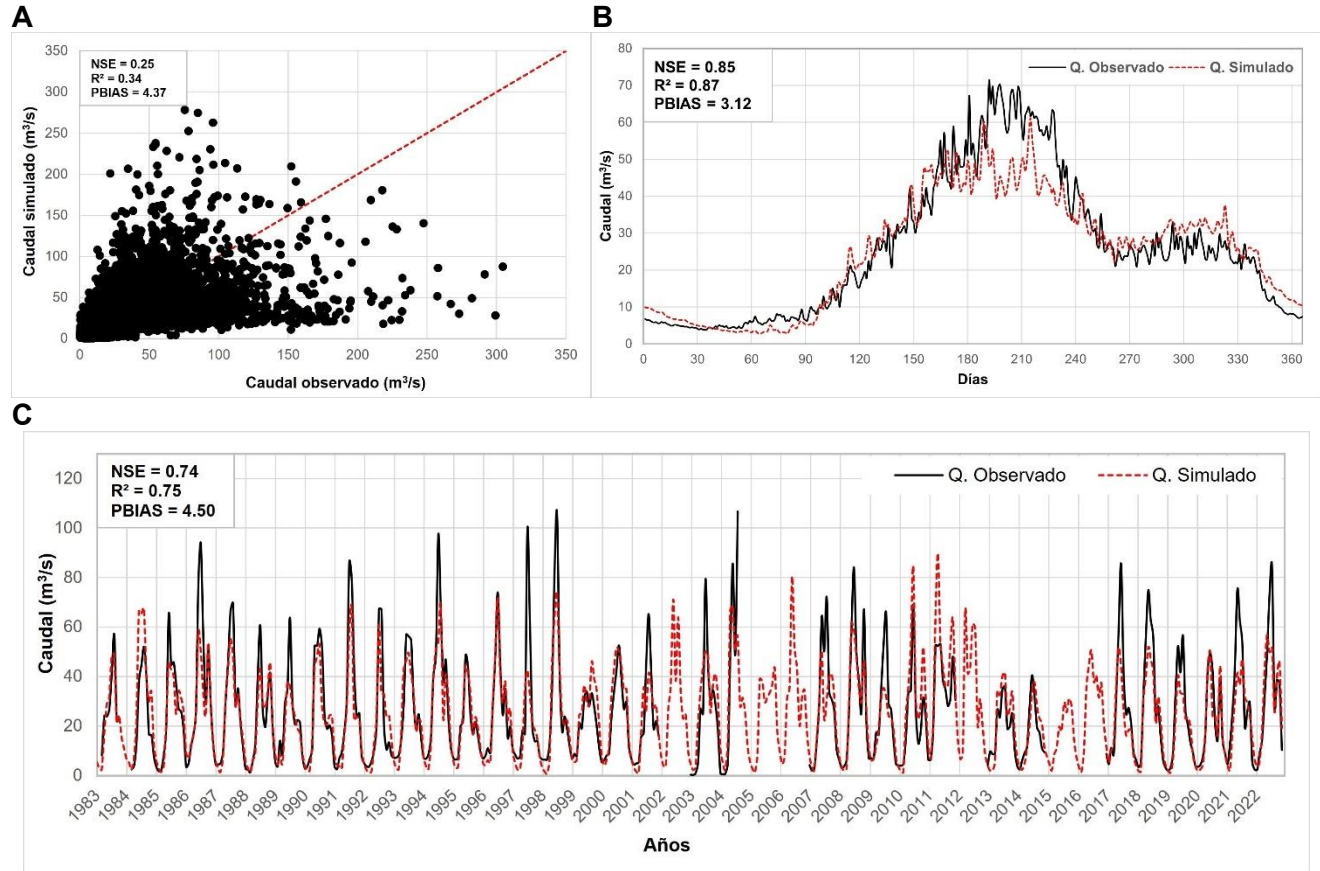


Figura 6.52. Comparación de caudales observados y simulados en CEQUEAU (periodo de simulación: 1983-2022), usando datos de precipitación CHIRPS y UCS del año 2050.

A) Diagrama de dispersión de los caudales diarios observados y simulados. B) Hidrograma interanual de los caudales diarios observados y simulados. C) Hidrogramas mensuales de los caudales observados y simulados.

6.5. Modelación hidrológica con SWAT

En la modelación hidrológica con SWAT, se delimitaron de 13 subcuencas (Figura 6.53), para la creación de HRUs, se incorporó el mapa de suelos presentado en la Figura 6.54 y los mapas correspondientes de uso y cobertura del suelo (años 2000, 2018 y 2050), las pendientes se clasificaron como 0-15 %, 15-30 % y 30-999 %. La cantidad de HRUs obtenidas para cada mapa de UCS, se muestran en la Tabla 6-27.

Tabla 6-27. Cantidad de HRUs delimitadas por mapa de UCS

Mapa UCS	HRUs
Año 2000	839
Año 2018	834
Año 2050	848

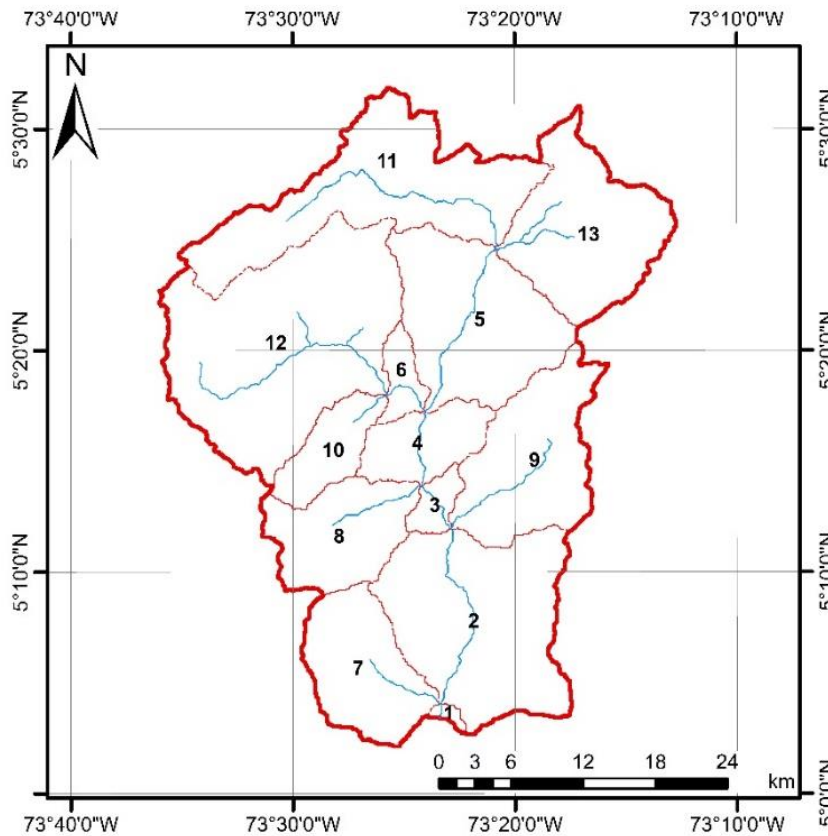


Figura 6.53. Delimitación de las subcuencas en SWAT

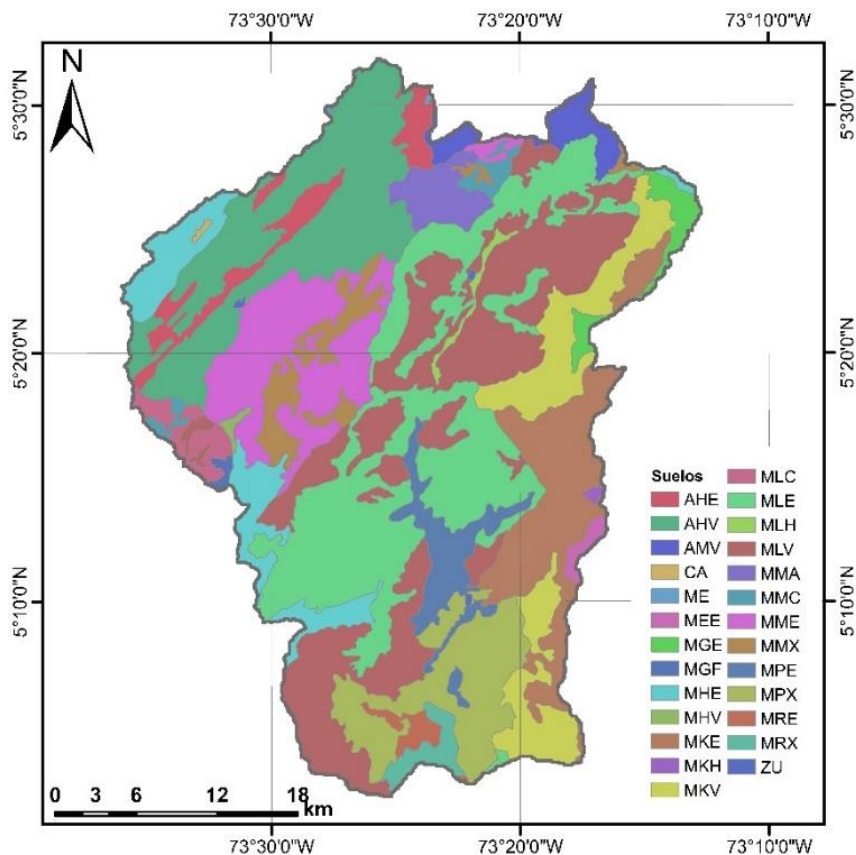


Figura 6.54. Clasificación de suelos de la cuenca

En la Tabla 6-28 se presentan los componentes taxonómicos de las unidades cartográficas de suelo presentes en la cuenca.

Tabla 6-28. Componentes taxonómicos de las unidades cartográficas de suelo en la cuenca

Unidad Cartográfica de Suelo	Componentes taxonómicos
AHE	Complejo: Andic Dystrudepts - Humic Dystrudepts - Afloramientos rocosos
AHV	Asociación: Pachic Melanudands - Humic Dystrudepts - Typic Hapludands
AMV	Asociación: Vertic Hapludalfs - Andic Dystrudepts
CA	Cuerpo de agua
ME	Consociación: Miscelaneo erosionado
MEE	Complejo: Lithic Dystrucryepts; Humic Dystrucryepts; Typic Haplohemists; Afloramientos rocosos
MGE	Complejo: Humic Lithic Dystrudepts; Afloramientos rocosos; Typic Hapludands
MGF	Asociación: Humic Dystrudepts; Andic Dystrudepts; Humic Lithic; Dystrudepts



MHE	Complejo: Lithic Udorthents; Oxic Dystrudepts; Afloramientos rocosos
MHV	Asociación: Typic Hapludands; Humic Pachic Dystrudepts; Typic Dystrudepts
MKE	Complejo: Lithic Udorthents; Typic Dystrudepts; Afloramientos rocosos
MKH	Asociación: Oxic Dystrudepts; Typic Udifluvents
MKV	Asociación: Typic Hapludands; Andic Dystrudepts; Typic Dystrudepts
MLC	Complejo: Humic Dystrudepts; Typic Argiudolls; Typic Hapludands; Thaptic Hapludands
MLE	Complejo: Lithic Udorthents; Typic Dystrudepts; Afloramientos rocosos
MLH	Consociación: Fluvaquentic Humaquepts
MLV	Asociación: Humic Lithic Eutrudepts; Typic Placudands; Dystric Eutrudepts
MMA	Asociación: Inceptic Haplustalfs; Lithic Ustorthents; Typic Dystrustepts
MMC	Asociación: Humic Dystrudepts; Typic Hapludalfs
MME	Complejo: Lithic Ustorthents - Humic Dystrustepts - Afloramientosrocosos
MMX	Asociación: Humic Dystrustepts; Typic Haplustalfs; Typic Haplustands
MPE	Asociación: Oxic Dystrudepts - Lithic Udorthents - Lithic Dystrudepts
MPX	Asociación: Andic Dystrudepts; Humic Dystrudepts; Typic Eutrudepts
MRE	Complejo: Entic Haplustolls; Vertic Haplustepts; Afloramientos rocosos
MRX	Asociación: Fluventic Haplustolls; Vertic Calciustolls
ZU	Áreas urbanas

Para la configuración inicial de SWAT se plantearon 4 modelos diferentes (Tabla 6-29) variando los métodos de cálculo de la evapotranspiración potencial (PET) y el método de estimación diario del número de curva (CN), con el fin de elegir la mejor configuración del modelo en función de los criterios de evaluación estadística (NSE y R^2) para realizar las simulaciones hidrológicas.

Tabla 6-29. Configuraciones del modelo a partir del método PET y el método ICN

Modelo	Método PET	Método ICN	NSE diario	R^2 diario	NSE mensual	R^2 mensual
M1	Penman-Monteith	Soil moisture	0.43	0.48	0.71	0.74
M2	Hargreaves	Soil moisture	0.42	0.47	0.70	0.73
M3	Penman-Monteith	Plant ET	0.53	0.56	0.73	0.78
M4	Hargreaves	Plant ET	0.54	0.56	0.74	0.78

Soil moisture: Calcula el valor diario de CN como una función de la humedad del suelo.

Plant ET: Calcula el valor diario de CN como una función de la evapotranspiración de la planta.

De acuerdo con los resultados de eficiencia de los 4 modelos, el Modelo 4 (M4) fue el que mostró un mejor ajuste tanto a nivel diario como mensual, por lo que se optó por configurar el modelo con las características del M4, es decir, con la ecuación de Hargreaves para el



método de estimación de PET y con el método ICN1 (*Plant ET*), para la estimación diaria del número de curva.

6.5.1. Simulaciones con parámetros iniciales en SWAT

En este numeral se presentan los resultados obtenidos en las primeras simulaciones con SWAT para cada uno de los proyectos: (1) Simulación con datos de precipitación observada y (2) Simulación con datos de precipitación CHIRPS.

Las simulaciones iniciales, es decir sin parámetros calibrados, se corrieron con el mapa de uso y cobertura del suelo del año 2000.

6.5.1.1. Simulación inicial con datos de precipitación observados

En la Tabla 6-30, se presenta el caudal medio diario interanual observado y el simulado con SWAT para el periodo 1983-2022 a partir de datos de precipitación observada. En la Figura 6.55, se representan gráficamente los caudales mensuales observados y simulados con SWAT, también para el periodo 1983-2022, de esta simulación inicial se obtuvo un NSE = 0.74, calificado como bueno de acuerdo con Moriasi et al. (2015). De manera general el caudal simulado presenta un comportamiento similar al observado, en cuanto a la representación de meses con menor y mayor caudal, sin embargo, en la mayoría de años el caudal simulado subestima el observado, a excepción de los años 1984, 2000, 2001 y el periodo 2010-2014, en donde el caudal simulado es mayor que el observado.

Tabla 6-30. Caudal medio diario interanual observado y simulado con SWAT (periodo 1983-2022) - Modelación con datos de precipitación observada

Caudal observado (m ³ /s)	Caudal simulado (m ³ /s)
25.99	22.63

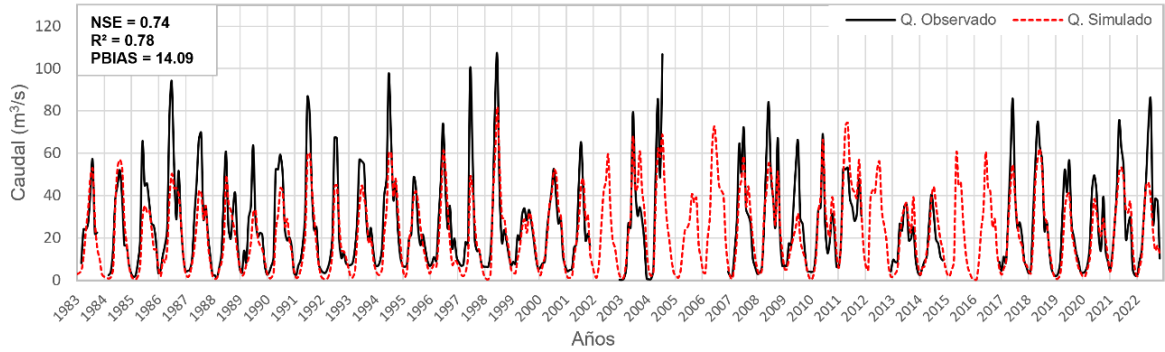


Figura 6.55. Caudales mensuales observados y simulados en SWAT con parámetros iniciales, periodo 1983-2022. Modelación con datos precipitación observada

6.5.1.2. Simulación inicial con datos de precipitación CHIRPS

En la Tabla 6-31, se presenta el caudal medio diario interanual observado y el simulado con SWAT para el periodo 1983-2022 a partir de datos de precipitación CHIRPS. En la Figura 6.56, se representan gráficamente los caudales mensuales observados y simulados con SWAT, también para el periodo 1983-2022, de esta simulación inicial se obtuvo un NSE = 0.68, calificado como satisfactorio de acuerdo con Moriasi et al. (2015). De manera general el caudal simulado presenta un comportamiento similar al observado, en cuanto a la representación de meses con menor y mayor caudal, sin embargo, en la mayoría de años el caudal simulado subestima el observado, a excepción de los años 1984, 2000, 2001, 2011 y 2014, en donde el caudal simulado es mayor que el observado.

Tabla 6-31. Caudal medio diario interanual observado y simulado con SWAT (periodo 1983-2022) - Modelación con datos de precipitación CHIRPS

Caudal observado (m³/s)	Caudal simulado (m³/s)
25.99	21.93

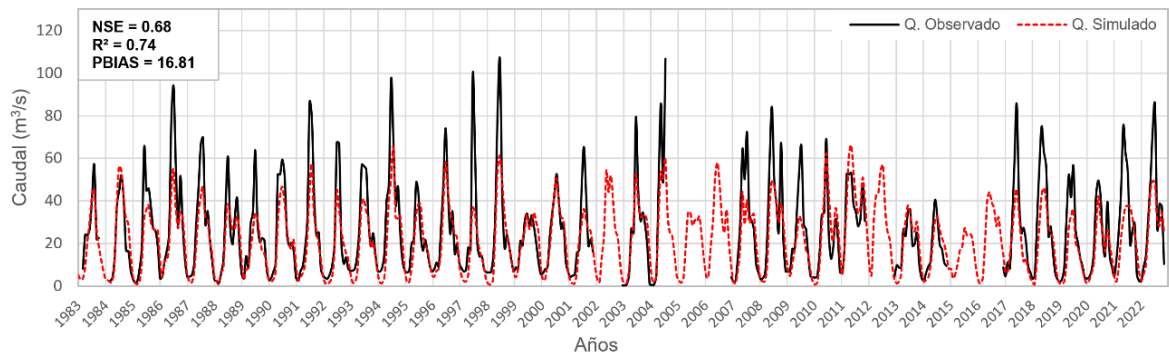


Figura 6.56. Caudales mensuales observados y simulados en SWAT con parámetros iniciales, periodo 1983-2022. Modelación con datos precipitación CHIRPS

6.5.2. Simulaciones con parámetros calibrados en SWAT

La Tabla 6-32, presenta los parámetros ajustados en el proceso de calibración del modelo SWAT, el cual se realizó a partir de los resultados iniciales obtenidos en la simulación hidrológica con datos de precipitación observada e información de uso y cobertura del suelo del año 2000.

Tabla 6-32. Parámetros ajustados en el proceso de la calibración del modelo SWAT

No.	Parámetro	Valor inicial	Valor calibrado	Rango de calibración	
				Mín.	Máx.
1	CN2.mgt	-	-0.0343*	-2.0	2.0
2	ALPHA_BF.gw	0.048	0.479	0.3	0.9
3	GW_DELAY.gw	31	317.32	250	330
4	GWQMN.gw	1000	1307.41	1200	1800
5	GW_REVAP.gw	0.02	0.134	0.12	0.15
6	GWHT.gw	1.0	4.947	4.5	6.5
7	REVAPMN.gw	750	659.31	550	695
8	RCHRG_DP.gw	0.05	0.02	0.01	0.35
9	ESCO.bsn	0.95	1.0	0.7	1.0
10	EPCO.bsn	1.0	0.736	0.23	0.84
11	DDRAIN.mgt	0.0	201.754	160	300
12	DEP_IMP.hru	6000	3500	1100	3600
13	SURLAG.bsn	4.0	4.366	4.0	8.0
14	SOL_K.sol	4.78	0.8654**	0.4	1.0
15	SOL_AWC.sol	0.14	-0.496***	-0.65	-0.05

* Disminución del 3.43 % del valor inicial de CN2

** Aumento del 86.5 % del valor inicial de SOL_K

*** Disminución del 49.6 % del valor inicial de SOL_AWC



6.5.2.1. Simulación con parámetros calibrados, usando datos de precipitación observados

En este numeral se presentan los resultados obtenidos en SWAT de las simulaciones con parámetros calibrados, a partir de los datos de precipitación observados y datos climatológicos ERA5, para cada mapa de UCS (años 2000, 2018 y 2050).

6.5.2.1.1. Uso y cobertura del suelo - año 2000

En la Tabla 6-33, se presenta el caudal medio diario interanual observado (25.99 m³/s) y simulado con SWAT (25.11 m³/s) para el periodo 1983-2022, a partir de los datos de precipitación observada y para el mapa de uso y cobertura del suelo del año 2000, el caudal simulado presenta una subestimación del -3.39 % con respecto al caudal observado.

Con respecto a los caudales medios mensuales observados y simulados con SWAT (periodo 1983-2022), presentados en la Tabla 6-34, se evidencia una subestimación de los meses más caudalosos (junio, julio y agosto), el resto de meses presentan una leve sobreestimación.

Tabla 6-33. Caudal medio diario interanual observado y simulado con SWAT (periodo 1983-2022) - Modelación con datos de precipitación observados (UCS 2000)

Caudal observado (m ³ /s)	Caudal simulado (m ³ /s)
25.99	25.11

Tabla 6-34. Caudales medios mensuales observados y simulados con SWAT (periodo 1983-2022) - Modelación con datos de precipitación observados (UCS 2000)

Mes	Q. Observado (m ³ /s)	Q. Simulado (m ³ /s)	Δ (%)
Enero	5.24	8.22	57.00
Febrero	4.64	5.78	24.43
Marzo	6.75	7.11	5.25
Abril	13.29	15.00	12.82
Mayo	27.83	30.14	8.32
Junio	46.49	43.99	-5.38
Julio	61.78	51.28	-16.99
Agosto	52.27	43.33	-17.12
Septiembre	27.21	28.27	3.92
Octubre	25.92	26.18	1.01
Noviembre	25.25	25.71	1.79
Diciembre	12.75	15.14	18.80

Los caudales simulados y observados en el periodo de calibración (Figura 6.57) mostraron un buen ajuste a un paso de tiempo mensual, obteniéndose un NSE de 0.84 (muy bueno) y a nivel diario interanual un NSE de 0.90 (muy bueno). En general, se puede observar una subestimación en los meses más caudalosos, a excepción de los años 1984 y 2000; los meses menos caudalosos presentaron una leve sobreestimación en la mayoría de los años.

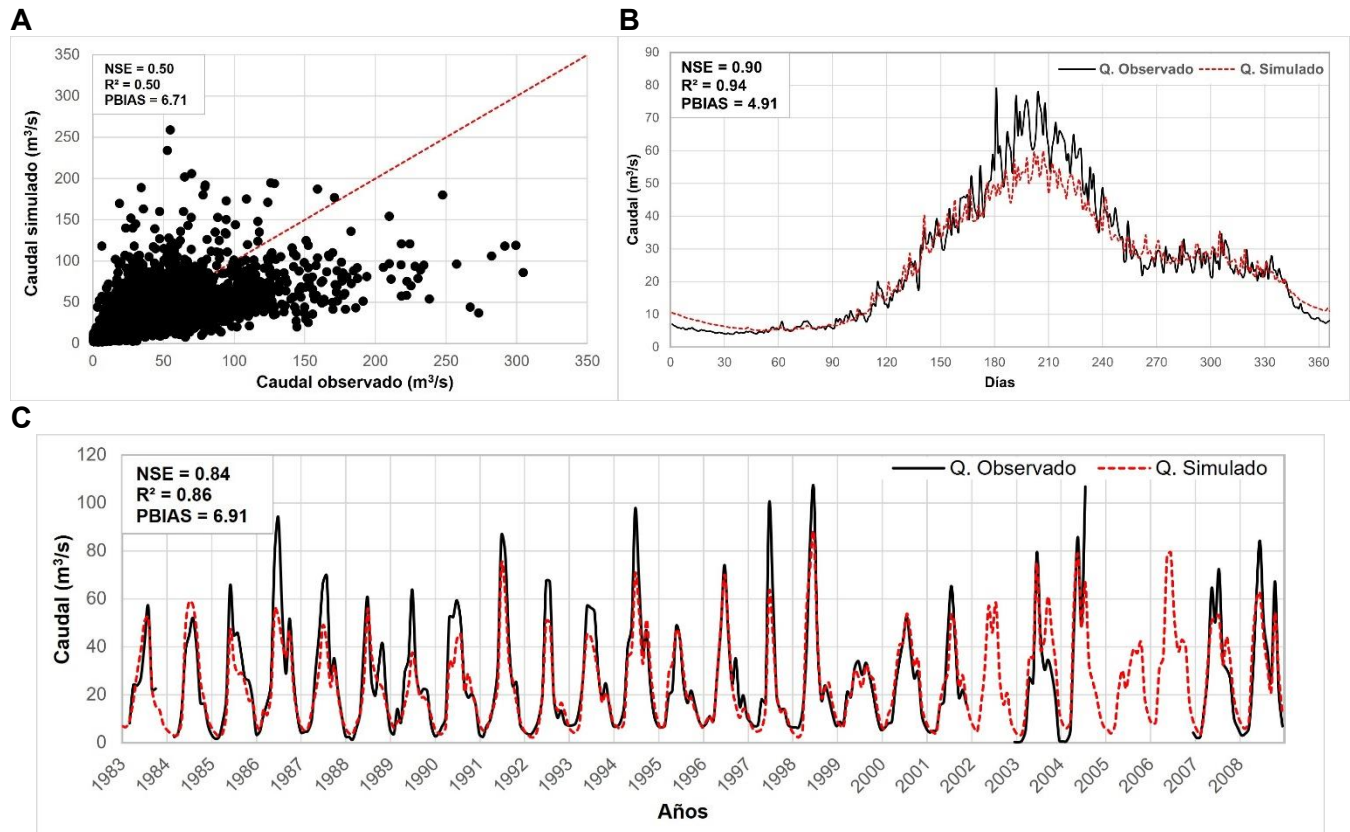


Figura 6.57. Comparación de caudales observados y simulados en SWAT (periodo de calibración: 1983-2008), usando datos de precipitación observada y UCS del año 2000. A) Diagrama de dispersión de los caudales diarios observados y simulados. B) Hidrograma interanual de los caudales diarios observados y simulados. C) Hidrogramas mensuales de los caudales observados y simulados.

Para el periodo de validación (Figura 6.58) en los caudales simulados y observados a un paso de tiempo mensual se presentó un NSE de 0.74 (bueno) y a nivel diario interanual el NSE fue de 0.87 (muy bueno). El error porcentual (PBIAS) disminuyó un 7.8 % en comparación con la evaluación del periodo de calibración.

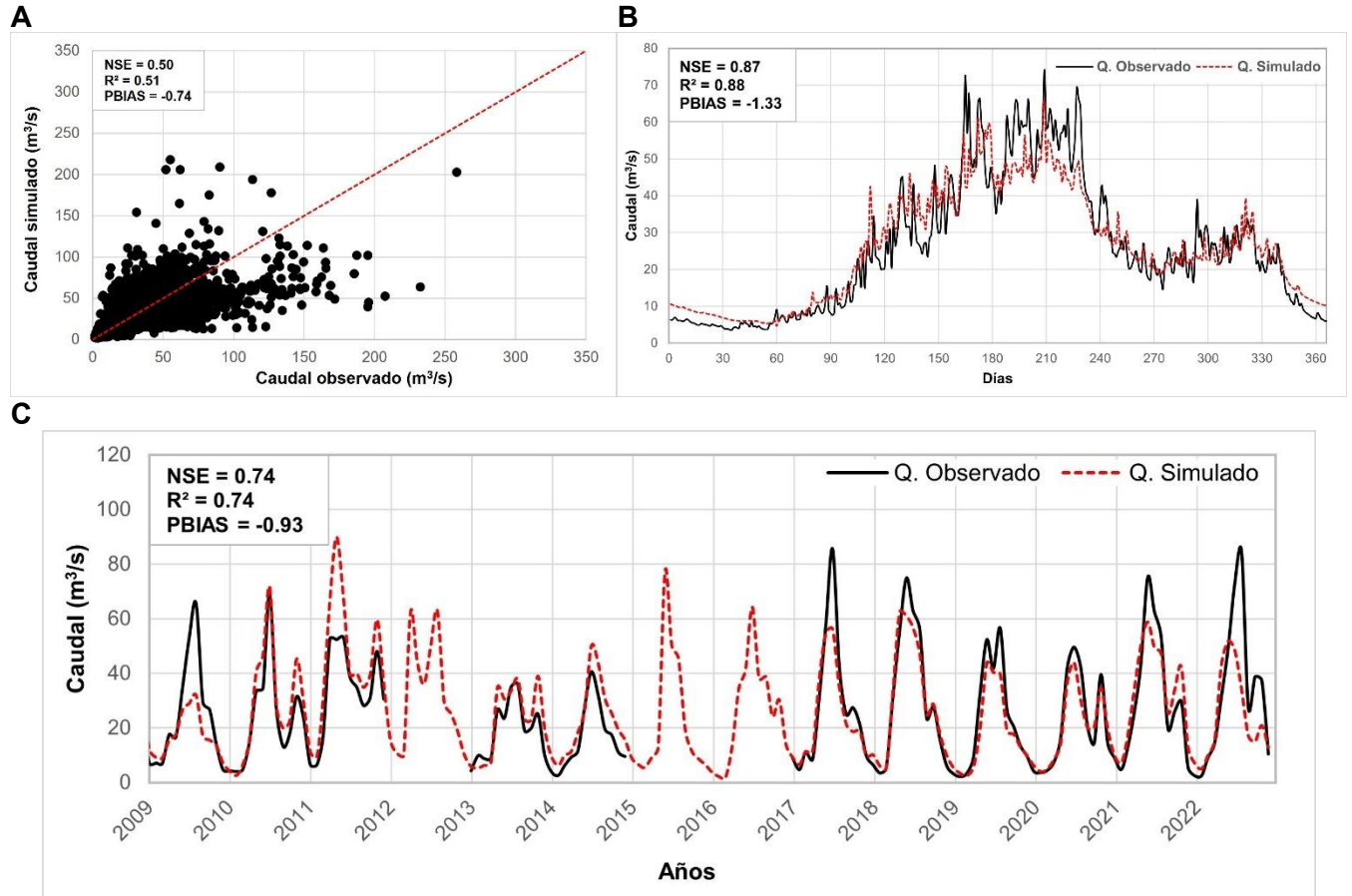


Figura 6.58. Comparación de caudales observados y simulados en SWAT (periodo de validación: 2009-2022), usando datos de precipitación observada y UCS del año 2000. A) Diagrama de dispersión de los caudales diarios observados y simulados. B) Hidrograma interanual de los caudales diarios observados y simulados. C) Hidrogramas mensuales de los caudales observados y simulados.

Los caudales simulados y observados en todo el periodo de simulación (Figura 6.59) mostraron un buen ajuste a un paso de tiempo mensual, obteniéndose un NSE de 0.81 (muy bueno) y a nivel diario interanual un NSE de 0.92 (muy bueno). En general, se puede observar una subestimación en los meses más caudalosos a excepción de los años 1984 y 2000, y el periodo 2010-2014, en donde el caudal simulado sobreestima el caudal observado. Los meses menos caudalosos presentaron una leve sobreestimación en la mayoría de los años

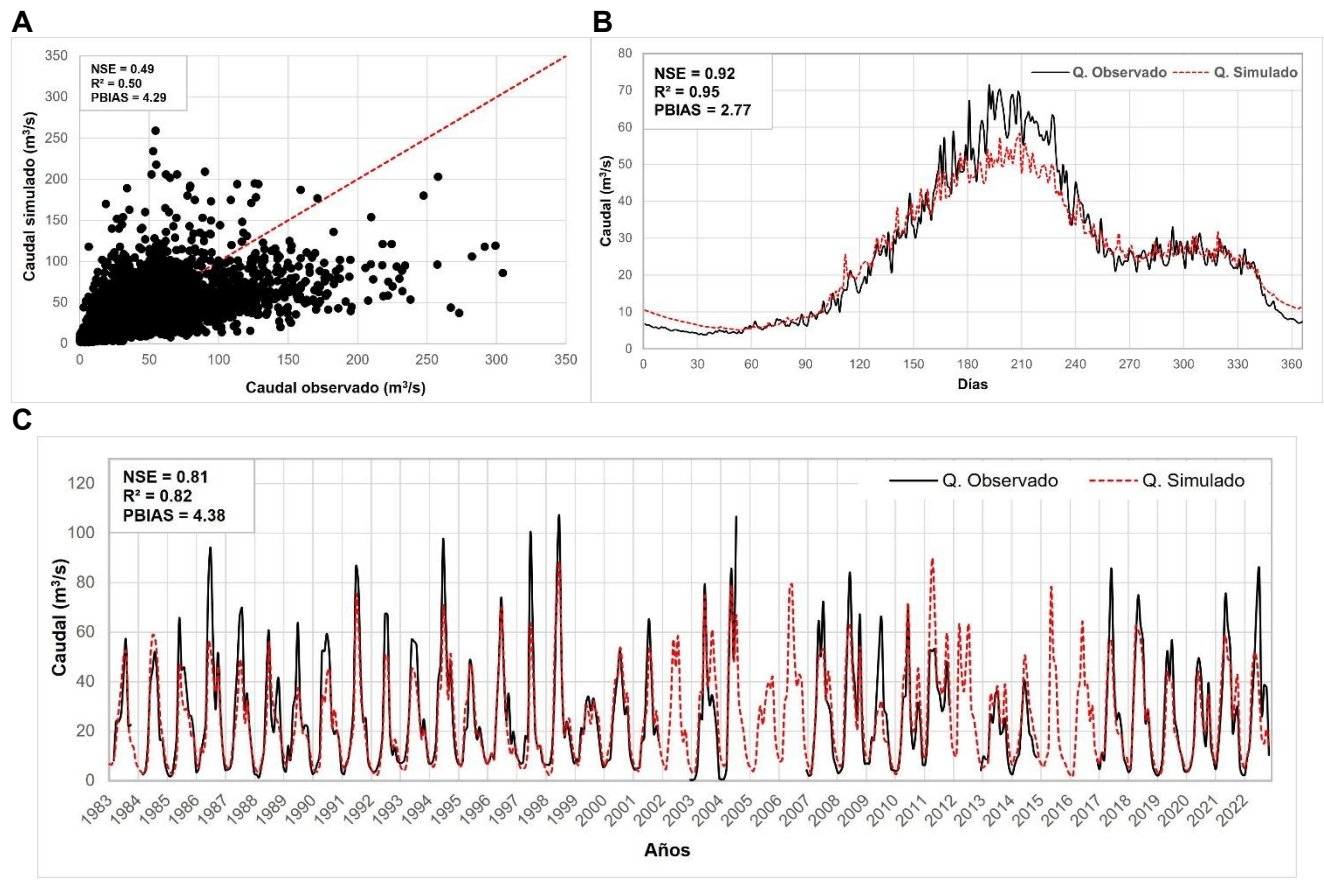


Figura 6.59. Comparación de caudales observados y simulados en SWAT (periodo de simulación: 1983-2022), usando datos de precipitación observada y UCS del año 2000. A) Diagrama de dispersión de los caudales diarios observados y simulados. B) Hidrograma interanual de los caudales diarios observados y simulados. C) Hidrogramas mensuales de los caudales observados y simulados.

6.5.2.1.2. Uso y cobertura del suelo - año 2018

En la Tabla 6-35, se presenta el caudal medio diario interanual observado ($25.99 \text{ m}^3/\text{s}$) y simulado con SWAT ($25.02 \text{ m}^3/\text{s}$) para el periodo 1983-2022, a partir de los datos de precipitación observada y para el mapa de uso y cobertura del suelo del año 2018, el caudal simulado presenta una subestimación del -3.73 % con respecto al caudal observado.

Con respecto a los caudales medios mensuales observados y simulados con SWAT (periodo 1983-2022), presentados en la Tabla 6-36, se evidencia una subestimación de los meses más caudalosos (junio, julio y agosto), el resto de meses presentan una leve



sobreestimación a excepción de febrero y octubre, donde se presenta una leve subestimación del caudal.

Tabla 6-35. Caudal medio diario interanual observado y simulado con SWAT (periodo 1983-2022) - Modelación con datos de precipitación observados (UCS 2018)

Caudal observado (m ³ /s)	Caudal simulado (m ³ /s)
25.99	25.02

Tabla 6-36. Caudales medios mensuales observados y simulados con SWAT (periodo 1983-2022) - Modelación con datos de precipitación observados (UCS 2018)

Mes	Q. Observado (m ³ /s)	Q. Simulado (m ³ /s)	Δ (%)
Enero	5.24	6.72	28.21
Febrero	4.64	4.49	-3.21
Marzo	6.75	6.93	2.61
Abril	13.29	15.83	19.07
Mayo	27.83	31.44	12.98
Junio	46.49	44.46	-4.38
Julio	61.78	51.32	-16.92
Agosto	52.27	43.83	-16.15
Septiembre	27.21	28.43	4.51
Octubre	25.92	25.39	-2.03
Noviembre	25.25	25.33	0.32
Diciembre	12.75	14.81	16.16

Los caudales simulados y observados en el periodo de simulación (Figura 6.60) mostraron un buen ajuste a un paso de tiempo mensual, obteniéndose un NSE de 0.81 (muy bueno) y a nivel diario interanual un NSE de 0.92 (muy bueno). En general, se puede observar una subestimación en los meses más caudalosos, a excepción de los años 1984, 1995 y 2000; los meses menos caudalosos presentaron una leve sobreestimación en la mayoría de los años.

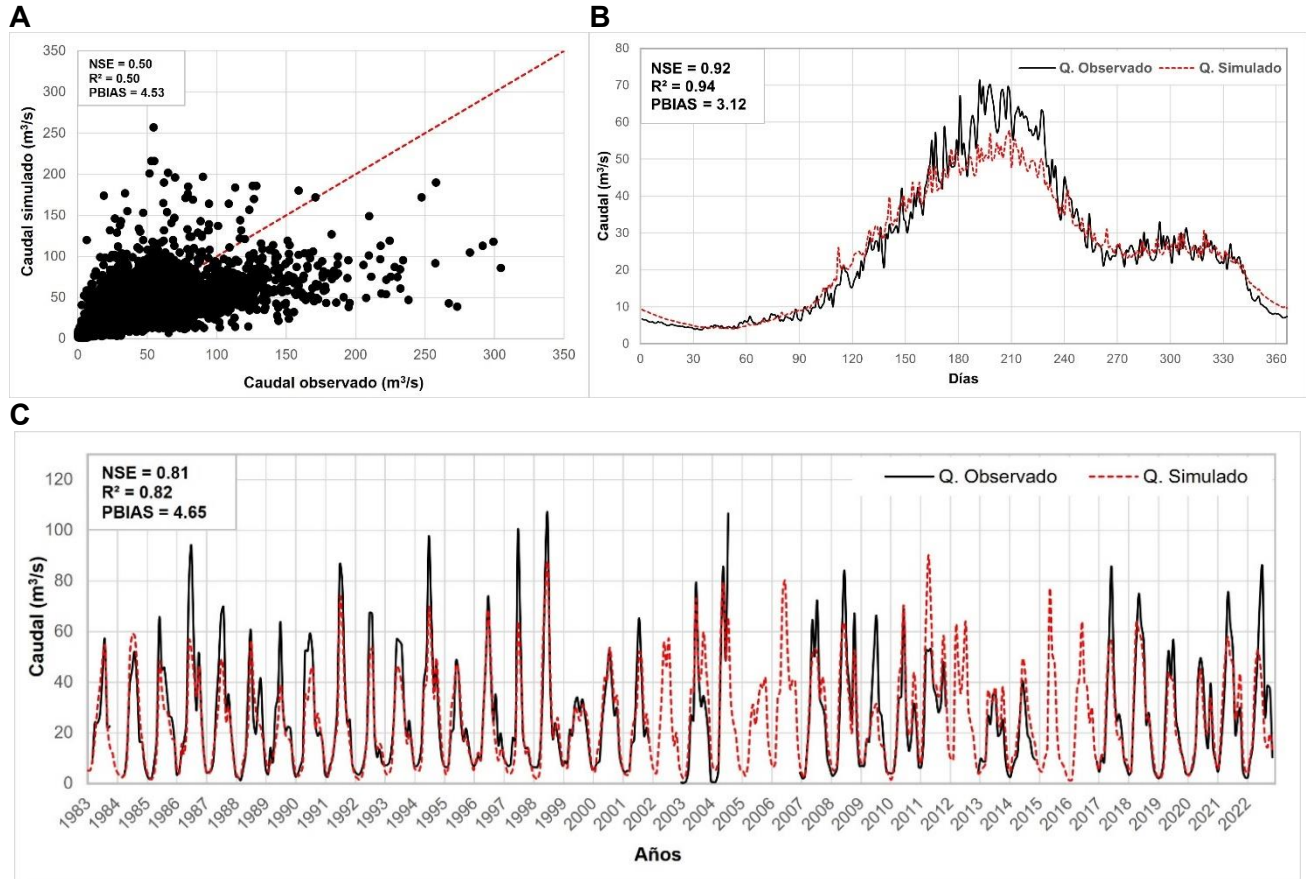


Figura 6.60. Comparación de caudales observados y simulados en SWAT (periodo de simulación: 1983-2022), usando datos de precipitación observada y UCS del año 2018. A) Diagrama de dispersión de los caudales diarios observados y simulados. B) Hidrograma interanual de los caudales diarios observados y simulados. C) Hidrogramas mensuales de los caudales observados y simulados.

6.5.2.1.3. Uso y cobertura del suelo - año 2050

En la Tabla 6-37, se presenta el caudal medio diario interanual observado ($25.99 \text{ m}^3/\text{s}$) y simulado con SWAT ($25.16 \text{ m}^3/\text{s}$) para el periodo 1983-2022, a partir de los datos de precipitación observada y para el mapa de uso y cobertura del suelo del año 2050, el caudal simulado presenta una subestimación del -3.2 % con respecto al caudal observado.

Con respecto a los caudales medios mensuales observados y simulados con SWAT (periodo 1983-2022), presentados en la Tabla 6-38, se evidencia una subestimación de los meses más caudalosos (junio, julio y agosto), el resto de meses presentan una leve



sobreestimación a excepción de febrero y octubre, donde se presenta una leve subestimación del caudal.

Tabla 6-37. Caudal medio diario interanual observado y simulado con SWAT (periodo 1983-2022) - Modelación con datos de precipitación observados (UCS 2050)

Caudal observado (m ³ /s)	Caudal simulado (m ³ /s)
25.99	25.16

Tabla 6-38. Caudales medios mensuales observados y simulados con SWAT (periodo 1983-2022) - Modelación con datos de precipitación observados (UCS 2050)

Mes	Q. Observado (m ³ /s)	Q. Simulado (m ³ /s)	Δ (%)
Enero	5.24	6.85	30.79
Febrero	4.64	4.58	-1.32
Marzo	6.75	7.01	3.86
Abril	13.29	15.91	19.64
Mayo	27.83	31.47	13.11
Junio	46.49	44.54	-4.21
Julio	61.78	51.39	-16.82
Agosto	52.27	44.07	-15.70
Septiembre	27.21	28.69	5.43
Octubre	25.92	25.60	-1.23
Noviembre	25.25	25.51	1.03
Diciembre	12.75	15.04	17.95

Los caudales simulados y observados en el periodo de simulación (Figura 6.61) mostraron un buen ajuste a un paso de tiempo mensual, obteniéndose un NSE de 0.81 (muy bueno) y a nivel diario interanual un NSE de 0.92 (muy bueno). En general, se puede observar una subestimación en los meses más caudalosos, a excepción de los años 1984 y 2000 y el periodo 2010-2014. Los meses menos caudalosos presentaron una leve sobreestimación en la mayoría de los años.

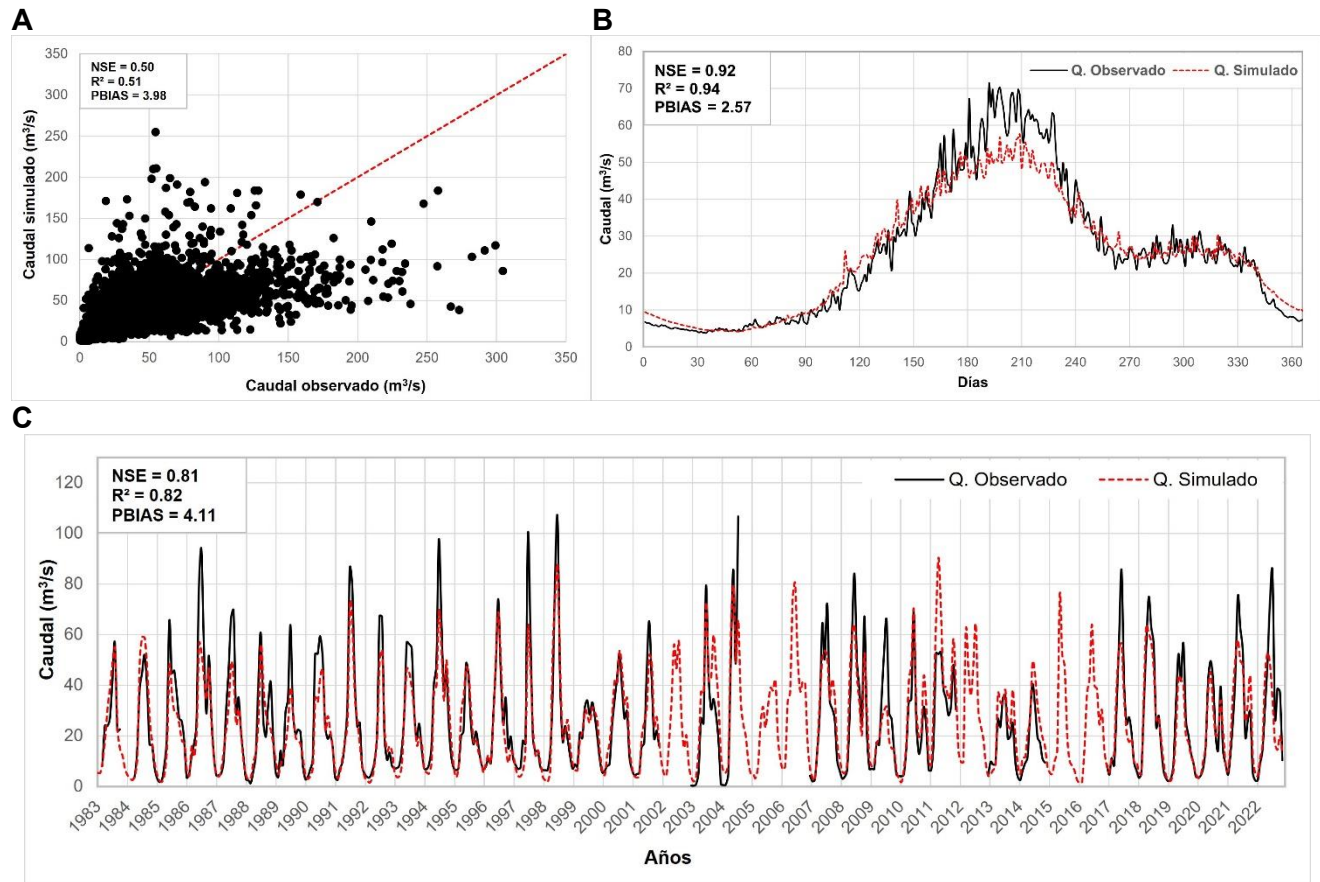


Figura 6.61. Comparación de caudales observados y simulados en SWAT (periodo de simulación: 1983-2022), usando datos de precipitación observada y UCS del año 2050. A) Diagrama de dispersión de los caudales diarios observados y simulados. B) Hidrograma interanual de los caudales diarios observados y simulados. C) Hidrogramas mensuales de los caudales observados y simulados.

6.5.2.1. Simulación con parámetros calibrados, usando datos de precipitación CHIRPS

En este numeral se presentan los resultados obtenidos en SWAT de las simulaciones con parámetros calibrados, a partir de los datos de precipitación CHIRPS y datos climatológicos ERA5, para cada mapa de UCS (años 2000, 2018 y 2050).

6.5.2.1.1. Uso y cobertura del suelo - año 2000

En la Tabla 6-39, se presenta el caudal medio diario interanual observado ($25.99 \text{ m}^3/\text{s}$) y simulado con SWAT ($23.18 \text{ m}^3/\text{s}$) para el periodo 1983-2022, a partir de los datos de



precipitación observada y para el mapa de uso y cobertura del suelo del año 2000, el caudal simulado presenta una subestimación del -10.8 % con respecto al caudal observado.

Con respecto a los caudales medios mensuales observados y simulados con SWAT (periodo 1983-2022), presentados en la Tabla 6-40, se evidencia una subestimación en la mayoría de los meses, sin embargo, los meses menos caudalosos (enero, febrero y diciembre) presentan sobreestimación.

Tabla 6-39. Caudal medio diario interanual observado y simulado con SWAT (periodo 1983-2022) - Modelación con datos de precipitación CHIRPS (UCS 2000)

Caudal observado (m ³ /s)	Caudal simulado (m ³ /s)
25.99	23.18

Tabla 6-40. Caudales medios mensuales observados y simulados con SWAT (periodo 1983-2022) - Modelación con datos de precipitación CHIRPS (UCS 2000)

Mes	Q. Observado (m ³ /s)	Q. Simulado (m ³ /s)	Δ (%)
Enero	5.24	7.71	47.09
Febrero	4.64	5.31	14.43
Marzo	6.75	6.42	-4.92
Abril	13.29	14.56	9.52
Mayo	27.83	27.80	-0.08
Junio	46.49	42.06	-9.53
Julio	61.78	44.03	-28.74
Agosto	52.27	38.49	-26.37
Septiembre	27.21	24.62	-9.53
Octubre	25.92	23.95	-7.61
Noviembre	25.25	25.99	2.89
Diciembre	12.75	16.21	27.14

Los caudales simulados y observados en el periodo de simulación (Figura 6.62) mostraron buen ajuste a un paso de tiempo mensual, obteniéndose un NSE de 0.74 (bueno) y a nivel diario interanual un NSE de 0.83 (muy bueno). En general, se puede observar una subestimación en los meses más caudalosos, a excepción del año 1984 y el periodo 2010-2013; los meses menos caudalosos presentan una leve sobreestimación en la mayoría de los años.

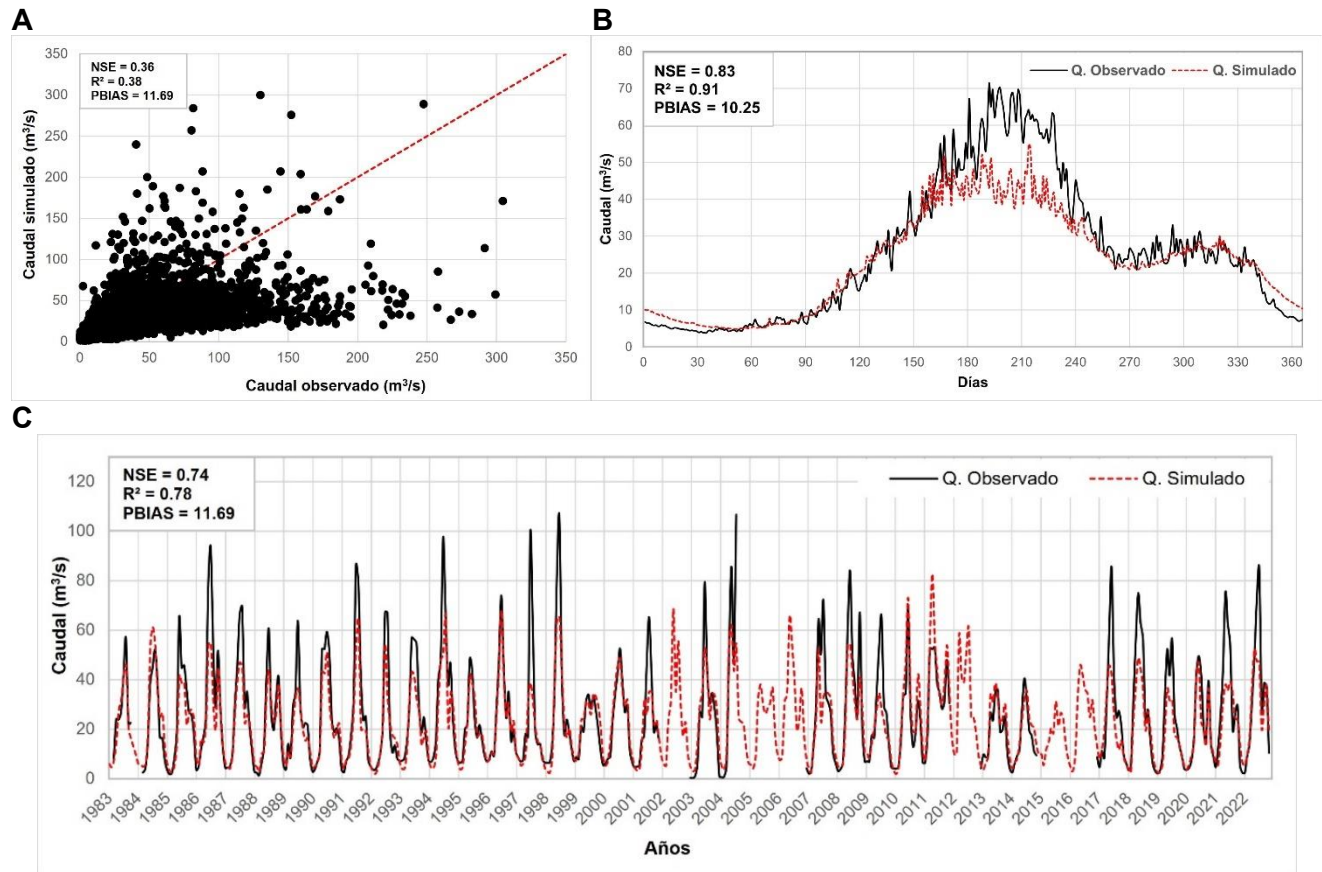


Figura 6.62. Comparación de caudales observados y simulados en SWAT (periodo de simulación: 1983-2022), usando datos de precipitación CHIRPS y UCS del año 2000. A) Diagrama de dispersión de los caudales diarios observados y simulados. B) Hidrograma interanual de los caudales diarios observados y simulados. C) Hidrogramas mensuales de los caudales observados y simulados.

6.5.2.1.2. Uso y cobertura del suelo - año 2018

En la Tabla 6-41, se presenta el caudal medio diario interanual observado ($25.99 \text{ m}^3/\text{s}$) y simulado con SWAT ($23.56 \text{ m}^3/\text{s}$) para el periodo 1983-2022, a partir de los datos de precipitación observada y para el mapa de uso y cobertura del suelo del año 2018, el caudal simulado presenta una subestimación del -9.35 % con respecto al caudal observado.

Con respecto a los caudales medios mensuales observados y simulados con SWAT (periodo 1983-2022), presentados en la Tabla 6-42, se evidencia una subestimación en la mayoría de los meses, sin embargo, los meses menos caudalosos (enero, febrero y diciembre) presentan sobreestimación.

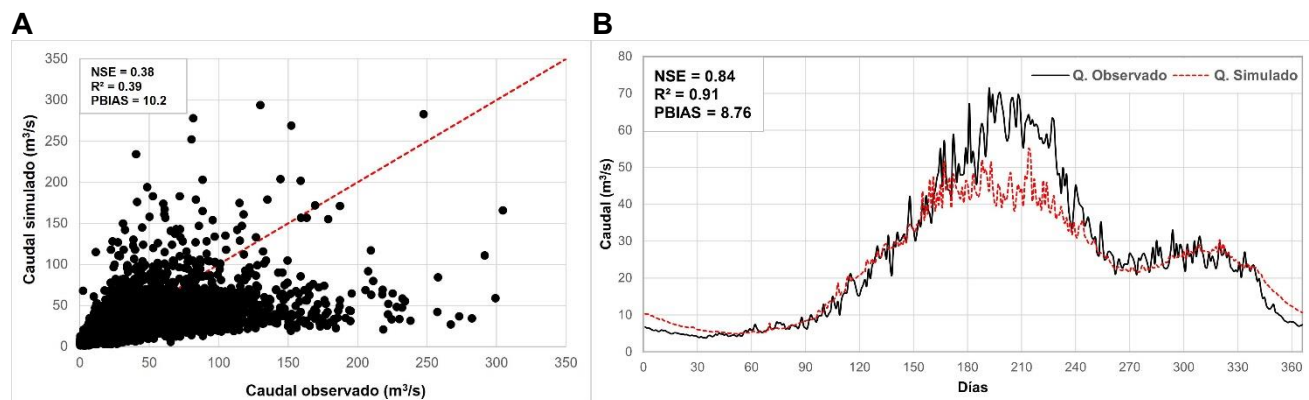
Tabla 6-41. Caudal medio diario interanual observado y simulado con SWAT (periodo 1983-2022) - Modelación con datos de precipitación CHIRPS (UCS 2018)

Caudal observado (m ³ /s)	Caudal simulado (m ³ /s)
25.99	23.56

Tabla 6-42. Caudales medios mensuales observados y simulados con SWAT (periodo 1983-2022) - Modelación con datos de precipitación CHIRPS (UCS 2018)

Mes	Q. Observado (m ³ /s)	Q. Simulado (m ³ /s)	Δ (%)
Enero	5.24	7.93	51.36
Febrero	4.64	5.45	17.33
Marzo	6.75	6.58	-2.65
Abril	13.29	14.92	12.23
Mayo	27.83	28.29	1.67
Junio	46.49	42.46	-8.68
Julio	61.78	44.43	-28.08
Agosto	52.27	39.01	-25.38
Septiembre	27.21	25.18	-7.45
Octubre	25.92	24.45	-5.68
Noviembre	25.25	26.45	4.74
Diciembre	12.75	16.59	30.11

Los caudales simulados y observados en el periodo de simulación (Figura 6.63) mostraron un buen ajuste a un paso de tiempo mensual, obteniéndose un NSE de 0.74 (bueno) y a nivel diario interanual un NSE de 0.84 (muy bueno). En general, se puede observar una subestimación en los meses más caudalosos, a excepción del año 1984 y el periodo 2010-2013. Los meses menos caudalosos presentaron una leve sobreestimación en la mayoría de los años.



C

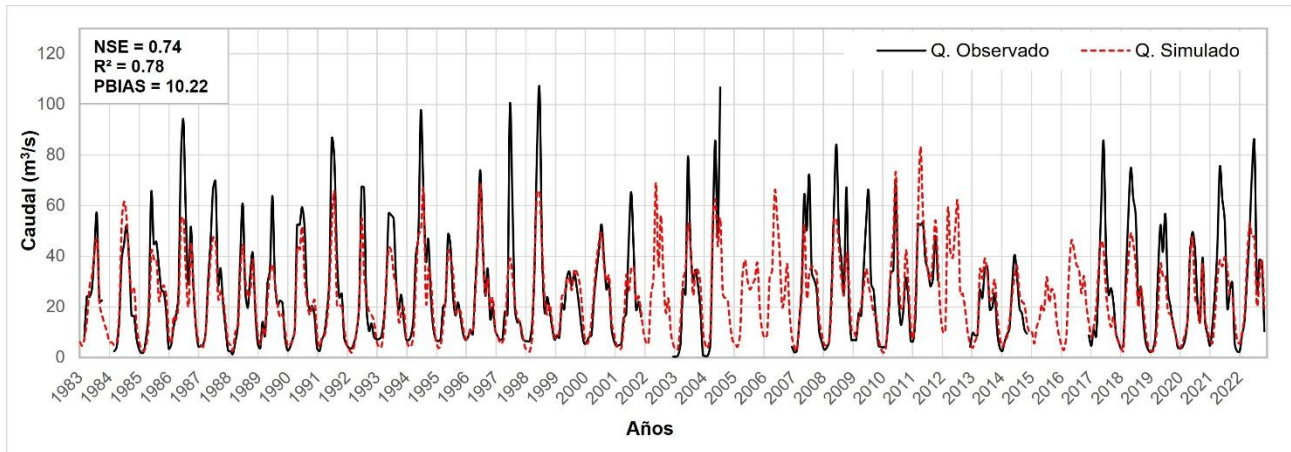


Figura 6.63. Comparación de caudales observados y simulados en SWAT (periodo de simulación: 1983-2022), usando datos de precipitación CHIRPS y UCS del año 2018. A) Diagrama de dispersión de los caudales diarios observados y simulados. B) Hidrograma interanual de los caudales diarios observados y simulados. C) Hidrogramas mensuales de los caudales observados y simulados.

6.5.2.1.3. Uso y cobertura del suelo - año 2050

En la Tabla 6-43, se presenta el caudal medio diario interanual observado ($25.99 \text{ m}^3/\text{s}$) y simulado con SWAT ($23.79 \text{ m}^3/\text{s}$) para el periodo 1983-2022, a partir de los datos de precipitación observada y para el mapa de uso y cobertura del suelo del año 2050, el caudal simulado presenta una subestimación del -8.46 % con respecto al caudal observado.

Con respecto a los caudales medios mensuales observados y simulados con SWAT (periodo 1983-2022), presentados en la Tabla 6-44, se evidencia una subestimación en la mayoría de los meses, sin embargo, los meses menos caudalosos (enero, febrero y diciembre) presentan una leve sobreestimación.

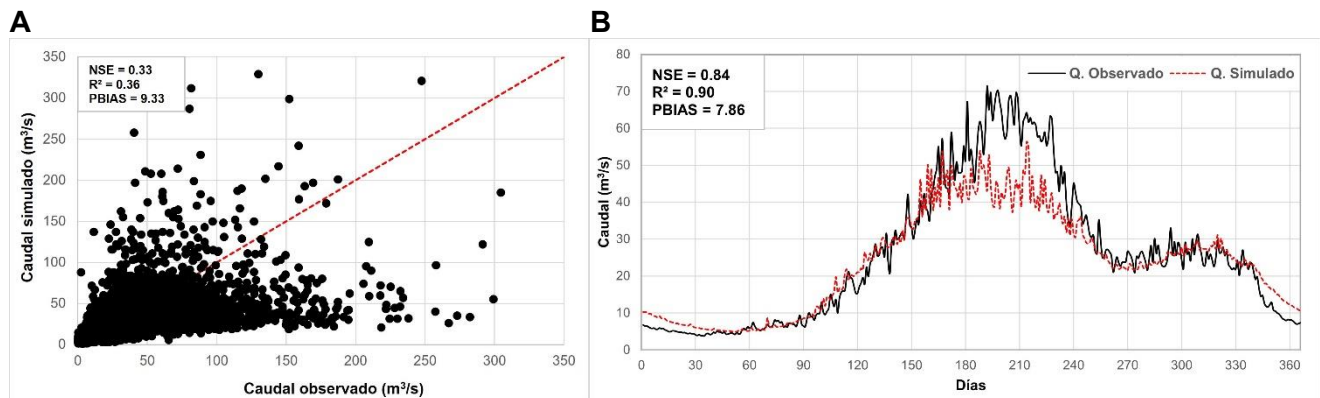
Tabla 6-43. Caudal medio diario interanual observado y simulado con SWAT (periodo 1983-2022) - Modelación con datos de precipitación CHIRPS (UCS 2050)

Caudal observado (m^3/s)	Caudal simulado (m^3/s)
25.99	23.79

Tabla 6-44. Caudales medios mensuales observados y simulados con SWAT (periodo 1983-2022) - Modelación con datos de precipitación CHIRPS (UCS 2050)

Mes	Q. Observado (m ³ /s)	Q. Simulado (m ³ /s)	Δ (%)
Enero	5.24	7.98	52.42
Febrero	4.64	5.52	18.90
Marzo	6.75	6.70	-0.82
Abril	13.29	15.36	15.50
Mayo	27.83	28.95	4.04
Junio	46.49	43.21	-7.06
Julio	61.78	44.67	-27.70
Agosto	52.27	38.95	-25.49
Septiembre	27.21	25.08	-7.83
Octubre	25.92	24.75	-4.52
Noviembre	25.25	26.76	5.96
Diciembre	12.75	16.61	30.28

Los caudales simulados y observados en el periodo de simulación (Figura 6.64) mostraron un buen ajuste a un paso de tiempo mensual, obteniéndose un NSE de 0.75 (bueno) y a nivel diario interanual un NSE de 0.84 (muy bueno). En general, se puede observar una subestimación en los meses más caudalosos, a excepción del año 1984 y el periodo 2010-2013. Los meses menos caudalosos presentaron una leve sobreestimación en la mayoría de los años.



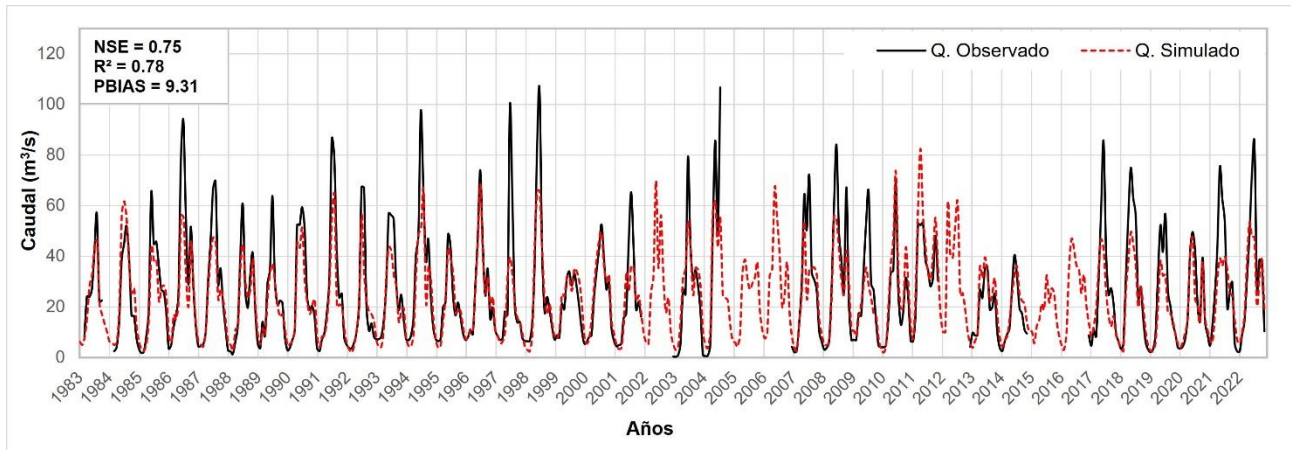
C


Figura 6.64. Comparación de caudales observados y simulados en SWAT (periodo de simulación: 1983-2022), usando datos de precipitación CHIRPS y UCS del año 2050. A) Diagrama de dispersión de los caudales diarios observados y simulados. B) Hidrograma interanual de los caudales diarios observados y simulados. C) Hidrogramas mensuales de los caudales observados y simulados.

6.6. Comparación de los modelos hidrológicos CEQUEAU y SWAT

En este apartado, se presenta la comparación de los resultados obtenidos con parámetros calibrados de los modelos hidrológicos CEQUEAU y SWAT, tanto para las simulaciones con datos de precipitación observada, como para las simulaciones con datos de precipitación CHIRPS y para los tres mapas de uso y cobertura del suelo.

6.6.1. Simulaciones a partir de datos de precipitación observada

En la Tabla 6-45, se presentan los caudales medios diarios interanuales observados y simulados con CEQUEAU y SWAT para el periodo 1983-2022, a partir de los datos de precipitación observada y para los tres mapas de UCS. Se evidencia que ambos modelos subestiman levemente el caudal, sin embargo, el modelo SWAT lo subestima un poco más.

Una excepción se presenta en la simulación realizada con el mapa de UCS del año 2050 con el modelo CEQUEAU, en donde el caudal simulado si supera al caudal observado.



Tabla 6-45. Caudales medios diarios interanuales observados y simulados con CEQUEAU y SWAT (periodo 1983-2022) - Precipitación observada

Mapa UCS	Caudal observado (m ³ /s)	Caudal simulado con CEQUEAU (m ³ /s)	Caudal simulado con SWAT(m ³ /s)
2000	25.99	25.63	25.11
2018	25.99	25.92	25.02
2050	25.99	26.08	25.16

En la Tabla 6-46, se presentan los caudales medios mensuales observados y simulados con CEQUEAU y SWAT para el periodo 1983-2022, de manera general se observa que ambos modelos subestiman los caudales más altos y sobreestiman los caudales más bajos, sin embargo, en los meses más caudalosos el modelo CEQUEAU simula caudales mayores que SWAT y en los meses menos caudalosos, el modelo SWAT simula caudales mayores que CEQUEAU, para el caso de algunos meses que presentan caudales medios, como septiembre, octubre y noviembre, el modelo SWAT simula caudales más cercanos a los observados que CEQUEAU.

Tabla 6-46. Caudales medios mensuales observados y simulados con CEQUEAU y SWAT (periodo 1983-2022) - Precipitación observada

Mapa UCS	Mes	Caudal observado (m ³ /s)	Caudal simulado con CEQUEAU (m ³ /s)	Caudal simulado con SWAT(m ³ /s)
2000	Enero	5.24	6.01	8.22
	Febrero	4.64	3.34	5.78
	Marzo	6.75	4.86	7.11
	Abril	13.29	13.81	15.00
	Mayo	27.83	30.23	30.14
	Junio	46.49	46.56	43.99
	Julio	61.78	54.34	51.28
	Agosto	52.27	46.89	43.33
	Septiembre	27.21	30.55	28.27
	Octubre	25.92	28.42	26.18
	Noviembre	25.25	26.96	25.71
	Diciembre	12.75	14.14	15.14
2018	Enero	5.24	6.05	6.72
	Febrero	4.64	3.37	4.49
	Marzo	6.75	4.95	6.93
	Abril	13.29	14.10	15.83
	Mayo	27.83	30.77	31.44
	Junio	46.49	47.07	44.46
	Julio	61.78	54.78	51.32
	Agosto	52.27	47.26	43.83
	Septiembre	27.21	30.89	28.43



Mapa UCS	Mes	Caudal observado (m ³ /s)	Caudal simulado con CEQUEAU (m ³ /s)	Caudal simulado con SWAT(m ³ /s)
	Octubre	25.92	28.80	25.39
	Noviembre	25.25	27.29	25.33
	Diciembre	12.75	14.27	14.81
2050	Enero	5.24	6.07	6.85
	Febrero	4.64	3.39	4.58
	Marzo	6.75	5.01	7.01
	Abril	13.29	14.26	15.91
	Mayo	27.83	31.05	31.47
	Junio	46.49	47.33	44.54
	Julio	61.78	55.00	51.39
	Agosto	52.27	47.45	44.07
	Septiembre	27.21	31.06	28.69
	Octubre	25.92	29.00	25.60
	Noviembre	25.25	27.47	25.51
	Diciembre	12.75	14.34	15.04

6.6.2. Simulaciones a partir de datos de precipitación CHIRPS

En la Tabla 6-47, se presentan los caudales medios diarios interanuales observados y simulados con CEQUEAU y SWAT para el periodo 1983-2022, a partir de los datos de precipitación CHIRPS y para los tres mapas de UCS. Se evidencia que ambos modelos subestiman el caudal, sin embargo, el modelo SWAT lo subestima un poco más.

Tabla 6-47. Caudales medios diarios interanuales observados y simulados con CEQUEAU y SWAT (periodo 1983-2022) - Precipitación CHIRPS

Mapa UCS	Caudal observado (m ³ /s)	Caudal simulado con CEQUEAU (m ³ /s)	Caudal simulado con SWAT(m ³ /s)
2000	25.99	24.58	23.18
2018	25.99	24.87	23.56
2050	25.99	25.02	23.79

En la Tabla 6-48, se presentan los caudales medios mensuales observados y simulados con CEQUEAU y SWAT para el periodo 1983-2022, de manera general se observa que ambos modelos subestiman los caudales más altos y sobreestiman los caudales más bajos, sin embargo, en los meses más caudalosos el modelo CEQUEAU simula caudales mayores que SWAT y en los meses menos caudalosos, el modelo SWAT simula caudales mayores que CEQUEAU.



Tabla 6-48. Caudales medios mensuales observados y simulados con CEQUEAU y SWAT (periodo 1983-2022) - Precipitación CHIRPS

Mapa UCS	Mes	Caudal observado (m ³ /s)	Caudal simulado con CEQUEAU (m ³ /s)	Caudal simulado con SWAT(m ³ /s)
2000	Enero	5.24	7.25	7.71
	Febrero	4.64	3.78	5.31
	Marzo	6.75	3.95	6.42
	Abril	13.29	14.35	14.56
	Mayo	27.83	30.30	27.80
	Junio	46.49	45.06	42.06
	Julio	61.78	46.94	44.03
	Agosto	52.27	41.42	38.49
	Septiembre	27.21	27.96	24.62
	Octubre	25.92	29.69	23.95
	Noviembre	25.25	29.83	25.99
	Diciembre	12.75	16.63	16.21
2018	Enero	5.24	7.28	7.93
	Febrero	4.64	3.79	5.45
	Marzo	6.75	3.99	6.58
	Abril	13.29	14.54	14.92
	Mayo	27.83	30.58	28.29
	Junio	46.49	45.28	42.46
	Julio	61.78	47.14	44.43
	Agosto	52.27	41.60	39.01
	Septiembre	27.21	28.13	25.18
	Octubre	25.92	29.92	24.45
	Noviembre	25.25	30.01	26.45
	Diciembre	12.75	16.70	16.59
2050	Enero	5.24	7.25	7.98
	Febrero	4.64	3.78	5.52
	Marzo	6.75	3.95	6.70
	Abril	13.29	14.35	15.36
	Mayo	27.83	30.30	28.95
	Junio	46.49	45.06	43.21
	Julio	61.78	46.94	44.67
	Agosto	52.27	41.42	38.95
	Septiembre	27.21	27.96	25.08
	Octubre	25.92	29.69	24.75
	Noviembre	25.25	29.83	26.76
	Diciembre	12.75	16.63	16.61



6.6.3. Criterios estadísticos de evaluación de los modelos CEQUEAU y SWAT

Los criterios estadísticos a nivel mensual por año presentados en el Anexo E, para el periodo 1983-2022, en resumen, arrojaron lo siguiente, según los rangos de eficiencia recomendados por Moriasi et al. (2015):

En la Tabla 6-49, Tabla 6-50 y Tabla 6-51 se presenta en porcentaje la eficiencia de los modelos con base en los criterios estadísticos para las simulaciones en CEQUEAU y SWAT (periodo 1983-2022) realizadas a partir de los datos de precipitación observada y los mapas de UCS del año 2000, 2018 y 2050 respectivamente, en donde se observa que, para el modelo CEQUEAU, el NSE en la mayoría de los años (70.6 %) fue superior a 0.80 (muy bueno); en el 94.1 % de los años, el R^2 fue superior al 0.85 (muy bueno) y en promedio el PBIAS fue insatisfactorio en el 40 % de los años; para el modelo SWAT, en promedio el NSE en el 64 % de los años fue superior a 0.80 (muy bueno); el R^2 fue superior al 0.85 (muy bueno) en el 88.2 % de los años y el PBIAS en promedio fue insatisfactorio en el 48.55 % de los años.

La eficiencia de ambos modelos fue bastante similar, sin embargo, el modelo CEQUEAU mostró mayores porcentajes de años calificados como “muy bueno” y “bueno”.

Tabla 6-49. Eficiencia de los modelos en porcentaje de años para las simulaciones en CEQUEAU y SWAT realizadas a partir de los datos de precipitación observada y el mapa de UCS del año 2000

Eficiencia	Modelo CEQUEAU			Modelo SWAT		
	NSE	R ²	PBIAS	NSE	R ²	PBIAS
Muy bueno	70.6 %	94.1 %	0.0 %	61.8 %	88.2 %	17.6 %
Bueno	14.7 %	5.9 %	38.2 %	20.6 %	8.8 %	17.6 %
Satisfactorio	8.8 %	0.0 %	20.6 %	14.7 %	0.0 %	14.7 %
Insatisfactorio	5.9 %	0.0 %	41.2 %	2.9 %	2.9 %	50.0 %

Nota: Los valores en porcentaje (%) hacen referencia al porcentaje de años del periodo de simulación (1983-2022) que presentaron las diferentes eficiencias para cada criterio estadístico.



Tabla 6-50. Eficiencia de los modelos en porcentaje de años para las simulaciones en CEQUEAU y SWAT realizadas a partir de los datos de precipitación observada y el mapa de UCS del año 2018

Eficiencia	Modelo CEQUEAU			Modelo SWAT		
	NSE	R ²	PBIAS	NSE	R ²	PBIAS
Muy bueno	70.6%	94.1%	23.5%	64.7%	88.2%	23.5%
Bueno	14.7%	5.9%	14.7%	17.6%	8.8%	11.8%
Satisfactorio	8.8%	0.0%	20.6%	14.7%	0.0%	17.6%
Insatisfactorio	5.9%	0.0%	41.2%	2.9%	2.9%	47.1%

Nota: Los valores en porcentaje (%) hacen referencia al porcentaje de años del periodo de simulación (1983-2022) que presentaron las diferentes eficiencias para cada criterio estadístico.

Tabla 6-51. Eficiencia de los modelos en porcentaje de años para las simulaciones en CEQUEAU y SWAT realizadas a partir de los datos de precipitación observada y el mapa de UCS del año 2050

Eficiencia	Modelo CEQUEAU			Modelo SWAT		
	NSE	R ²	PBIAS	NSE	R ²	PBIAS
Muy bueno	70.6%	94.1%	26.5%	64.7%	88.2%	23.5%
Bueno	14.7%	5.9%	11.8%	17.6%	8.8%	14.7%
Satisfactorio	8.8%	0.0%	23.5%	14.7%	0.0%	14.7%
Insatisfactorio	5.9%	0.0%	38.2%	2.9%	2.9%	47.1%

Nota: Los valores en porcentaje (%) hacen referencia al porcentaje de años del periodo de simulación (1983-2022) que presentaron las diferentes eficiencias para cada criterio estadístico.

En la Tabla 6-52, Tabla 6-53 y Tabla 6-54 se presenta en porcentaje la eficiencia de los modelos con base en los criterios estadísticos para las simulaciones en CEQUEAU y SWAT (periodo 1983-2022) realizadas a partir de los datos de precipitación CHIRPS y los mapas de UCS del año 2000, 2018 y 2050 respectivamente, en donde se observa que, para el modelo CEQUEAU, en promedio en el 40 % de los años el NSE fue superior a 0.80 (muy bueno); en el 51 % de los años, el R² fue superior al 0.85 (muy bueno) y en promedio el PBIAS fue insatisfactorio en el 50 % de los años; para el modelo SWAT, en promedio el NSE en el 35 % de los años fue superior a 0.80 (muy bueno), el R² fue superior al 0.85 (muy bueno) en el 64 % de los años y el PBIAS en promedio fue insatisfactorio en el 59 % de los años.

La eficiencia de ambos modelos fue similar, sin embargo, el modelo SWAT mostró mayores porcentajes de años calificados como “muy bueno” y “bueno”.



Tabla 6-52. Eficiencia de los modelos en porcentaje de años para las simulaciones en CEQUEAU y SWAT realizadas a partir de los datos de precipitación CHIRPS y el mapa de UCS del año 2000

Eficiencia	Modelo CEQUEAU			Modelo SWAT		
	NSE	R ²	PBIAS	NSE	R ²	PBIAS
Muy bueno	38.2%	52.9%	14.7%	32.4%	64.7%	8.8%
Bueno	17.6%	29.4%	20.6%	44.1%	23.5%	11.8%
Satisfactorio	32.4%	14.7%	17.6%	20.6%	11.8%	17.6%
Insatisfactorio	11.8%	2.9%	47.1%	2.9%	0.0%	61.8%

Nota: Los valores en porcentaje (%) hacen referencia al porcentaje de años del periodo de simulación (1983-2022) que presentaron las diferentes eficiencias para cada criterio estadístico.

Tabla 6-53. Eficiencia de los modelos en porcentaje de años para las simulaciones en CEQUEAU y SWAT realizadas a partir de los datos de precipitación CHIRPS y el mapa de UCS del año 2018

Eficiencia	Modelo CEQUEAU			Modelo SWAT		
	NSE	R ²	PBIAS	NSE	R ²	PBIAS
Muy bueno	41.2%	50.0%	17.6%	35.3%	61.8%	11.8%
Bueno	14.7%	32.4%	17.6%	41.2%	26.5%	8.8%
Satisfactorio	32.4%	14.7%	11.8%	20.6%	11.8%	23.5%
Insatisfactorio	11.8%	2.9%	52.9%	2.9%	0.0%	55.9%

Nota: Los valores en porcentaje (%) hacen referencia al porcentaje de años del periodo de simulación (1983-2022) que presentaron las diferentes eficiencias para cada criterio estadístico.

Tabla 6-54. Eficiencia de los modelos en porcentaje de años para las simulaciones en CEQUEAU y SWAT realizadas a partir de los datos de precipitación CHIRPS y el mapa de UCS del año 2050

Eficiencia	Modelo CEQUEAU			Modelo SWAT		
	NSE	R ²	PBIAS	NSE	R ²	PBIAS
Muy bueno	41.2%	50.0%	20.6%	38.2%	64.7%	11.8%
Bueno	14.7%	29.4%	14.7%	38.2%	23.5%	8.8%
Satisfactorio	32.4%	14.7%	11.8%	20.6%	11.8%	20.6%
Insatisfactorio	11.8%	2.9%	52.9%	2.9%	0.0%	58.8%

Nota: Los valores en porcentaje (%) hacen referencia al porcentaje de años del periodo de simulación (1983-2022) que presentaron las diferentes eficiencias para cada criterio estadístico.



A continuación, en la Tabla 6-55, se presentan los criterios estadísticos de evaluación (NSE, R^2 y PBIAS) de los modelos CEQUEAU y SWAT a nivel mensual, a partir de los datos de precipitación observada y de CHIRPS y cada uno de los mapas de UCS.

El periodo de calibración en ambos modelos presento un mejor ajuste que el periodo de validación. Las simulaciones a partir de los datos de precipitación observada dieron mejores resultados con el modelo CEQUEAU, mientras que las simulaciones a partir de los datos de precipitación del producto CHIRPS dieron mejores resultados con el modelo SWAT. En general la eficiencia de las simulaciones de acuerdo con los criterios estadísticos fue “muy buena” y “buena”, a excepción de los resultados del PBIAS en las simulaciones con SWAT y los resultados del R^2 en el periodo de validación para ambos modelos, que se calificaron como “satisfactorios”.

Tabla 6-55. Criterios estadísticos de evaluación mensual de los modelos CEQUEAU y SWAT para los datos de precipitación observada y de CHIRPS y cada uno de los mapas de UCS (Años 2000, 2018 y 2050)

USO/COBERTURA DEL SUELO - AÑO 2000					
PERIODO	CRITERIO ESTADÍSTICO (MENSUAL)	MODELO CEQUEAU		MODELO SWAT	
		PRECIPITACIÓN OBSERVADA	PRECIPITACIÓN CHIRPS	PRECIPITACIÓN OBSERVADA	PRECIPITACIÓN CHIRPS
CALIBRACIÓN (1983-2008)	NSE	0.88	-	0.84	-
	R^2	0.88	-	0.86	-
	PBIAS	4.44	-	6.91	-
VALIDACIÓN (2009-2022)	NSE	0.78	-	0.74	-
	R^2	0.79	-	0.74	-
	PBIAS	-2.54	-	-0.93	-
SIMULACIÓN (1983-2022)	NSE	0.85	0.74	0.81	0.74
	R^2	0.85	0.75	0.82	0.78
	PBIAS	2.19	6.21	4.38	11.69

USO/COBERTURA DEL SUELO - AÑO 2018					
PERIODO	CRITERIO ESTADÍSTICO (MENSUAL)	MODELO CEQUEAU		MODELO SWAT	
		PRECIPITACIÓN OBSERVADA	PRECIPITACIÓN CHIRPS	PRECIPITACIÓN OBSERVADA	PRECIPITACIÓN CHIRPS
SIMULACIÓN (1983-2022)	NSE	0.85	0.74	0.81	0.74
	R^2	0.85	0.75	0.82	0.78
	PBIAS	1.05	5.08	4.65	10.22



USO/COBERTURA DEL SUELO - AÑO 2050					
PERIODO	CRITERIO ESTADÍSTICO (MENSUAL)	MODELO CEQUEAU		MODELO SWAT	
		PRECIPITACIÓN OBSERVADA	PRECIPITACIÓN CHIRPS	PRECIPITACIÓN OBSERVADA	PRECIPITACIÓN CHIRPS
SIMULACIÓN (1983-2008)	NSE	0.85	0.74	0.81	0.75
	R ²	0.85	0.75	0.82	0.78
	PBIAS	0.46	4.50	4.11	9.31

	Muy bueno
	Bueno
	Satisfactorio

6.6.4. Comparación gráfica de caudales mensuales observados y simulados con CEQUEAU y SWAT

En la Figura 6.65, Figura 6.66 y Figura 6.67 se representan gráficamente las comparaciones de caudales mensuales observados y simulados con CEQUEAU y SWAT para el periodo 1983-2022, simulaciones realizadas a partir de los datos de precipitación observada y para cada uno de los mapas de UCS (Años 2000, 2018 y 2050), respectivamente. Las simulaciones con ambos modelos fueron similares para todos los mapas de UCS, ambos modelos lograron representar el comportamiento de caudal en cuanto a la identificación de los meses con mayores y menores caudales, no obstante, se evidencia una diferencia en cuanto a que el modelo CEQUEAU subestima más los caudales menores que SWAT y sobreestima más los caudales mayores a comparación de SWAT, sin embargo, ninguno de los dos modelos logra representar de manera adecuada los caudales picos observados en la gran mayoría de los años del periodo simulado.

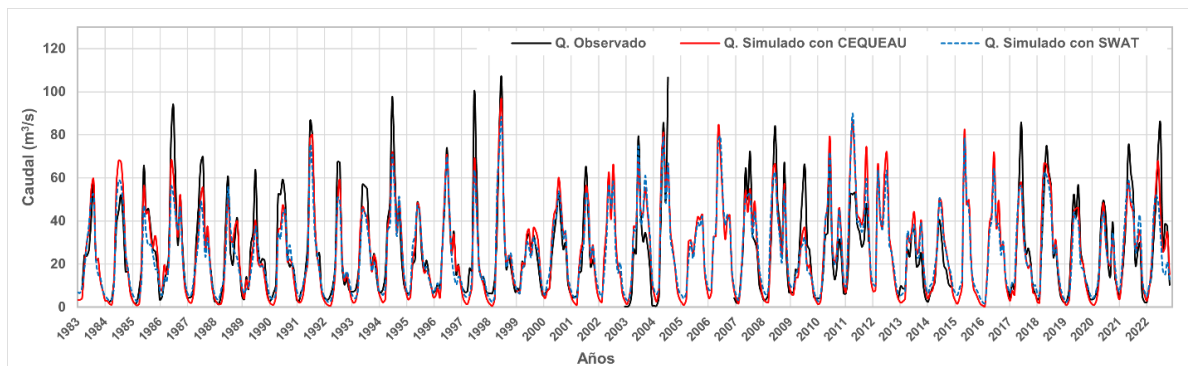


Figura 6.65. Comparación de caudales mensuales observados y simulados con CEQUEAU y SWAT para el periodo 1983-2022. Simulaciones realizadas a partir de los datos de precipitación observada y el mapa de UCS del año 2000

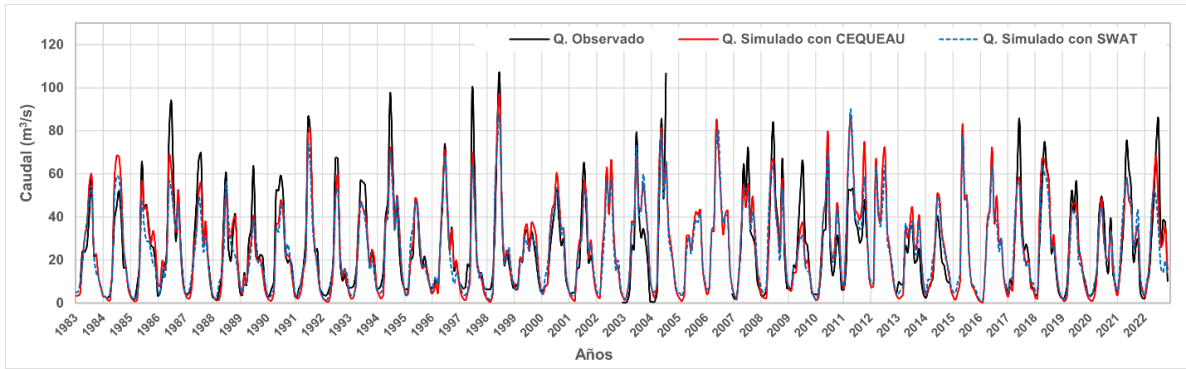


Figura 6.66. Comparación de caudales mensuales observados y simulados con CEQUEAU y SWAT para el periodo 1983-2022. Simulaciones realizadas a partir de los datos de precipitación observada y el mapa de UCS del año 2018

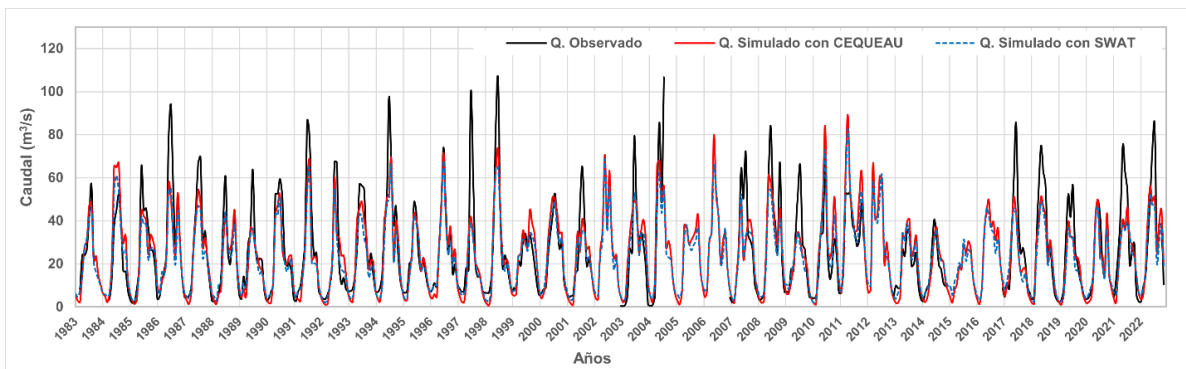


Figura 6.67. Comparación de caudales mensuales observados y simulados con CEQUEAU y SWAT para el periodo 1983-2022. Simulaciones realizadas a partir de los datos de precipitación observada y el mapa de UCS del año 2050

Como complemento de la comparación de los modelos, en la Figura 6.68, se presentan los diagramas de dispersión de caudales diarios simulados con CEQUEAU y SWAT, a partir de datos de precipitación observados y cada uno de los mapas de UCS, en donde para el mapa de UCS del año 2000 se obtuvo un coeficiente de determinación (R^2) de 0.72 y para los mapas de UCS de los años 2018 y 2050, se obtuvo un R^2 de 0.73.

Estos valores de coeficiente de determinación, sugieren que hay una correlación relativamente fuerte entre los dos conjuntos de datos, con aproximadamente el 72.6 % de la variabilidad en los datos de SWAT que puede ser explicada por los datos de CEQUEAU.

Sin embargo, hay una dispersión considerable de los puntos con valores de caudal diario más alto alrededor de la línea de tendencia, lo que indica que, aunque hay una correlación,

hay variabilidad que no es capturada por la relación lineal entre los dos conjuntos de datos. Esto podría deberse a varios factores, como diferencias en los supuestos de los modelos o variabilidad natural en los caudales que no se refleja en los modelos.

Por otro lado, en la Figura 6.69, se representan los diagramas de dispersión de caudales mensuales simulados con CEQUEAU y SWAT, a partir de datos de precipitación observados y cada una de los mapas de UCS, en donde para los tres mapas se obtuvo un coeficiente de determinación (R^2) de 0.96, lo cual indica una muy alta correlación lineal entre los resultados de ambos modelos. Esto significa que a nivel mensual los caudales simulados por el modelo CEQUEAU y el modelo SWAT están muy alineados y que uno puede predecir el otro con un alto grado de precisión. Un R^2 de 0.96 sugiere que el 96% de la variabilidad en los caudales simulados por SWAT puede ser explicada por los caudales simulados por CEQUEAU. La alta correlación aquí es un indicador de que ambos modelos están proporcionando resultados similares en términos de la simulación de caudales.

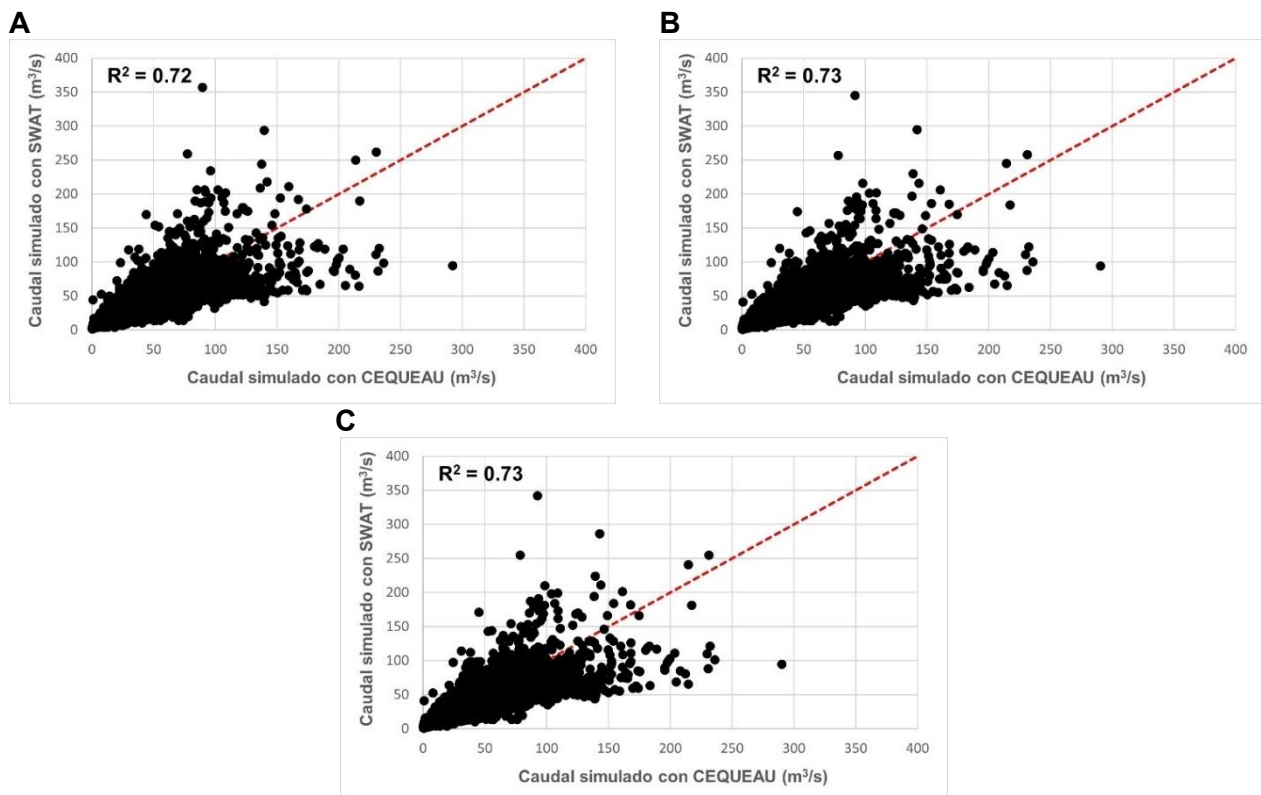


Figura 6.68. Diagramas de dispersión de caudales diarios simulados con CEQUEAU y SWAT, a partir de datos de precipitación observados. A) Mapa de UCS año 2000, B) Mapa de UCS año 2018, C) Mapa de UCS año 2050

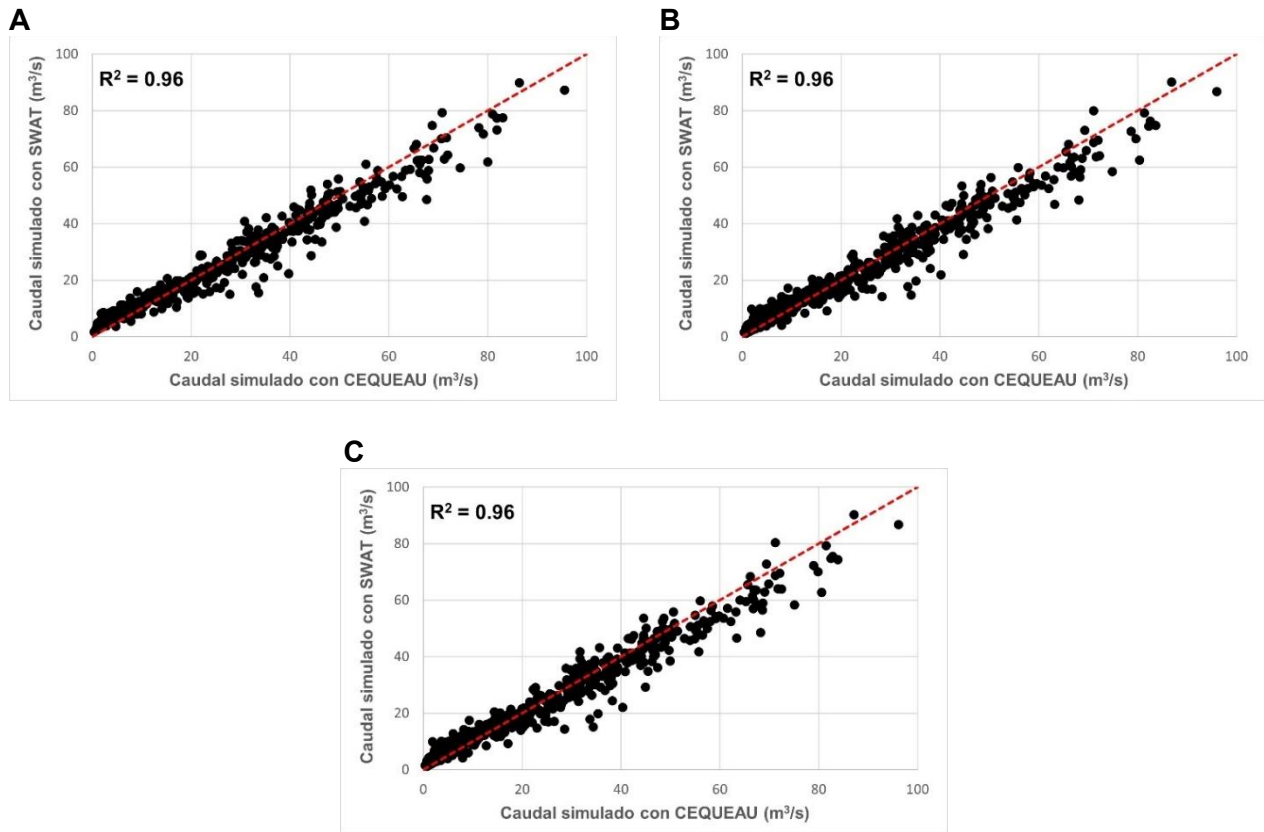


Figura 6.69. Diagramas de dispersión de caudales mensuales simulados con CEQUEAU y SWAT, a partir de datos de precipitación observados. A) Mapa de UCS año 2000, B) Mapa de UCS año 2018, C) Mapa de UCS año 2050

En la Figura 6.70, Figura 6.71 y Figura 6.72, se representan gráficamente las comparaciones de caudales mensuales observados y simulados con CEQUEAU y SWAT para el periodo 1983-2022, simulaciones realizadas a partir de los datos de precipitación CHIRPS y para cada uno de los mapas de UCS (Años 2000, 2018 y 2050), respectivamente. Las simulaciones con ambos modelos fueron similares para todos los mapas de UCS, ambos modelos lograron representar el comportamiento de caudal en cuanto a la identificación de los meses con mayores y menores caudales, no obstante, se evidencia una diferencia en cuanto a que el modelo CEQUEAU subestima más los caudales menores que SWAT y sobreestima más los caudales mayores a comparación de SWAT, sin embargo, ninguno de los dos modelos logra representar de manera adecuada los caudales picos observados en la gran mayoría de los años del periodo simulado.

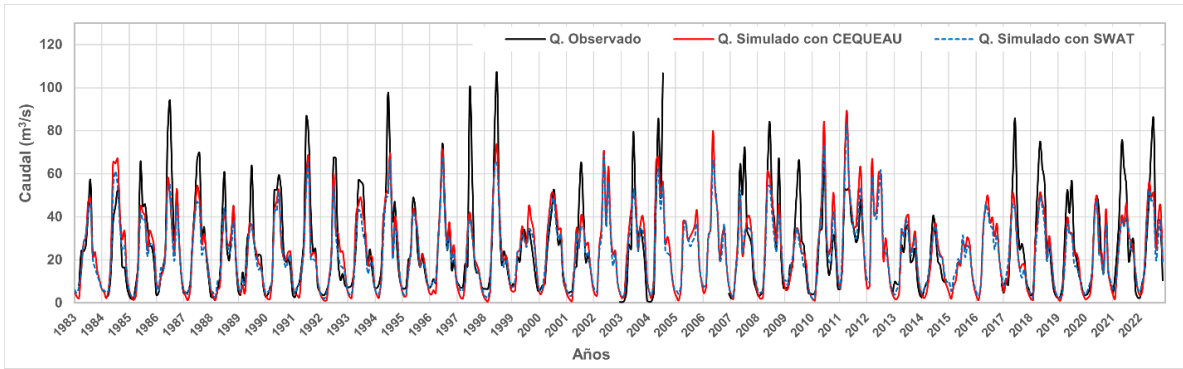


Figura 6.70. Comparación de caudales mensuales observados y simulados con CEQUEAU y SWAT para el periodo 1983-2022. Simulaciones realizadas a partir de los datos de precipitación CHIRPS y el mapa de UCS del año 2000

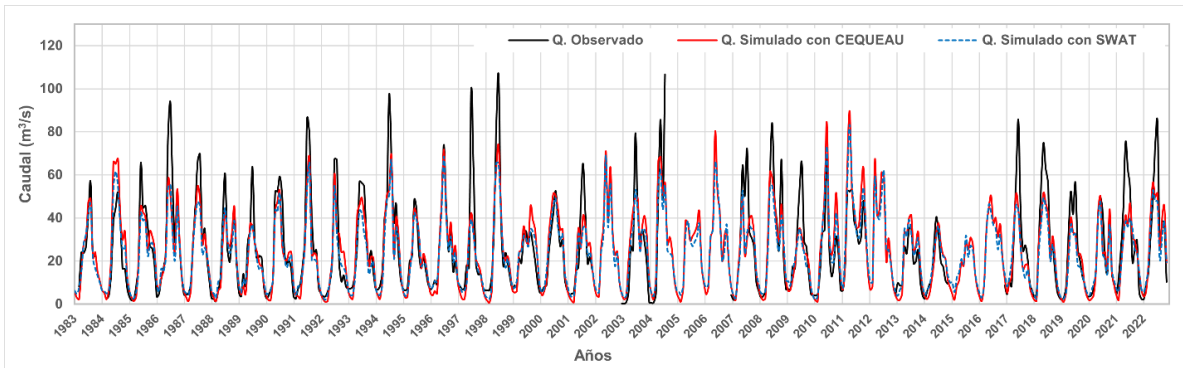


Figura 6.71. Comparación de caudales mensuales observados y simulados con CEQUEAU y SWAT para el periodo 1983-2022. Simulaciones realizadas a partir de los datos de precipitación CHIRPS y el mapa de UCS del año 2018

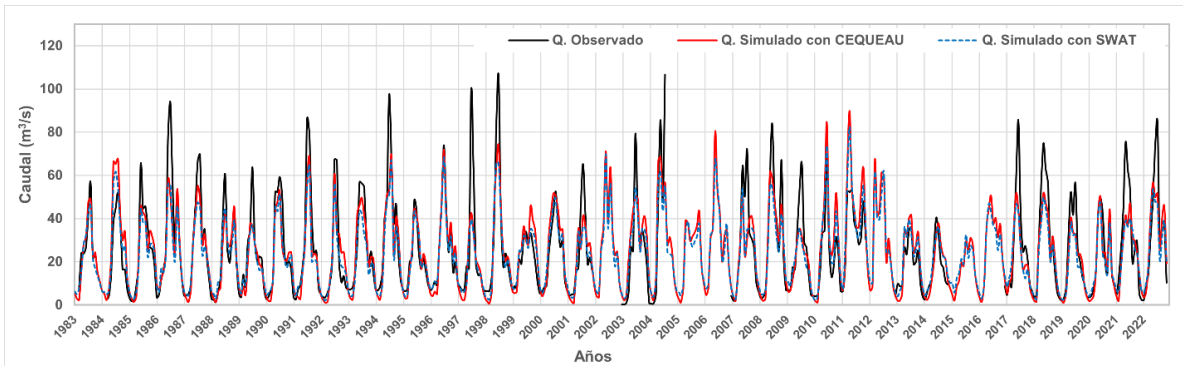


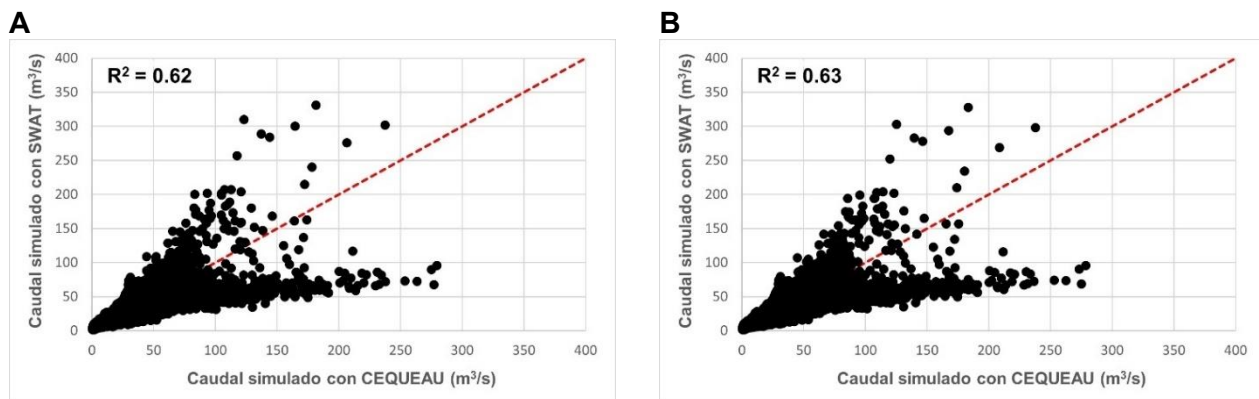
Figura 6.72. Comparación de caudales mensuales observados y simulados con CEQUEAU y SWAT para el periodo 1983-2022. Simulaciones realizadas a partir de los datos de precipitación CHIRPS y el mapa de UCS del año 2050



Como complemento de la comparación de los modelos, en la Figura 6.73, se presentan los diagramas de dispersión de caudales diarios simulados con CEQUEAU y SWAT, a partir de datos de precipitación CHIRPS y cada uno de los mapas de UCS, en donde para el mapa de UCS del año 2000 se obtuvo un coeficiente de determinación (R^2) de 0.62, para el mapa de UCS del año 2018 se obtuvo un R^2 de 0.63 y para el mapa de UCS del año 2050 se obtuvo un R^2 de 0.60.

Estos valores de coeficiente de determinación, sugieren que hay una correlación moderada entre los datos simulados, sin embargo, hay una dispersión considerable de los puntos con valores de caudal diario más alto alrededor de la línea de tendencia, lo que indica que, e tanto CEQUEAU como SWAT tienen dificultades para predecir eventos extremos con precisión.

Por otro lado, en la Figura 6.74 se representan los diagramas de dispersión de caudales mensuales simulados con CEQUEAU y SWAT, a partir de datos de precipitación CHIRPS y cada una de los mapas de UCS, en donde para los tres mapas se obtuvo un coeficiente de determinación (R^2) de 0.97, lo cual indica una muy alta correlación lineal entre los resultados de ambos modelos. Esto significa que a nivel mensual los caudales simulados por el modelo CEQUEAU y el modelo SWAT están muy alineados y que uno puede predecir el otro con un alto grado de precisión. Un R^2 de 0.97 sugiere que el 97% de la variabilidad en los caudales simulados por SWAT puede ser explicada por los caudales simulados por CEQUEAU. La alta correlación aquí es un indicador de que ambos modelos están proporcionando resultados similares en términos de la simulación de caudales.



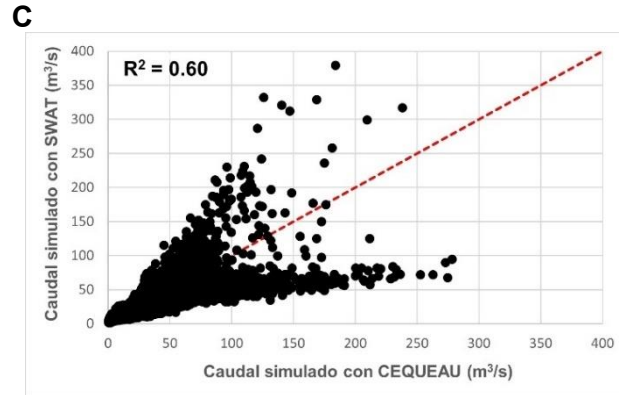


Figura 6.73. Diagramas de dispersión de caudales diarios simulados con CEQUEAU y SWAT, a partir de datos de precipitación CHIRPS. A) Mapa de UCS año 2000, B) Mapa de UCS año 2018, C) Mapa de UCS año 2050

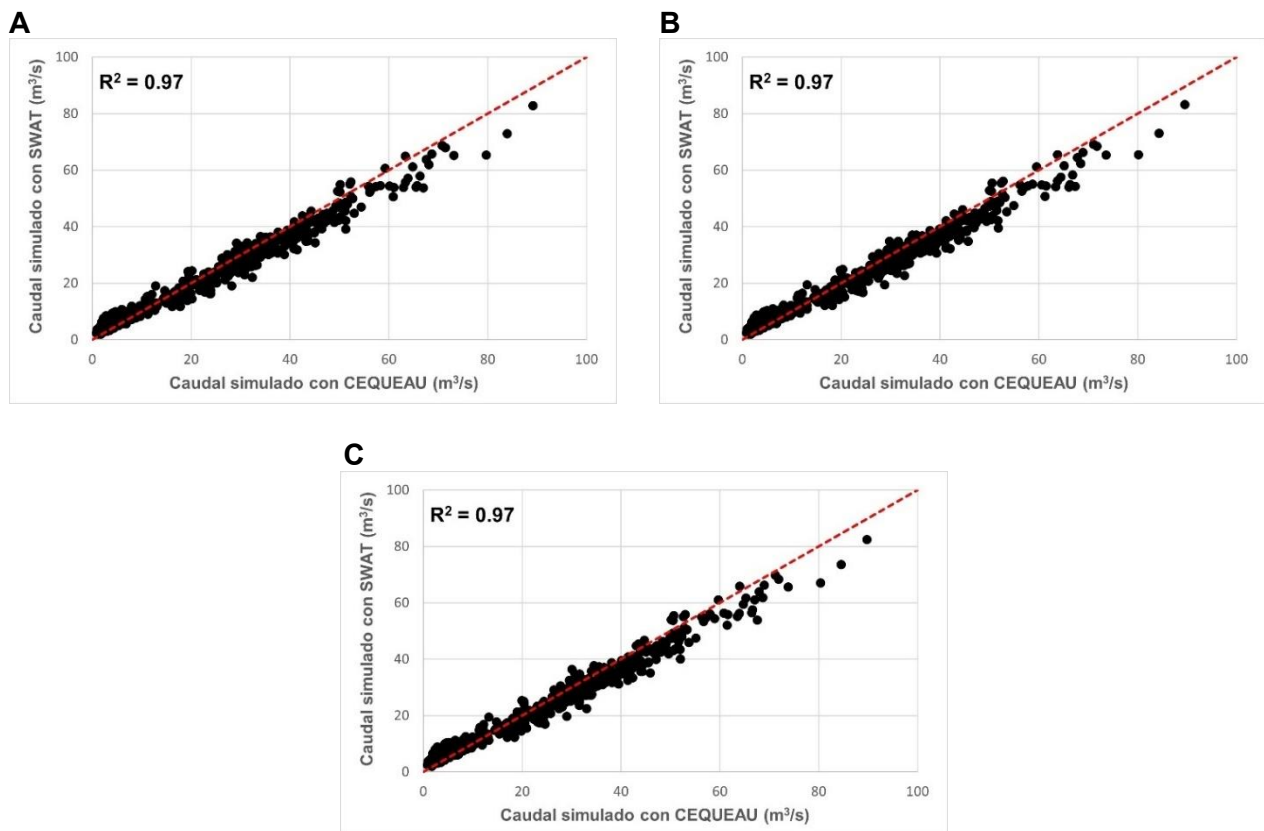


Figura 6.74. Diagramas de dispersión de caudales mensuales simulados con CEQUEAU y SWAT, a partir de datos de precipitación CHIRPS. A) Mapa de UCS año 2000, B) Mapa de UCS año 2018, C) Mapa de UCS año 2050

6.7. Impactos del uso y cobertura del suelo en el caudal de la cuenca

De acuerdo con los resultados obtenidos en las simulaciones y la comparación de los dos modelos hidrológicos, en donde se identificó que el modelo CEQUEAU mostró mejor eficiencia para representar los caudales a partir de los datos de precipitación observada y que SWAT mostró levemente una mejor eficiencia para representar los caudales a partir de los datos de precipitación del producto CHIRPS, para evaluar el impacto del uso y cobertura del suelo en el caudal de la cuenca, se analizaron dos escenarios: (1) A partir de las simulaciones realizadas con el modelo CEQUEAU utilizando datos de precipitación observada y (2) A partir de las simulaciones realizadas con el modelo SWAT utilizando datos de precipitación CHIRPS.

6.7.1. Impactos del uso y cobertura del suelo en el caudal de la cuenca a partir de las simulaciones en CEQUEAU con datos de precipitación observada

El caudal medio diario interanual simulado con CEQUEAU para el mapa de USC del año 2000, fue de 25.63 m³/s, para el mapa de UCS del año 2018 fue de 25.92 m³/s y para el mapa de UCS de año 2050 fue de 26.08 m³/s, como se presenta en la Figura 6.75. En términos de porcentaje de cambio promedio a nivel diario, durante el periodo 2000-2018, el caudal mostró un incremento del 1.14 % y para el periodo 2018-2050 se espera que el caudal incremente un 0.59 %, lo que indica que los cambios en el uso y cobertura del suelo generan una tendencia de aumento en el caudal de la cuenca.

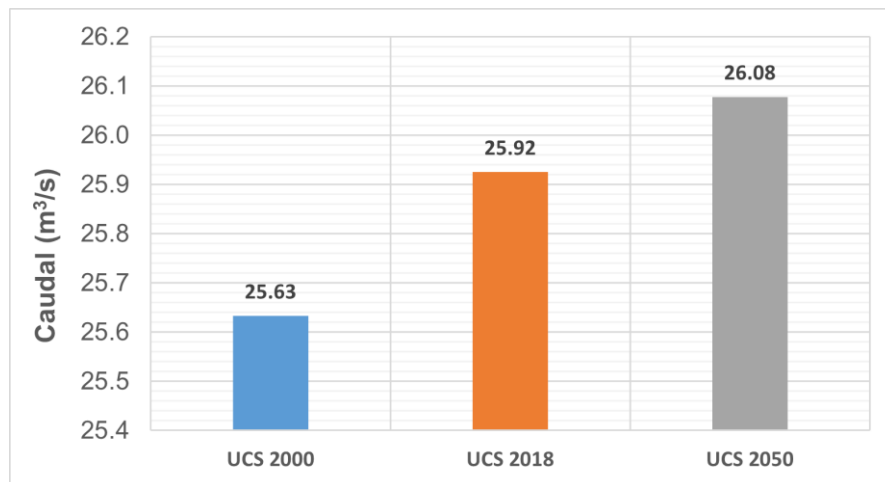


Figura 6.75. Caudal medio diario interanual simulado con CEQUEAU, a partir de datos de precipitación observada (periodo 1983-2022) para cada mapa de UCS (Año2000, 2018 y 2050)



A nivel de caudales medios mensuales interanuales también se identificó un incremento de caudal al cambio de uso y cobertura del suelo (Figura 6.76), en la Tabla 6-56 se presenta el cambio porcentual por mes del caudal para los periodos 2000-2018 y 2018-2050, se evidencia que para el periodo 2000-2018, el caudal incrementa en un porcentaje mayor que en el periodo 2018-2050. Los meses que presentan un mayor incremento en su caudal corresponden a abril, marzo y mayo.

Teniendo en cuenta que el modelo CEQUEAU solo consideró la cobertura de bosque, para el periodo 2000-2018, esta cobertura disminuyó un 45.5 % en la cuenca y para el periodo 2018-2050 la cobertura de bosque disminuirá un 43.1 %, esto explica porque durante el periodo 2000-2018 se presentó un mayor porcentaje de incremento de caudal, teniendo en cuenta que a medida que se pierde cobertura boscosa, el caudal en la cuenca aumenta.

Tabla 6-56. Cambio de caudales medios mensuales interanuales simulados con CEQUEAU, a partir de datos de precipitación observada (periodo 1983-2022) para cada mapa de UCS

Mes	Caudal (m ³ /s) (UCS 2000)	Caudal (m ³ /s) (UCS 2018)	Caudal (m ³ /s) (UCS 2050)	% de cambio (2000-2018)	% de cambio (2018-2050)
Enero	6.01	6.05	6.07	0.64	0.41
Febrero	3.34	3.37	3.39	0.84	0.63
Marzo	4.86	4.95	5.01	1.96	1.26
Abril	13.81	14.10	14.26	2.14	1.14
Mayo	30.23	30.77	31.05	1.78	0.91
Junio	46.56	47.07	47.33	1.10	0.54
Julio	54.34	54.78	55.00	0.81	0.40
Agosto	46.89	47.26	47.45	0.79	0.40
Septiembre	30.55	30.89	31.06	1.11	0.55
Octubre	28.42	28.80	29.00	1.34	0.68
Noviembre	26.96	27.29	27.47	1.23	0.65
Diciembre	14.14	14.27	14.34	0.89	0.50

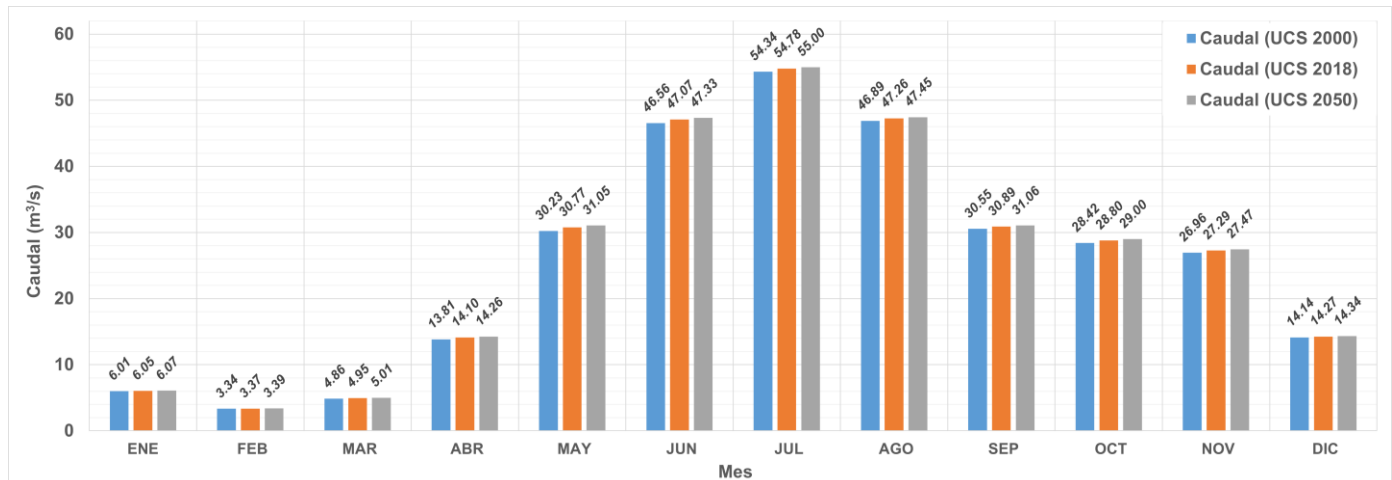


Figura 6.76. Caudales medios mensuales interanuales simulados con CEQUEAU, a partir de datos de precipitación observada (periodo 1983-2022) para cada mapa de UCS (Año 2000, 2018 y 2050)

6.7.2. Impactos del uso y cobertura del suelo en el caudal de la cuenca a partir de las simulaciones en SWAT con datos de precipitación CHIRPS

El caudal medio diario interanual simulado con SWAT para el mapa de USC del año 2000, fue de 23.18 m³/s, para el mapa de UCS del año 2018 fue de 23.56 m³/s y para el mapa de UCS de año 2050 fue de 23.79 m³/s, como se presenta en la Figura 6.77. En términos de porcentaje de cambio promedio a nivel diario, durante el periodo 2000-2018, el caudal mostró un incremento del 1.66 % y para el periodo 2018-2050 se espera que el caudal incremente un 0.98 %, lo que indica que los cambios en el uso y cobertura del suelo generan una tendencia de aumento en el caudal de la cuenca.

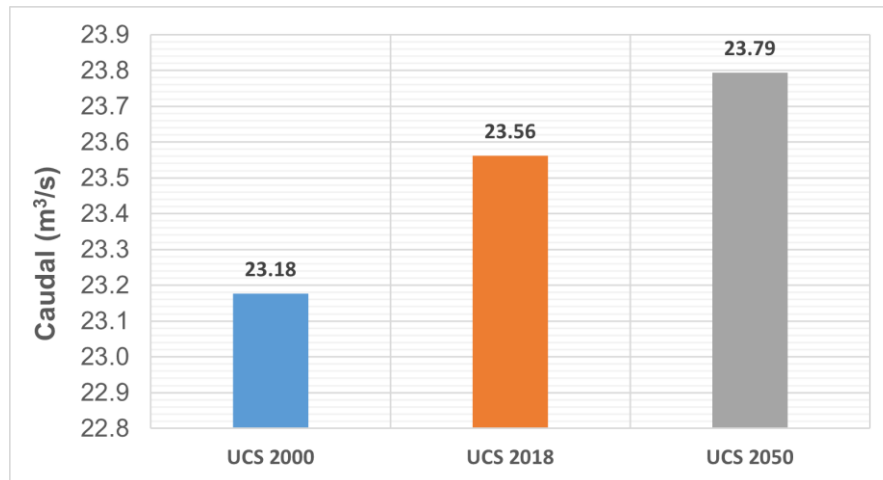


Figura 6.77. Caudal medio diario interanual simulado con CEQUEAU, a partir de datos de precipitación CHIRPS (periodo 1983-2022) para cada mapa de UCS (Año 2000, 2018 y 2050)

A nivel de caudales medios mensuales interanuales también se identificó un incremento de caudal al cambio de uso y cobertura del suelo (Figura 6.78), en la Tabla 6-57, se presenta el cambio porcentual por mes del caudal para los periodos 2000-2018 y 2018-2050, se evidencia que para el periodo 2000-2018, el caudal incrementa en un porcentaje mayor que en el periodo 2018-2050, sin embargo, en los meses de agosto y septiembre se observa una leve disminución del caudal para el periodo 2018-2050. Los meses que presentaron mayor aumento del caudal para el periodo 2000-2018 fueron enero, febrero y abril, mientras que los meses que presentaron mayor aumento del caudal para el periodo 2018-2050 fueron abril y mayo.

Los resultados de la simulación en SWAT con el cambio de uso y cobertura del suelo también evidenciaron una tendencia de aumento en el caudal de la cuenca, sin embargo, este difiere un tanto del comportamiento de los resultados obtenidos con CEQUEAU, ya que el porcentaje de incremento de caudal a nivel mensual para el periodo 2000-2018 fue mayor en los caudales simulados con SWAT que con CEQUEAU y para el periodo 2018-2050 se evidenció lo mismo con la diferencia que en dos meses se observó disminución de caudal en vez de incremento.

Estas diferencias se asocian al uso de datos de precipitación diferentes (precipitación observada y precipitación del producto CHIRPS) y a la conceptualización de algunos procesos hidrológicos y consideraciones de cada modelo.



Teniendo en cuenta que el modelo SWAT consideró las seis clases de UCS (arbustal, área agrícola, bosque, cuerpo de agua, pastizal y zona urbana) la cobertura de bosque, para el periodo 2000-2018, disminuyó un 45.5 % en la cuenca, el área agrícola disminuyó un 4.2 %, la cobertura de pastizal aumentó un 49.1 % y la cobertura arbustal aumentó un 8.3 %, lo que ocasionó un incremento del caudal. Para el periodo 2018-2050 la cobertura de bosque disminuyó un 43.1 %, el área agrícola disminuyó un 17.1 %, la cobertura de pastizal aumentó un 65.1 % y la cobertura arbustal disminuyó un 7.2 %, lo que ocasionó también un incremento del caudal, pero en menor proporción que el periodo 2000-2018. Estos resultados también evidencian que a medida que se pierde cobertura boscosa, el caudal en la cuenca aumenta.

Tabla 6-57. Cambio de caudales medios mensuales interanuales simulados con SWAT, a partir de datos de precipitación observada (periodo 1983-2022) para cada mapa de UCS

Mes	Caudal (m ³ /s) (UCS 2000)	Caudal (m ³ /s) (UCS 2018)	Caudal (m ³ /s) (UCS 2050)	% de cambio (2000-2018)	% de cambio (2018-2050)
Enero	7.71	7.93	7.98	2.90	0.70
Febrero	5.31	5.45	5.52	2.54	1.34
Marzo	6.42	6.58	6.70	2.38	1.89
Abril	14.56	14.92	15.36	2.47	2.92
Mayo	27.80	28.29	28.95	1.75	2.34
Junio	42.06	42.46	43.21	0.95	1.77
Julio	44.03	44.43	44.67	0.92	0.53
Agosto	38.49	39.01	38.95	1.36	-0.15
Septiembre	24.62	25.18	25.08	2.30	-0.42
Octubre	23.95	24.45	24.75	2.09	1.23
Noviembre	25.99	26.45	26.76	1.79	1.17
Diciembre	16.21	16.59	16.61	2.33	0.14

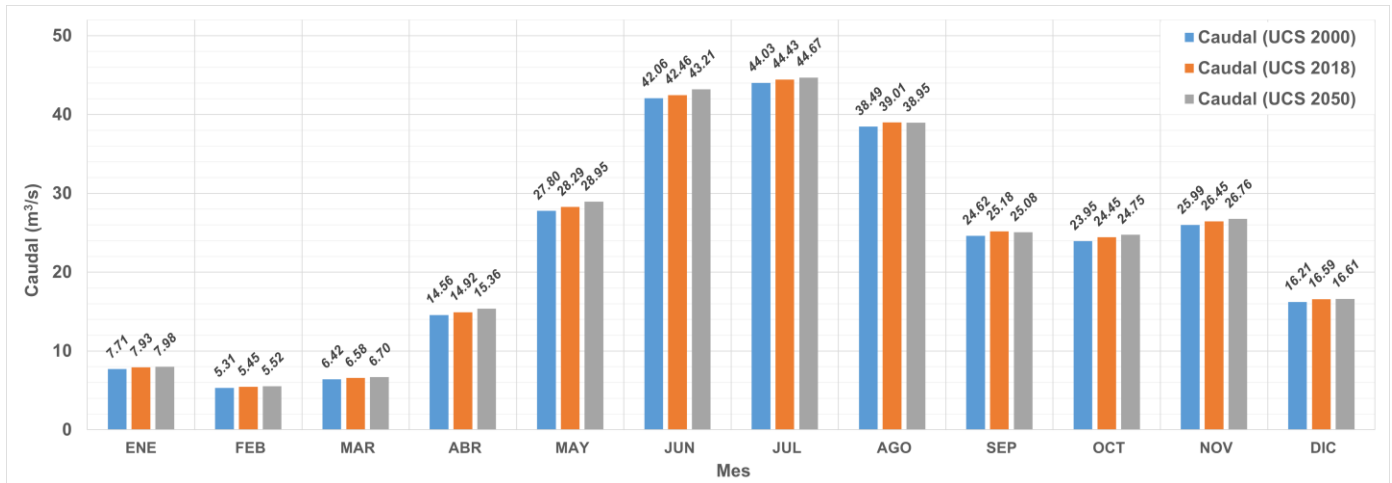


Figura 6.78. Caudales medios mensuales interanuales simulados con CEQUEAU, a partir de datos de precipitación CHIRPS (periodo 1983-2022) para cada mapa de UCS (Años 2000, 2018 y 2050)



7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este estudio se aplicaron dos modelos hidrológicos (CEQUEAU y SWAT) para evaluar su rendimiento ante los impactos del cambio de uso y cobertura del suelo en el caudal de salida de la cuenca del río Garagoa, Colombia, como un aspecto importante en la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos. En las simulaciones hidrológicas se emplearon datos de precipitación observada y datos de precipitación del producto CHIRPS. En el presente capítulo se presenta la discusión de los resultados obtenidos.

7.1. Datos hidrométricos

La información hidrométrica analizada correspondió a la estación limnigráfica “El Caracol”, la cual se ubica en la salida de la cuenca y a partir de la cual se calibraron y validaron los modelos hidrológicos, el periodo en el cual se presentan caudales más altos en el río Garagoa es de abril a noviembre, siendo julio el mes en el que se presentan los caudales más altos.

El control de calidad de estos datos hidrométricos es un paso fundamental antes de utilizar la información. La validación de los datos asegura que la información sea lo más precisa posible, permitiendo detectar valores sospechosos que podrían distorsionar la variabilidad natural de los datos. Contar con datos de alta calidad es esencial para reducir la incertidumbre en los resultados.

Para el caso del control de calidad de los datos de caudal de la estación El Caracol, se identificaron datos faltantes y datos atípicos en la serie. En cuanto a los datos faltantes, para el periodo 1981-2022, en los años 2002, 2012, 2015 y 2016 hay ausencia total de datos de caudal y en los años 1983, 1984, 2004 y 2005 se presentan algunos meses con datos faltantes.

Con respecto a los datos atípicos, la alta variabilidad y los numerosos *outliers* durante los meses de mayo a septiembre pueden estar asociados con la temporada de lluvias. Sin embargo, la mayor cantidad de *outliers* en junio y julio podría ser un reflejo de lluvias intensas o eventos extremos de precipitación, debido a que los datos atípicos extremos fueron revisados con la serie de precipitación, el inventario de eventos climáticos extremos para el departamento de Boyacá, los valores diarios de caudal consecutivos y la estacionalidad de los mismos, permitiendo inferir que en su mayoría son valores de caudal extremos y no datos erróneos, sin embargo, para la calibración y validación de los modelos



no se tuvieron en cuenta los años de registro de caudal 2005 y 2006, debido a la ausencia de datos para los primeros meses del año 2005 y el valor de los datos atípicos en el año 2006 que no fue posible corroborar.

De acuerdo con el inventario de eventos climáticos ocasionados por fuertes precipitaciones, se evidencia un mayor registro de estos en los años 2010, 2011 y 2012, esto ocasionado principalmente por el impacto de “La Niña” 2010/11 en la precipitación, que para el caso de la región andina, según Euscátegui & Hurtado (2012) a partir de abril, comenzó a sentirse el efecto del paulatino enfriamiento del Pacífico tropical, el cual conllevó al fenómeno “La Niña” 2010, reflejado en lluvias excesivas desde abril a septiembre y entre noviembre y diciembre. Octubre no registró una tendencia definida. Es de anotar que las excesivas lluvias presentadas desde abril, prácticamente eliminaron la temporada seca de mitad de año, por lo cual, la época lluviosa del segundo semestre, tuvo un impacto inusitado, originando uno de los inviernos más fuertes de los últimos tiempos en las regiones Andina y Caribe, principalmente. El efecto continuó durante el año 2011 especialmente en febrero, marzo y mayo, los cuales presentaron predominio de excesos en la región.

7.2. Datos meteorológicos

Para la modelación hidrológica se emplearon 13 de las 16 estaciones de precipitación analizadas, ya que a partir de la validación con los productos CHIRPS e IMERG, fue posible identificar que las estaciones que presentaron una correlación mensual menor con ambos productos, corresponden a las tres estaciones automáticas: (1) La Capilla-aut, (2) Chinavita-aut y (3) Páramo Rabanal-aut, por lo que se decidió descartar dichas estaciones en la incorporación de los datos meteorológicos en los modelos hidrológicos CEQUEAU y SWAT, esto justificado también por el corto periodo de registro que tienen estas estaciones, al haber sido instaladas en el año 2017.

En la validación de los productos de precipitación CHIRPS e IMERG, los valores de coeficientes de determinación (R^2) a nivel diario fueron muy bajos en comparación con los valores mensuales, a nivel diario ambos productos presentaron correlaciones no satisfactorias, mientras que a nivel mensual el producto CHIRPS presentó una mejor correlación que el producto IMERG, al presentar valores de R^2 entre 0.56 y 0.85 para las estaciones convencionales.

De acuerdo con Urrea et al. (2016) en su estudio “Validación de la base de datos de precipitación CHIRPS para Colombia a escala diaria, mensual y anual en el Periodo 1981-



2014”, CHIRPS conserva características importantes de la precipitación como la media, la precipitación acumulada total y la estacionalidad en las tres escalas temporales (diaria, mensual y anual), además se obtuvieron errores menores y mejores ajustes de las funciones de probabilidad para las escalas mensual y anual que para la diaria, lo cual puede ser producto de la suavización de los datos diarios al ser agregados a escalas mayores y concluyeron que CHIRPS captura mejor la variabilidad temporal de la precipitación a escala mensual que a escalas menores, lo cual no debe ser extraño debido a la suavización de las series al disminuir su resolución.

Según Rodríguez et al. (2024), el desempeño del producto *IMERG FINAL* en la captura de la distribución de la lluvia a escala anual, mensual y diaria en el período 2001-2019 es bastante variable y depende de las características fisiográficas y climatológicas de los lugares donde se ubican las estaciones. Sin embargo, el análisis agregado para todas las estaciones en las cinco regiones naturales de Colombia muestra que los mejores resultados se obtienen anualmente, seguido de las resoluciones temporales mensuales y diarias. Finalmente concluyeron con sus resultados, que el producto *IMERG* en la actualidad no es capaz de capturar la distribución de la lluvia diaria en la mayoría de las 110 estaciones analizadas en su estudio.

De acuerdo con estas validaciones, se decidió descartar el producto *IMERG* para la simulación de caudales en la zona de estudio, por lo que únicamente se hicieron simulaciones con los datos de precipitación observada y los datos del producto *CHIRPS*.

Las validaciones de los demás datos meteorológicos (temperatura, velocidad del viento, radiación solar y humedad relativa) no fue posible realizarlas debido a la ausencia de registros de esta información por parte de las estaciones climatológicas instaladas en la cuenca. Sin embargo, los resultados obtenidos con ambos modelos mostraron una buena eficiencia, por lo que los indicadores agrometeorológicos desde 1979 hasta la actualidad derivados del reanálisis atmosférico del clima global (*ERA5*) publicados por el *Copernicus Climate Change Service*, se consideran apropiados para la cuenca.

7.3. Cambio de uso y cobertura del suelo

En el departamento de Boyacá, donde se ubica la cuenca del río Garagoa, según el Observatorio Ambiental de Boyacá (2015), uno de los mayores problemas en el uso de los recursos naturales del departamento es la ampliación de la frontera agrícola y ganadera que acentúa la deforestación disminuyendo el área de los páramos y bosques naturales de



una manera significativa. De acuerdo a la información comparativa de cobertura de 1998 y del 2006 se encuentra una disminución en los páramos del 27% y de los bosques en un 50% aproximadamente. Frente a los territorios agrícolas (Cultivos y pastos) que han duplicado su área. Estas dinámicas se reflejan también a nivel de la cuenca del río Garagoa, en la cual durante el periodo 2000-2018 se presentaron cambios muy representativos en la cobertura pastizal, al presentar un aumento del 49.1 %, la zona urbana presentó un aumento del 42.6 % y la cobertura arbustal presentó un aumento del 8.3 %; por su parte las coberturas que disminuyeron fueron los bosques en un 45.5 % y el área agrícola con un decremento de 4.2 %.

Las causas de la disminución de bosques en la cuenca, según la Corporación Autónoma Regional de Chivor CORPOCHIVOR (2016), son la expansión de tierras para actividades agropecuarias, tala indiscriminada para extracción de madera, quemas e incendios forestales y construcción de espacios urbanos y rurales; en el caso de la cuenca del río Garagoa, cuya actividad económica por excelencia está estrechamente vinculada con procesos agrícolas y pecuarios, la expansión de tierras para actividades agropecuarias viene siendo la causa principal de deforestaciones en la región.

De acuerdo con CORPOCHIVOR (2016) mediante la puesta en marcha del Sistema de Difusión de datos *GEONET Cast*, que provee información de observación de la Tierra a través de una red global, mediante técnicas de procesamiento digital de imágenes de satélite e información de cobertura boscosa suministrada por el IDEAM, se realizó el "Análisis de la dinámica de la Deforestación en la jurisdicción de CORPOCHIVOR 1990-2014", obteniéndose una tasa de deforestación histórica para la jurisdicción correspondiente a -1.85 % que conlleva una pérdida de la cobertura boscosa de aproximadamente 10.6 km²/año, y una tasa deforestación futura calculada para el periodo 2014-2044 correspondiente a -2.46 % lo que significa una pérdida de la cobertura boscosa de aproximadamente 9.11 km²/año.

En cuanto a la urbanización de la cuenca, el municipio con mayor centro urbano es Garagoa, en este, más del 50 % de la población es urbana. Hay otros municipios en los cuales el componente urbano es relativamente importante en el conjunto de la cuenca (la proporción de población urbana está entre 20 y 50 %); éstos están asociados a la presencia de la carretera central del norte en áreas de desempeño semi industrial, de bodegaje, comerciales y de servicios, generadores de centralidades (Chocontá, Villapinzón, Samacá y Tunja); a áreas con desempeño en economías extractivas derivadas de las esmeraldas,



o economías de enclave como la construcción y posterior funcionamiento de la central hidroeléctrica (Santa María y Chivor); y finalmente, a centros oferentes de bienes y servicios que organizan funcionalmente espacios subregionales (Ramiriquí, Chinavita, Tenza y La Capilla). En todos los casos anteriores, estas actividades tienden a concentrar población y expresan necesariamente condiciones favorables de desempeño económico (Moreno et al., 2016).

7.4. Modelación hidrológica

La herramienta del módulo hidrogeomático implementado por Franco (2008) en el SIG-IDRISI/TerrSet, facilitó la creación de los archivos de entrada al modelo CEQUEAU, principalmente el archivo fisiográfico el cual proporciona para cada celda su celda receptora (en función del sentido de flujo), su porcentaje de cobertura de suelo (bosques, lagos y ciénagas) y la altitud media.

Las simulaciones iniciales con CEQUEAU, a partir de los datos de precipitación observada, mostraron un rendimiento satisfactorio según la clasificación de los criterios propuestos por Moriasi et al. (2015), al obtenerse un NSE mensual de 0.56, el comportamiento del caudal o su variabilidad temporal se representó de forma adecuada pero con la mayoría de caudales sobreestimados; las simulaciones iniciales con datos de precipitación CHIRPS también mostraron un rendimiento satisfactorio a nivel mensual (NSE de 0.53), con subestimación de caudales altos y sobreestimación de caudales bajos.

La optimización o calibración del modelo CEQUEAU, a partir del programa de optimización automática, incluido en el modelo, basado en el método de Powell (Morin & Paquet, 1995), que permite aproximarse opcionalmente al valor real de algunos de los parámetros maximizando o minimizando una cualquiera de las cuatro funciones objetivo disponibles, a fin de reproducir los caudales observados con un mínimo de error (Llanos Acebo et al., 1999). El programa permite optimizar simultáneamente veintiún (21) parámetros seleccionados entre veintiocho (28). La optimización se realiza con una función objetivo elegida entre cuatro métodos de cálculo que permiten una estimación de la precisión de las simulaciones (Morin & Paquet, 1995). Para el presente estudio se optimizaron 15 parámetros, la selección de estos parámetros relacionados con el recipiente suelo, el recipiente acuífero y con la evapotranspiración se realizó por ser los que afectan más directamente al ajuste de los hidrogramas calculados y observados.



Las simulaciones para el periodo de calibración en el modelo CEQUEAU con datos de precipitación observada arrojaron una eficiencia muy buena según la clasificación de los criterios propuestos por Moriasi et al. (2015) a nivel mensual, mientras que la validación mostro resultados variados entre bueno y muy bueno. En relación con la simulación de caudales a partir de los datos de precipitación del producto CHIRPS, para el periodo de calibración el ajuste fue bueno y para el periodo de validación vario entre satisfactorio y bueno. Boluwade (2020) analizó la utilidad de los productos de precipitación satelital como sustitutos de las observaciones en estaciones meteorológicas, en África, donde hay escasez de estaciones meteorológicas que miden la precipitación in situ, evaluaron los dos productos de precipitación satelital más utilizados en África (Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Stations (CHIRPS) y Tropical Applications of Meteorology Using Satellite and Ground-based Observations (TAMSAT)), junto con el producto más reciente Integrated Multi-Satellite Retrievals for GPM early run (IMERG-ER) del Global Precipitation Measurement Mission (GPM) con humedad del suelo (GPMpSM2RAIN), las estadísticas de correlación de precipitación acumulada diaria fueron débiles para todos los productos satelitales. Sin embargo, estos valores de correlación aumentaron considerablemente para la escala temporal mensual, observaron que CHIRPS y TAMSAT tienen características similares, mientras que SM2RAIN no es similar a ninguno de los dos.

Lo anterior también se identificó en este presente estudio, ya que en general a nivel diario los resultados del periodo de calibración y validación del modelo arrojaron resultados NSE y R^2 insatisfactorios, debido a que es normal que a nivel diario las correlaciones sean bajas puesto que se trata de comparar lluvia puntual (pluviómetro) y lluvia pixel, mientras que a nivel mensual y anual dos lugares vecinos (en este caso uno dentro del otro) deben tener una lluvia acumulada casi igual.

En cuanto a la modelación hidrológica con SWAT, Minga (2022) determinó la influencia que tienen el método de estimación PET y el método de cálculo de CN diario en la configuración inicial del modelo sin calibrar. En el presente estudio, el ajuste de estos métodos permitió garantizar la eficiencia del modelo; el cálculo de PET con la ecuación de Hargreaves tuvo mejor rendimiento que la ecuación Penman-Monteith, mientras que el método *Plan ET*, que calcula el valor diario de CN como una función de la evapotranspiración de la planta, mostro mejor rendimiento que el método *Soil moisture*, el cual calcula el valor diario de CN como una función de la humedad del suelo. Sin embargo, el modelo configurado con la ecuación Penman-Monteith y el método *Plan ET*, mostró un buen rendimiento también, indicando



pertinente el uso de los indicadores agrometeorológicos desde 1979 hasta la actualidad derivados de reanálisis del (*Copernicus Climate Change Service*) de la Unión Europea, basados en los datos horarios del ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) ERA5, cuando no se tenga información de temperatura, velocidad del viento, radiación solar y humedad relativa de estaciones climatológicas instaladas en el área de estudio.

Las simulaciones iniciales con SWAT para los datos de precipitación observada y precipitación CHIRPS, lograron representar de manera adecuada el comportamiento del caudal, arrojando coeficientes NSE mayores a 0.70, es decir una eficiencia buena.

El software SWAT-CUP (*SWAT Calibration and Uncertainty Programs*) para realizar la calibración del modelo SWAT ha sido ampliamente utilizado, para citar algunos ejemplos en Colombia: Carrillo (2018), Jaramillo (2021), Mongui & Sierra, (2021) y a nivel internacional: Bekele et al (2021), Kumar et al (2018), Marques Louzada & Bandeira de Melo Ribeiro (2019), Said et al (2021), los cuales recomiendan el algoritmo SUFI-2 (Sequential Uncertainty Fitting, versión 2) por ser uno de los métodos más utilizados para la calibración y análisis de incertidumbre en el modelo SWAT a través de la herramienta SWAT-CUP. SUFI-2 es reconocido por su eficiencia y efectividad en la calibración de modelos hidrológicos. La selección de los 15 parámetros de calibración del modelo en el presente estudio se basó en la revisión de la literatura para identificar los parámetros más sensibles, los cuales fueron *CN2*, asociado al escurrimiento superficial; *ALPHA_BF*, un índice directo de la respuesta del flujo de agua subterránea a los cambios en la recarga; *GWHT*, que representa la altura inicial del agua subterránea.

En general los resultados de evaluación del modelo a nivel mensual para el periodo de calibración con los datos de precipitación observados, en función de los estadísticos R^2 y NSE tuvieron una eficiencia muy buena según la clasificación de los criterios propuestos por Moriasi et al. (2015), para el periodo de validación, los criterios estadísticos variaron de muy bueno a satisfactorio, el PBIAS fue más variable entre satisfactorio a bueno. Para el caso de la calibración y la validación de las simulaciones a partir de los datos precipitación del producto CHIRPS, variaron entre buena y satisfactoria según los criterios estadísticos. Dhanesh et al. (2020), hicieron una evaluación comparativa del rendimiento de los datos CHIRPS y CFSR para diferentes zonas climáticas utilizando el modelo SWAT, el estudio demostró el potencial de CHIRPS para ser utilizado como un insumo en la modelización del balance hídrico a nivel mensual. CHIRPS superó a CFSR en la mayoría de las cuencas,



con un valor de Nash Sutcliffe de 0.6 y superior. El rendimiento relativamente mejor de los datos CHIRPS se puede atribuir a la resolución espacial más fina de 0.05° , que mejora la efectividad del conjunto de datos en capturar la heterogeneidad espacial en la precipitación.

Lo anterior también se identificó en este presente estudio también, ya que en general a nivel diario los resultados del periodo de calibración y validación del modelo arrojaron resultados NSE y R^2 insatisfactorios.

7.5. Comparación de los modelos hidrológicos CEQUEAU y SWAT

En cuanto a la preparación de datos de entrada, el modelo CEQUEAU requiere menos información que el modelo SWAT, puesto que el modelo CEQUEAU requiere de datos fisiográficos como la altitud, el porcentaje de bosque, el porcentaje de lagos y el porcentaje de ciénegas, estos datos se pueden determinar a partir de mapas topográficos de la cuenca estudiada o mediante un sistema de información geográfica, para el caso del presente estudio se empleó el módulo hidrogeomático incorporado en el software TerrSet, en cuanto a los datos climatológicos, CEQUEAU requiere temperaturas máximas y mínimas del aire, precipitación líquida o sólida en estaciones meteorológicas y caudales observados durante el período de calibración. El modelo SWAT, por su lado requiere de datos topográficos como el Modelo Digital de Elevación (DEM), mapa de uso del suelo y características de la vegetación, mapas de tipos de suelo y propiedades físicas del suelo, datos meteorológicos como precipitación, temperatura, radiación solar, humedad relativa y velocidad del viento y datos hidrológicos de caudales de ríos para el proceso de validación.

La preparación de estos datos demanda un tiempo considerado que depende de la disponibilidad de información para la zona de estudio y de los mecanismos para ajustar la información a los formatos requeridos por cada modelo, para este estudio, la preparación de datos de entrada al modelo SWAT demandó mayor tiempo que la preparación de datos de entrada para el modelo CEQUEAU.

En relación con los parámetros de calibración, el modelo CEQUEAU cuenta con un total de 28 parámetros disponibles para optimización dentro del proceso de calibración, la mayoría de parámetros se relacionan con los recipientes suelo-acuífero-ciénegas, los otros parámetros se relacionan con la fusión de nieve, la evapotranspiración y la transferencia. Adicionalmente se cuenta con dos parámetros que permiten la corrección de temperaturas y precipitaciones con respecto a la altitud.



El modelo SWAT, tiene en total 634 parámetros disponibles para calibración, alrededor de 290 de estos parámetros influyen en la producción hídrica de las cuencas, al estar relacionados con el agua subterránea (.gw), el manejo de la cuenca (.mgt), características físicas del suelo (.sol), el movimiento del agua y sedimentos en el canal principal de una subcuenca (.rte), parámetros relacionados con la Unidad de Respuesta Hidrológica (.hru), los datos climáticos, atributos de los canales tributarios y el número y tipos de HRU en la subcuenca (.sub), valores u opciones utilizados para modelar procesos físicos de manera uniforme en toda la cuenca hidrográfica (.bsn).

El proceso de calibración del modelo SWAT tomó más tiempo que el proceso de calibración del modelo CEQUEAU, principalmente por la cantidad de parámetros que tiene cada modelo y porque el software CEQUEAU, ya tiene incluida una herramienta automática de calibración, mientras que el modelo SWAT requiere de la instalación adicional de softwares de calibración.

En general, ambos modelos presentaron un buen rendimiento en la simulación de los caudales de la cuenca del río Garagoa, el periodo de calibración en ambos modelos presentó un mejor ajuste que el periodo de validación. En términos de eficiencia, a partir de los criterios estadísticos y rangos propuestos por (Moriasi et al., 2015), a nivel mensual, las simulaciones utilizando datos de precipitación observada dieron mejores resultados con el modelo CEQUEAU al presentar valores de NSE y R^2 mayores y valores de PBIAS menores que los obtenidos con SWAT, mientras que las simulaciones a partir de los datos de precipitación del producto CHIRPS dieron resultados de NSE iguales con ambos modelos. En general la eficiencia de las simulaciones a nivel mensual de acuerdo con los criterios estadísticos de Moriasi et al. (2015) fue “muy buena” y “buena”, a excepción de los resultados del PBIAS en las simulaciones con SWAT y los resultados del R^2 en el periodo de validación para ambos modelos, que se calificaron como “satisfactorios”.

Los resultados de simulación con ambos modelos fueron bastante similares, a nivel diario las correlaciones entre los caudales simulados con CEQUEAU y los caudales simulados con SWAT, mostraron un valor de R^2 de 0.73 para las simulaciones con datos de precipitación observada y un R^2 de 0.62 para las simulaciones con precipitación CHIRPS, a nivel mensual las correlaciones mejoraron, al obtenerse valores de R^2 de 0.97 para las simulaciones con datos de precipitación observada y un R^2 de 0.96 para las simulaciones con precipitación CHIRPS.



Con los resultados obtenidos fue posible identificar que la principal diferencia entre ambos modelos radica en su complejidad y detalle. El modelo SWAT es más complejo y detallado en términos de la cantidad y variedad de parámetros de calibración, lo que permite simulaciones muy precisas, pero requiere más datos y un mayor esfuerzo de calibración. Por su parte, el modelo CEQUEAU es más simple y directo, adecuado para estudios que no necesitan un detalle tan fino.

El modelo SWAT es ideal para estudios de impacto a largo plazo y la gestión de grandes cuencas hidrográficas, mientras que CEQUEAU se adapta mejor a la gestión de recursos hídricos a nivel de río y a la predicción de caudales. SWAT ofrece más herramientas y opciones para la calibración automática, facilitando el ajuste de numerosos parámetros. Por otro lado, CEQUEAU, con su enfoque en la calibración manual, puede ser más rápido de implementar, pero menos flexible en estudios complejos.

La elección de un modelo u otro depende del equilibrio entre la precisión requerida, el objetivo del estudio, la disponibilidad de datos, y los recursos (tiempo y computacionales) disponibles.

7.6. Impactos del uso y cobertura del suelo en el caudal de la cuenca

Los resultados de la simulación hidrológica con ambos modelos permitieron identificar el impacto del cambio de uso y cobertura de suelo para los periodos 2000-2018 y 2018-2050 en la producción hídrica de la cuenca, específicamente en el caudal de salida de esta. Se eligió analizar el impacto bajo dos escenarios de resultados de eficiencia de las simulaciones de los modelos: (1) A partir de las simulaciones realizadas con el modelo CEQUEAU para la precipitación observada y (2) A partir de las simulaciones realizadas con el modelo SWAT para precipitación CHIRPS.

Se identificó una leve tendencia de aumento en el caudal de la cuenca para ambos periodos analizados. Dado que el enfoque del análisis de cambio de UCS era sobre la cobertura de bosque, fue posible identificar que tras la pérdida de cobertura de bosque en la cuenca (disminución del 45.5 % para el periodo 2000-2018 y para el periodo 2018-2050 disminuyó un 43.1 %) el caudal de salida de la cuenca incrementa, al disminuir la infiltración y aumentar la escorrentía superficial.

Barreto et al. (2021) analizaron espacio-temporalmente la respuesta hidrológica a los cambios en la cobertura del suelo en la subcuenca del río Chicú, Colombia, el estudio



mostró que la respuesta hidrológica de una cuenca no solo está influenciada por parámetros hidroclimáticos, sino que también es fuertemente afectada por el tipo de vegetación y cobertura del suelo, en cuanto a los componentes del régimen hidrológico, apreciaron que el escurrimiento superficial varía en relación con el tipo de cobertura y su extensión, como en el caso del bosque denso (FRSD) y el bosque fragmentado (FRST), que disminuyeron en un 24 % en el área total de la cuenca y generaron un aumento en el escurrimiento de más de 4 mm para el periodo 1997-2016. Por esta razón, estas coberturas son sensibles y deben ser priorizadas dentro de las políticas de gestión de recursos hídricos.

Teniendo en cuenta que, pese a las diferencias en los datos de entrada de las clases de uso y cobertura del suelo en cada modelo (para CEQUEAU se consideraron únicamente las coberturas de lagos, bosques y otros y para SWAT las coberturas de bosque, cuerpos de agua, arbustal, área agrícola, pastizal y zonas urbanas) los resultados de impacto del uso y cobertura del suelo en el caudal de la cuenca fueron similares, permitiendo evidenciar la fuerte influencia de la cobertura de bosque en la producción hídrica de la cuenca.



8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1. Conclusiones

El procesamiento y análisis de información hidrometeorológica, permitió conocer el comportamiento del caudal y las precipitaciones en la cuenca, además de determinar la disponibilidad y la calidad de información. El periodo en el cual se presentan caudales más altos en el río Garagoa es de abril a noviembre, siendo julio el mes en el que se presentan los caudales más altos; los valores de caudales más bajos se presentan en los meses de diciembre, enero, febrero y marzo.

En general el comportamiento de la precipitación en la cuenca es de carácter monomodal, el periodo en el que se registran mayores precipitaciones es de abril a noviembre y el mes más lluvioso corresponde al mes de julio. Los meses que presentan las precipitaciones más bajas en todas las estaciones corresponden a enero, febrero y diciembre. En total se contó con la información de 16 estaciones de registro de precipitación diaria en la cuenca, de las cuales 3 contienen una gran cantidad de datos faltantes.

Para robustecer la información climatológica en la cuenca y evaluar el comportamiento de los modelos, fue posible la utilización de productos satelitales de precipitación como CHIRPS e IMERG y el producto de información meteorológica (temperatura, radiación solar, humedad relativa y velocidad del viento) ERA5. Los productos de datos de precipitación pasaron por un proceso de validación el cual permitió identificar a que a nivel mensual CHIRPS se ajusta mejor a la precipitación observada en la cuenca, que IMERG. A nivel diario, ambos productos mostraron un ajuste insatisfactorio. Además, fue posible concluir que el producto CHIRPS presenta deficiencias para capturar eventos de lluvia menores a 5 mm, ya que registra poco menos de la mitad de los eventos que registra la estación, mientras que IMERG si registra estos eventos, pero los sobreestima. Con respecto a los eventos de lluvia mayores a 5 y 10 mm, CHIRPS registra una mayor cantidad de eventos que la estación y el producto satelital IMERG. Para los eventos de lluvia mayor a 20 mm ambos productos registran más del doble de eventos que registra la estación, sin embargo, IMERG mostró una sobreestimación mayor que CHIRPS. De acuerdo con lo anterior, las simulaciones hidrológicas en ambos modelos, se realizaron utilizando datos de precipitación observada y datos de precipitación del producto CHIRPS.

Se realizó el análisis de cambio de uso y cobertura del suelo a partir de los mapas de los años 2000 y 2018, publicados por el IDEAM, en donde se evidenció una expansión de la



cobertura pastizal (49.1 %) y las zonas urbanas (42.6 %), además de una discusión de las coberturas que disminuyeron bosques (-45.5 %) y del área agrícola (-4.2 %). A partir de estos dos mapas fue posible realizar la proyección de uso y cobertura del suelo al año 2050, la cual fue validada con el mapa de uso y cobertura del suelo proyectado al año 2023 y se determinó como satisfactoria en términos del valor de índice de Kappa obtenido (0.83).

De acuerdo con la proyección de UCS, se espera que para el año 2050, la cobertura de pastizal aumente un 65.1 % y las zonas urbanas incrementen un 58.4 %, la cobertura de bosques, disminuya un 43.1 %, las áreas agrícolas disminuyan un 17.1 % y la cobertura arbustal, disminuya en un 7.2 %.

Las simulaciones con parámetros iniciales en el modelo SWAT, dieron mejores resultados que el modelo CEQUEAU, sin embargo, el proceso de calibración permitió obtener buenos resultados con ambos modelos. En la calibración, para las simulaciones con datos de precipitación observada, con el modelo CEQUEAU se obtuvo un NSE de 0.88 y con el modelo SWAT se obtuvo un NSE de 0.84; para las simulaciones con datos de precipitación CHIRPS, con el modelo CEQUEAU se obtuvo un NSE de 0.75 y con el modelo SWAT se obtuvo un NSE de 0.75, para un paso de tiempo mensual. En la validación, para las simulaciones con datos de precipitación observada los valores de NSE fueron 0.78 y 0.70 para CEQUEAU y SWAT respectivamente, mientras que para las simulaciones con datos de precipitación CHIRPS, los valores de NSE fueron de 0.70 para ambos modelos.

En términos de R^2 , tanto para el periodo de calibración como para el periodo de validación, las simulaciones con datos de precipitación observada se ajustaron mejor con el modelo CEQUEAU, para el caso de las simulaciones con datos de precipitación CHIRPS, el modelo SWAT mostro un mejor rendimiento de acuerdo con el coeficiente R^2 . Este mismo comportamiento se evidencio a nivel diario, lo que permitió concluir que, pese a que los resultados de simulación de ambos modelos fueron muy similares, el modelo CEQUEAU mostró un mejor rendimiento para simular caudales a partir de datos de precipitación observada.

De acuerdo con los resultados obtenidos en las simulaciones con ambos modelos, para evaluar el impacto del uso y cobertura del suelo en el caudal de la cuenca, se analizaron dos escenarios: (1) A partir de las simulaciones realizadas con el modelo CEQUEAU para la precipitación observada y (2) A partir de las simulaciones realizadas con el modelo SWAT.



Fue posible identificar una leve tendencia de aumento en el caudal de la cuenca para los periodos de análisis 2000-2018 y 2018-2050. En las simulaciones con CEQUEAU, en términos de porcentaje de cambio promedio a nivel diario, durante el periodo 2000-2018, el caudal mostró un incremento del 1.14 % y para el periodo 2018-2050 se espera que el caudal incremente un 0.59 %, mientras que, en las simulaciones con SWAT, durante el periodo 2000-2018, el caudal mostró un incremento del 1.66 % y para el periodo 2018-2050 se espera que el caudal incremente un 0.98 %. Considerando únicamente la cobertura de bosque, para el periodo 2000-2018, esta cobertura disminuyó un 45.5 % en la cuenca y para el periodo 2018-2050 según la proyección la cobertura de bosque disminuirá un 43.1 %, esto explica porque durante el periodo 2000-2018 se presentó un mayor porcentaje de incremento de caudal, permitiendo concluir que pese a que no se apreció un cambio en el caudal significativo, principalmente porque se trata de una cuenca rural, a medida que se pierde cobertura boscosa, el caudal en la cuenca aumenta, observándose que las áreas con mayor cobertura forestal contribuyen a una mayor retención y regulación del agua.

Estos hallazgos resaltan la importancia de considerar el uso y la cobertura del suelo en la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH). Una gestión que incorpore prácticas de conservación del suelo y de manejo sostenible del territorio puede optimizar la cantidad y calidad del agua disponible, asegurando la sostenibilidad a largo plazo de la cuenca teniendo en cuenta que ésta es una de las dos principales aportantes de agua al embalse La Esmeralda, creado para proporcionar potencial hidráulico a la Central Hidroeléctrica de Chivor.



8.2. Recomendaciones

Los resultados favorables de las simulaciones con el producto de precipitación CHIRPS, permiten abrir el panorama para el análisis y utilización de este tipo de productos en los estudios hidrológicos de las cuencas, sin embargo, los resultados insatisfactorios en la validación del producto IMERG, resaltan la importancia de validar los productos a utilizar. Se recomienda para futuros estudios considerar métodos de corrección de sesgos de estos productos, con el fin de ajustar los datos satelitales para que coincidan más estrechamente con los datos observados en tierra. También es recomendable validar los productos en varias cuencas sometidas a diferentes climas.

Los indicadores agrometeorológicos desde 1979 hasta la actualidad derivados del reanálisis atmosférico del clima global (ERA5) publicados por el *Copernicus Climate Change Service*, permitieron incorporar a los modelos información climática de temperatura, radiación solar, humedad relativa y velocidad del viento, información que es difícil de conseguir en los registros de las estaciones climatológicas. Es recomendable continuar con la exploración y validación de esta base climática de datos ya que cuenta con una amplia variedad de indicadores agrometeorológicos a una resolución temporal diaria y una resolución espacial de 0.1° , además de contar con registros desde el año 1979 hasta la actualidad, lo que la hace potencialmente útil en la modelación hidrológica de cuencas que no cuentan con información climatológica disponible y/o no tienen una suficiente cobertura de estaciones climatológicas instaladas. Este producto también ofrece datos de precipitación diaria, por lo que sería pertinente incorporar estos datos a los modelos hidrológicos para evaluar su utilidad.

Teniendo en cuenta que la respuesta hidrológica de una cuenca está principalmente influenciada por los parámetros hidroclimáticos, vegetación y cobertura del suelo, se recomienda incluir el análisis de los impactos de la variabilidad y el cambio climático en los procesos hidrológicos de la cuenca. Además, en casos particulares como la cuenca del río Garagoa en la que la mayor parte del territorio es rural, se recomienda plantear escenarios futuros de deforestación y urbanización de acuerdo con los planes de ordenamiento territorial de la región, que permitan identificar impactos más significativos en la producción hídrica de la cuenca.



BIBLIOGRAFÍA

- Abbaspour, K. C. (2015). *SWAT-CUP: SWAT Calibration and Uncertainty Programs*.
- Andrade, C., de Lucia, F., Berhan, Y., Pereira de Farias, M., Dos Santos, V., & Márcia, E. (2018). Modelling the effects of historical and future land cover changes on the hydrology of an Amazonian basin. *Water (Switzerland)*, 10(7). <https://doi.org/10.3390/w10070932>
- Aviles, A., Solera, A., & Paredes, J. (2016). Análisis del rendimiento de sistemas hídricos en desarrollo mediante el acople de modelos estocásticos hidrológicos y optimización de redes de flujo. *Ingenius*, 15, 48. <https://doi.org/10.17163/ings.n15.2016.05>
- Bâ, K. M., Balcázar, L., Diaz, V., Ortiz, F., Gómez-Albores, M. A., & Díaz-Delgado, C. (2018). Hydrological evaluation of PERSIANN-CDR rainfall over upper Senegal River and Bani River Basins. *Remote Sensing*, 10(12). <https://doi.org/10.3390/rs10121884>
- Bâ, K. M., Díaz, C., & Delgado, V. (2001). *Simulación de caudales de los ríos Amacuzac y San Jerónimo en el Estado de Mexico, México*.
- Bâ, K. M., Díaz, C., Quentin, E., Guerra, V., Ojeda, J., Cârsteanu, A., & Franco, R. (2013). Modelado hidrológico de grandes cuencas: caso de estudio del río Senegal, África Occidental. *Tecnología y Ciencias del Agua*, IV, 129–136.
- Barreto, C., Sierra, R., Calderón, D., Jaramillo, A., & Mesa, D. (2021). Spatio-temporal analysis of the hydrological response to land cover changes in the sub-basin of the Chicú river, Colombia. *Heliyon*, 7(7). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07358>
- Baumer, O. W. (1990). *Editors: Contributors: WEPP QUICK START GUIDE*.
- Bekele, D., Alamirew, T., Kebede, A., Zeleke, G., & Melesse, A. M. (2021a). Modeling the impacts of land use and land cover dynamics on hydrological processes of the Keleta watershed, Ethiopia. *Sustainable Environment*, 7(1). <https://doi.org/10.1080/27658511.2021.1947632>
- Bekele, D., Alamirew, T., Kebede, A., Zeleke, G., & Melesse, A. M. (2021b). Modeling the impacts of land use and land cover dynamics on hydrological processes of the Keleta watershed, Ethiopia. *Sustainable Environment*, 7(1). <https://doi.org/10.1080/27658511.2021.1947632>



- Belesaca, D., & Peláez, I. (2018). *Análisis del rendimiento hídrico en cuencas de alta montaña en los Andes Ecuatorianos*. Universidad de Cuenca.
- Boluwade, A. (2020). Remote sensed-based rainfall estimations over the East and West Africa regions for disaster risk management. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 167, 305–320. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.07.015>
- Bosmans, J. H. C., Van Beek, L. P. H., Sutanudjaja, E. H., & Bierkens, M. F. P. (2017). Hydrological impacts of global land cover change and human water use. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(11), 5603–5626. <https://doi.org/10.5194/hess-21-5603-2017>
- Campuzano, C., Roldán, G., Guhl, E., & Sandoval, M. (2012). Una visión al estado del recurso hídrico en Colombia. En J. Laclette & P. Zúñiga (Eds.), *DIAGNÓSTICO DEL AGUA EN LAS AMÉRICAS*.
- Cardona, B. L. (2015). *Conceptos básicos de Morfometría de Cuencas Hidrográficas*.
- Carrillo, G. (2018). *Estimación de la producción hídrica para la cuenca del río Tona mediante el modelo hidrológico semidistribuido SWAT*. Universidad Pontificia Bolivariana.
- Carrillo Peña, G. A. (2018). *Estimación de la producción hídrica para la cuenca del río Tona mediante el modelo hidrológico semidistribuido SWAT*. Universidad Pontificia Bolivariana.
- Ceballos López, J. D. (2011). *MODELACIÓN HIDRÁULICA Y MORFODINÁMICA DE CAUCES SINUOSOS APLICACIÓN A LA QUEBRADA LA MARINILLA (ANT) HYDRAULIC AND MORPHODYNAMIC MODELING OF MEANDERING CHANNELS, APPLICATION TO THE MARINILLA STREAM* (Vol. 30).
- Charbonneau, R., Fortin, J. P., & Morin, G. (2009). The cequeau model: Description and examples of its use in problems related to water resource management / le modèle cequeau: Description et exemples d'utilisation dans le cadre de problèmes reliés à l'aménagement. *Hydrological Sciences Bulletin*, 22(1), 193–202. <https://doi.org/10.1080/02626667709491704>
- Clark Labs. (2020). *TerrSet 2020 Geospatial Monitoring and Modeling System*.
- Copernicus, Climate Change Service, ECMWF, & European Commission. (2023). *Agrometeorological indicators from 1979 to present derived from reanalysis*.



<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/10.24381/cds.6c68c9bb?tab=overview>

CORPOCHIVOR. (2016). *AJUSTE (ACTUALIZACIÓN) DEL PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE LA CUENCA DEL RÍO GARAGOA – SZH 3507.*

Cruz, B. (2019). *Cambio de uso de suelo y su efecto en el escurrimiento modelado con SWAT en la cuenca del río Chapingo.* Colegio de Postgraduados.

CVC Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca. (2018). *CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO LA VIEJAPLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE LA CUENCA DEL RÍO LA VIEJA.*

Dhanesh, Y., Bindhu, V. M., Senent-Aparicio, J., Brighenti, T. M., Ayana, E., Smitha, P. S., Fei, C., & Srinivasan, R. (2020). A comparative evaluation of the performance of CHIRPS and CFSR data for different climate zones using the SWAT model. *Remote Sensing*, 12(18). <https://doi.org/10.3390/RS12183088>

Díaz, C., Esteller, V., Velasco, A., Martínez, J., Arriaga, C., Vilchis, Y., Manzano, L., Mercado, C. M., & Juárez, S. (2009). *Guía de Planeación Estratégica Participativa para la Gestión Integrada de Recursos Hídricos de la Cuenca Lerma-Chapala-Santiago Capítulo Estado de México.*

Díaz, V. (2010). *Diseño geomático del Modelo Hidrológico CEQUEAU para cuencas no controladas.* Universidad Autónoma del Estado de México.

Eastman, R. J. (2020). *TerrSet Manual.* www.clarklabs.org

Esse, C., Ríos, N., Saavedra, P., Fonseca, D., Encina-Montoya, F., Santander-Massa, R., De los Ríos-Escalante, P., Figueroa-Muñoz, G., López-Pérez, A., & Correa-Araneda, F. (2021). Effects of land use change on water availability and water efficiency in the temperate basins of south-central Chile. *Journal of King Saud University - Science*, 33(8). <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2021.101650>

Euscátegui, C., & Hurtado, G. (2012). *Análisis del impacto del fenómeno de “La Niña” 2010-2011 en la hidroclimatología del país* (Número 571). www.ideam.gov.co

Fniguire, F., Laftouhi, N. E., Al-Mahfadi, A. S., El Himer, H., Khalil, N., & Saidi, M. E. (2022). Hydrological modelling using the distributed hydrological model CEQUEAU in a semi-arid mountainous area: a case study of Ourika watershed, Marrakech Atlas, Morocco.



- Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, 7(1), 89–102.
<https://doi.org/10.1007/s41207-021-00287-y>
- Franco, R. (2008). *Concepción e implementación de un módulo hidrogeomático para la evaluación de disponibilidad de recursos hídricos*.
<https://www.researchgate.net/publication/331327702>
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., & Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations - A new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, 2. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
- Gaspari, F. J., Gómez, A. R. D., & Medina, F. A. M. (2021). Variabilidad espacial del rendimiento hídrico ante el cambio de uso del suelo y escenarios pluviales en la cuenca alta del río Sauce Chico, Argentina. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 12(1).
<https://doi.org/10.24850/J-TYCA-2021-01-03>
- Gaspari, F., Rodríguez Vagaría, A., Senisterra, G., Denegri, G., Delgado, M., & Besteiro, S. (2012). *Caracterización morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina*. <http://revistas.unlp.edu.ar/index.php/domus/issue/current/showToc>
- Guerra, F., & González, J. (2002). *Caracterización morfométrica de la cuenca de la quebrada La Bermeja, San Cristóbal, Estado Táchira, Venezuela*. 7, 88–108.
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=36070208>
- Gunacti, M. C., Kandemir, F. A., Najar, M., Kuzucu, A., Uyar, M., Barbaros, F., Boyacioglu, H., Gul, G. O., & Gul, A. (2022). Attribution of changes in the water balance of a basin to land-use changes through combined modelling of basin hydrology and land-use dynamics. *Journal of Water and Climate Change*, 13(11), 4087–4104.
<https://doi.org/10.2166/wcc.2022.304>
- Huffman, G., Tan, J., & National Center for Atmospheric Research Staff (Eds). (2023). *The Climate Data Guide: IMERG precipitation algorithm and the Global Precipitation Measurement (GPM) Mission*. <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/gpm-global-precipitation-measurement-mission>
- Ibáñez Asensio, S., Moreno Ramón, H., & Gisbert Blanquer, J. M. (2011). *Métodos para la determinación del tiempo de concentración (tc) de una cuenca hidrográfica*.



- Ideam. (2008). *Informe anual sobre el estado del medio ambiente y los recursos naturales renovables en Colombia*. Calle Impresores.
- Ideam. (2013). *Dinámica de cambio en coberturas de la tierra (periodos 2000-2002, 2005-2009 y 2010-2012)*.
- Ideam. (2021). *Mapa nacional de coberturas de la tierra, escala 1:100.000, periodo 2018 metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia - memoria técnica y resultados*.
- Ideam. (2023). *Estudio Nacional del Agua 2022*.
- IDEAM IGAC y CORMAGDALENA. (2008). *Mapa de Cobertura de la Tierra Cuenca Magdalena-Cauca: Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia a escala 1:100.000*.
- Ilstedt, U., Malmer, A., Verbeeten, E., & Murdiyarsa, D. (2007). The effect of afforestation on water infiltration in the tropics: A systematic review and meta-analysis. *Forest Ecology and Management*, 251(1–2), 45–51. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.06.014>
- Jaramillo, M. (2021). *Modelación del impacto por cambio de uso del suelo sobre el comportamiento hidrológico de la subcuenca del río Quindío bajo los escenarios 2000, 2020 y 2040*. Universidad Santo Tomas.
- Jobbágy, E. G., Acosta, A. M., Nosoetto, M. D., Asociada, E., & Cingolani, A. (2013). Rendimiento hídrico en cuencas primarias bajo pastizales y plantaciones de pino de las sierras de Córdoba (Argentina). *Ecología Austral*. www.indec.gov.ar
- Kumar, N., Singh, S. K., Singh, V. G., & Dzwaairo, B. (2018). Investigation of impacts of land use/land cover change on water availability of Tons River Basin, Madhya Pradesh, India. *Modeling Earth Systems and Environment*, 4(1), 295–310. <https://doi.org/10.1007/s40808-018-0425-1>
- Liu, Z., Rong, L., & Wei, W. (2022). Impacts of land use/cover change on water balance by using the SWAT model in a typical loess hilly watershed of China. *Geography and Sustainability*, 4(1), 19–28. <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2022.11.006>
- Llanos Acebo, H., Bâ, K. M., & Canalejo, A. C. (1999). *Modelación hidrológica de la cuenca alta del río Ega (País Vasco y Navarra)* (Vol. 6). <http://iwaponline.com/IA/article-pdf/6/3/241/576602/ia19992788.pdf>



- Lufi, S., Ery, S., & Rispiningtati, R. (2020). Hydrological Analysis of TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) Data in Lesti Sub Watershed. *Civil and Environmental Science*, 003(01), 018–030. <https://doi.org/10.21776/ub.civense.2020.00301.3>
- Magaña, F., Muñoz, A. C., Mora, R. S., Quiroga, L. A., & Guerra, V. H. (2021). Estimación de caudales en cuencas no aforadas por el Modelo Hidrológico CEQUEAU. *Agrociencia*, 55(2), 99–115. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v55i2.2389>
- Magaña Hernández, F., Rangel Salinas, J. L., & Díaz Mercado, V. (2008). *IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO HIDROLÓGICO DISTRIBUIDO EN LA CUENCA DEL RÍO LA SIERRA*.
- Malagón Castro, D. (2001). Los suelos de Colombia. En *Subdirección de Agrología IGAC*.
- Mango, L. M., Melesse, A. M., McClain, M. E., Gann, D., & Setegn, S. G. (2011). Land use and climate change impacts on the hydrology of the upper Mara River Basin, Kenya: Results of a modeling study to support better resource management. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(7), 2245–2258. <https://doi.org/10.5194/hess-15-2245-2011>
- Marques Louzada, V., & Bandeira de Melo Ribeiro, C. (2019). Impacts of land-use change on southeast Amazonia basin streamflow. *Revista Ambiente e Agua*, 9(3). <https://doi.org/doi:10.4136/ambi-agua.2303>
- Meza Aliaga, M., Rodríguez Valdivia, A., Corvacho Ganahín, O., & Tapia Tosetti, A. (2014). ANÁLISIS MORFOMÉTRICO DE MICROCUENCAS AFECTADAS POR FLUJOS DE DETRITOS BAJO PRECIPITACIÓN INTENSA EN MORPHOMETRIC ANALYSIS OF MICRO WATERSHEDS AFFECTED FOR DEBRIS FLOWS CAUSED BY HEAVY RAINS IN THE CAMIÑA VALLEY, NORTHERN OF CHILE. En *Nº* (Vol. 44).
- Minga, S. (2022). *Simulación hidrológica considerando cambio de uso/cobertura del suelo, variabilidad y cambio climático en cuencas mexicanas*. Universidad Autónoma del Estado de México.
- Mongui, P., & Sierra, P. (2021). *Evaluación de la respuesta hídrica de la microcuenca Hato Laguna mediante el modelo hidrológico SWAT*. Universidad Santo Tomas.
- Moreno, J. M., Gamboa, M. P., Navarrete, Á., & Peñuela, L. (2016). *Plan de Ordenación y Manejo Ambiental de la Cuenca del Río Garagoa Corpochivor – Corpoboyacá – CAR. III. COMPONENTE GEOSFÉRICO*.



- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Moriasi, D. N., Gitau, M. W., Pai, N., & Daggupati, P. (2015). Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria. *Transactions of the ASABE*, 58(6), 1763–1785. <https://doi.org/10.13031/trans.58.10715>
- Morin, G. (2003). *CEQUEAU hydrological model*.
- Morin, G., & Paquet, Pierre. (1995). *Le modèle de simulation de quantité et de qualité CEQUEAU: Guide de l'utilisateur version 2.0 pour Windows*. INRS-Eau.
- NASA, & GPM Global Precipitation Measurement Mission. (2023). *IMERG V07 Release Notes*. <https://gpm.nasa.gov/resources/documents/imerg-v07-release-notes>
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. (2005). *Herramienta de Evaluación de Suelo y Agua Documentación Teórica Versión 2005*.
- Observatorio Ambiental de Boyacá. (2015). *Cobertura y uso del suelo en Boyacá*. <https://observatorioambiental.boyaca.gov.co/cobertura-y-uso-del-suelo-en-boyaca/>
- Ortiz Vera, O. (2004). Evaluación hidrológica. *HIDRORED - Red Latinoamericana de Micro Hidroenergía*.
- Patil, N. S., & Nataraja, M. (2020). Effect of land use land cover changes on runoff using hydrological model: a case study in Hiranyakeshi watershed. *Modeling Earth Systems and Environment*, 6(4), 2345–2357. <https://doi.org/10.1007/s40808-020-00808-8>
- Poggio, L., De Sousa, L. M., Batjes, N. H., Heuvelink, G. B. M., Kempen, B., Ribeiro, E., & Rossiter, D. (2021). SoilGrids 2.0: Producing soil information for the globe with quantified spatial uncertainty. *SOIL*, 7(1), 217–240. <https://doi.org/10.5194/soil-7-217-2021>
- Rodrigues da Silva, V., Silva, M. T., Singh, V. P., de Souza, E. P., Braga, C. C., de Holanda, R. M., Almeida, R. S. R., de Assis Salviano de Sousa, F., & Braga, A. C. R. (2018). Simulation of stream flow and hydrological response to land-cover changes in a tropical river basin. *Catena*, 162, 166–176. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.11.024>



- Rodríguez, E., García-Echeverri, C., González, A., Sandoval, J., Patarroyo-González, M., & Agudelo-Duque, D. E. (2024). Evaluating the IMERG precipitation satellite product to derive intensity-duration-frequency curves in Colombia. *Revista Facultad de Ingeniería*, 110, 31–47. <https://doi.org/10.17533/UDEA.REDIN.20230212>
- Said, M., Hyandye, C., Mjemah, I. C., Komakech, H. C., & Munishi, L. K. (2021). Evaluation and Prediction of the Impacts of Land Cover Changes on Hydrological Processes in Data Constrained Southern Slopes of Kilimanjaro, Tanzania. *Earth (Switzerland)*, 2(2), 225–247. <https://doi.org/10.3390/earth2020014>
- Siles Soria, G. (2022). REANÁLISIS CLIMATOLÓGICO ERA5: UNA REVISIÓN SOBRE SU USO EN EL CÁLCULO DE ATENUACIÓN ATMOSFÉRICA EN SISTEMAS DE COMUNICACIONES SATELITALES. *Revista Investigación & Desarrollo*, 22(1). <https://doi.org/10.23881/idupbo.022.1-12i>
- Sujarwo, M. W., Indarto, I., & Mandala, M. (2022). The impact of land use and land cover change on hydrological processes in Brantas watershed, East Java, Indonesia. *Kuwait J.Sci.*, Vol.49, 1–16.
- Uribe, N. (2010). *SWAT (Soil and Water Assessment Tool) Conceptos básicos y guía rápida para el usuario - Versión SWAT2005*.
- Urrea, V., Ochoa, A., & Mesa, O. (2016). Validación de la base de datos de precipitación CHIRPS para Colombia a escala diaria, mensual y anual en el Periodo 1981-2014. *XXVII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA LIMA, PERÚ, 28 AL 30 DE SETIEMBRE DE 2016*. <http://www.ipcc.ch/>
- U.S. Department of Agriculture. (2016). *SPAW*. Hydrology and Remote Sensing Laboratory: Beltsville, MD.
- Vilchis, I., Bâ, K. M., Franco, R., & Díaz, C. (2015). *Modelación hidrológica con base en estimaciones de precipitación con sensores hidrometeorológicos*. VI, 45–60. <http://www.isac>.
- Williams, J. R. (1995). Chapter 25. The EPIC Model. *Water Resources Publications*, 909–1000.



ANEXOS



Anexo A. Inventario de eventos climáticos ocasionados por fuertes precipitaciones - departamento de Boyacá

FECHA	MUNICIPIO	EVENTO	FECHA	MUNICIPIO	EVENTO
10/04/1998	VARIOS	AVALANCHA	04/06/2011	UMBITA	INUNDACIÓN
06/07/1998	TIBANA	AVALANCHA	04/06/2011	VENTAQUEMADA	INUNDACIÓN
01/08/1998	RAMIRIQUI	DESLIZAMIENTO	05/06/2011	VIRACACHA	DESLIZAMIENTO
07/10/1998	RAMIRIQUI	INUNDACIÓN	24/06/2011	NUEVO COLON	INUNDACIÓN
06/10/1999	TENZA	INUNDACIÓN	28/06/2011	VENTAQUEMADA	INUNDACIÓN
31/10/1999	TUNJA	INUNDACIÓN	06/07/2011	AQUITANIA	INUNDACIÓN
01/11/1999	RAMIRIQUI	DESLIZAMIENTO	07/07/2011	BOYACA	INUNDACIÓN
03/11/1999	TURMEQUE	AVALANCHA	17/07/2011	TUNJA	DESLIZAMIENTO
29/03/2000	TUNJA	INUNDACIÓN	01/08/2011	TIBANA	INUNDACIÓN
28/09/2000	GARAGOA	DESLIZAMIENTO	08/08/2011	TURMEQUE	INUNDACIÓN
11/11/2000	LA CAPILLA	AVALANCHA	04/10/2011	CIENEGA	DESLIZAMIENTO
30/08/2002	TIBANA	DESLIZAMIENTO	20/10/2011	TIBANA	INUNDACIÓN
01/09/2002	SUTATENZA	DESLIZAMIENTO	22/10/2011	CHINAVITA	DESLIZAMIENTO
04/10/2002	BOYACA	DESLIZAMIENTO	24/10/2011	TUNJA	INUNDACIÓN
04/10/2002	RAMIRIQUI	DESLIZAMIENTO	11/11/2011	SAMACA	DESLIZAMIENTO
04/10/2002	LA CAPILLA	DESLIZAMIENTO	17/11/2011	TUNJA	INUNDACIÓN
04/10/2002	TENZA	DESLIZAMIENTO	17/11/2011	NUEVO COLON	INUNDACIÓN
04/10/2002	PACHAVITA	DESLIZAMIENTO	18/11/2011	GARAGOA	INUNDACIÓN
31/10/2002	TUNJA	INUNDACIÓN	18/11/2011	GARAGOA	INUNDACIÓN
31/10/2002	LA CAPILLA	AVALANCHA	24/11/2011	GARAGOA	INUNDACIÓN
12/09/2003	TIBANA	INUNDACIÓN	07/12/2011	CHINAVITA	DESLIZAMIENTO
05/10/2003	TUNJA	INUNDACIÓN	07/12/2011	PACHAVITA	DESLIZAMIENTO
16/10/2003	GARAGOA	INUNDACIÓN	15/12/2011	SUTATENZA	DESLIZAMIENTO
09/11/2003	TUNJA	INUNDACIÓN	26/12/2011	NUEVO COLON	INUNDACIÓN
18/12/2004	TUNJA	INUNDACIÓN	31/12/2011	TURMEQUE	INUNDACIÓN
05/05/2005	SORACA	DESLIZAMIENTO	03/01/2012	TUNJA	INUNDACIÓN
12/11/2005	TUNJA	INUNDACIÓN	02/03/2012	MACANAL	INUNDACIÓN
13/11/2005	TIBANA	INUNDACIÓN	03/04/2012	TIBANA	INUNDACIÓN
20/11/2005	TUNJA	INUNDACIÓN	11/04/2012	CHINAVITA	INUNDACIÓN
15/12/2005	CHINAVITA	INUNDACIÓN	13/04/2012	NUEVO COLON	DESLIZAMIENTO
15/05/2006	CHINAVITA	DESLIZAMIENTO	15/04/2012	BOYACA	INUNDACIÓN
14/09/2006	UMBITA	DESLIZAMIENTO	15/04/2012	RAMIRIQUI	INUNDACIÓN
10/11/2007	JENESANO	DESLIZAMIENTO	20/04/2012	SAMACA	DESLIZAMIENTO
10/09/2008	TENZA	INUNDACIÓN	21/04/2012	TUNJA	INUNDACIÓN
28/11/2008	VENATAQUEMADA	INUNDACIÓN	22/04/2012	JENESANO	INUNDACIÓN
01/12/2008	GARAGOA	INUNDACIÓN	23/04/2012	SORACA	INUNDACIÓN
01/12/2008	NUEVO COLON	INUNDACIÓN	26/04/2012	NUEVO COLON	INUNDACIÓN
01/12/2008	RAMIRIQUI	INUNDACIÓN	27/04/2012	CIENEGA	INUNDACIÓN
01/12/2008	TENZA	INUNDACIÓN	11/05/2012	JENESANO	INUNDACIÓN
01/12/2008	TURMEQUE	INUNDACIÓN	11/05/2012	UMBITA	INUNDACIÓN
02/12/2008	TUNJA	INUNDACIÓN	15/05/2012	BOYACA	INUNDACIÓN
07/09/2009	TENZA	INUNDACIÓN	26/06/2012	CHINAVITA	INUNDACIÓN
01/01/2010	VIRACACHA	DESLIZAMIENTO	28/07/2012	SUTATENZA	DESLIZAMIENTO
02/01/2010	TUNJA	INUNDACIÓN	04/08/2012	TENZA	DESLIZAMIENTO
03/01/2010	TUNJA	INUNDACIÓN	06/08/2012	JENESANO	DESLIZAMIENTO
04/01/2010	TUNJA	INUNDACIÓN	15/08/2012	CHINAVITA	INUNDACIÓN
05/01/2010	NUEVO COLON	DESLIZAMIENTO	15/08/2012	GARAGOA	DESLIZAMIENTO
06/01/2010	PACHAVITA	DESLIZAMIENTO	20/10/2012	TUNJA	DESLIZAMIENTO
07/01/2010	SUTATENZA	INUNDACIÓN	02/05/2013	TUNJA	INUNDACIÓN



FECHA	MUNICIPIO	EVENTO	FECHA	MUNICIPIO	EVENTO
08/01/2010	TENZA	DESLIZAMIENTO	09/05/2013	TENZA	DESLIZAMIENTO
09/01/2010	BOYACA	DESLIZAMIENTO	10/08/2013	TIBANA	INUNDACIÓN
10/01/2010	TUNJA	INUNDACIÓN	07/11/2013	TUNJA	INUNDACIÓN
11/01/2010	TIBANA	DESLIZAMIENTO	04/03/2014	TUNJA	INUNDACIÓN
12/01/2010	TUNJA	DESLIZAMIENTO	25/06/2015	GARAGOA	DESLIZAMIENTO
13/01/2010	TUNJA	DESLIZAMIENTO	25/06/2015	RAMIRIQUI	INUNDACIÓN
14/01/2010	CHINAVITA	INUNDACIÓN	25/06/2015	UMBITA	DESLIZAMIENTO
13/04/2011	TUNJA	DESLIZAMIENTO	01/07/2015	MACANAL	DESLIZAMIENTO
13/04/2011	TUNJA	DESLIZAMIENTO	08/05/2016	SAMACA	INUNDACIÓN
17/04/2011	GARAGOA	DESLIZAMIENTO	28/05/2016	VENTAQUEMADA	DESLIZAMIENTO
18/04/2011	TUNJA	DESLIZAMIENTO	21/06/2016	CHINAVITA	DESLIZAMIENTO
19/04/2011	BOYACA	DESLIZAMIENTO	27/07/2016	TIBANA	INUNDACIÓN
19/04/2011	TUNJA	INUNDACIÓN	27/07/2016	TENZA	INUNDACIÓN
22/04/2011	CIENEGA	INUNDACIÓN	10/11/2016	TUNJA	INUNDACIÓN
26/04/2011	NUEVO COLON	DESLIZAMIENTO	08/03/2017	SAMACA	INUNDACIÓN
02/05/2011	NUEVO COLON	DESLIZAMIENTO	27/03/2017	TUNJA	INUNDACIÓN
02/05/2011	TUNJA	INUNDACIÓN	15/06/2017	TUNJA	DESLIZAMIENTO
05/05/2011	RAMIRIQUI	INUNDACIÓN	20/06/2017	CIENEGA	DESLIZAMIENTO
05/05/2011	TUNJA	DESLIZAMIENTO	01/08/2017	NUEVO COLON	INUNDACIÓN
10/05/2011	CIENEGA	INUNDACIÓN	02/10/2017	TUNJA	DESLIZAMIENTO
12/05/2011	SORACA	DESLIZAMIENTO	16/07/2018	SUTATENZA	INUNDACIÓN
13/05/2011	JENESANO	INUNDACIÓN	13/09/2018	VENTAQUEMADA	INUNDACIÓN
13/05/2011	TUNJA	INUNDACIÓN	06/11/2018	TUNJA	INUNDACIÓN
14/05/2011	TIBANA	DESLIZAMIENTO	16/06/2019	TUNJA	DESLIZAMIENTO
18/05/2011	MUZO	AVALANCHA	25/06/2019	VIRACACHA	DESLIZAMIENTO
27/05/2011	CIENEGA	INUNDACIÓN	13/04/2020	SAMACA	INUNDACIÓN
27/05/2011	PACHAVITA	DESLIZAMIENTO	11/05/2020	SUTATENZA	DESLIZAMIENTO
27/05/2011	TURMEQUE	INUNDACIÓN	21/06/2020	TUNJA	DESLIZAMIENTO
03/06/2011	CHINAVITA	DESLIZAMIENTO	10/11/2020	JENESANO	DESLIZAMIENTO
04/06/2011	CIENEGA	DESLIZAMIENTO	24/06/2021	BOYACA	MOVIMIENTO EN MASA
04/06/2011	LA CAPILLA	INUNDACIÓN	14/03/2022	TIBANA	GRANIZADA
04/06/2011	RAMIRIQUI	INUNDACIÓN	24/03/2022	JENESANO	GRANIZADA
04/06/2011	SAMACA	INUNDACIÓN	04/05/2022	JENESANO	GRANIZADA
04/06/2011	TIBANA	INUNDACIÓN	30/06/2022	TURMEQUE	DESLIZAMIENTO
04/06/2011	TURMEQUE	INUNDACIÓN	18/10/2022	UMBITA	CRECIENTE SUBITA

Fuente: Consolidado anual de emergencias, UNGRD



Anexo B. Eventos de lluvia registrados por las estaciones y CHIRPS e IMERG

Tabla B-1. Eventos de lluvia registrados por la estación Chinavita y los productos CHIRPS e IMERG

ESTACIÓN: CHINAVITA [35070070]							
Año	Datos faltantes	Eventos con lluvia mayor a 0 mm			Eventos con lluvia mayor a 5 mm		
		Observados	CHIRPS	IMERG	Observados	CHIRPS	IMERG
2000	0	255	102	182	107	92	65
2001	0	230	95	300	81	70	88
2002	0	210	101	281	89	84	91
2003	31	168	99	261	84	89	98
2004	31	201	112	275	111	93	90
2005	0	211	96	274	95	85	99
2006	0	263	98	279	115	90	80
2007	0	249	78	251	94	73	80
2008	0	222	108	272	88	100	103
2009	0	215	95	260	67	78	80
2010	0	228	137	276	104	108	108
2011	0	263	115	292	109	102	116
2012	0	228	96	279	108	89	91
2013	0	251	98	251	90	82	72
2014	0	220	70	256	90	63	68
2015	0	232	79	252	92	73	68
2016	0	240	103	251	92	95	82
2017	0	271	102	247	90	89	72
2018	0	260	89	247	97	79	69
2019	1	241	108	237	97	86	77
2020	0	225	108	228	82	85	73
2021	0	242	99	250	104	84	82
2022	1	237	111	238	109	95	91
Año	Datos faltantes	Eventos con lluvia mayor a 10 mm			Eventos con lluvia mayor a 20 mm		
		Observados	CHIRPS	IMERG	Observados	CHIRPS	IMERG
2000	0	47	66	40	21	19	16
2001	0	39	44	58	14	22	22
2002	0	44	55	54	12	21	23
2003	31	46	66	54	12	24	35
2004	31	50	55	57	12	19	31
2005	0	41	55	64	12	22	30
2006	0	51	62	50	14	22	30
2007	0	49	44	43	12	22	23
2008	0	54	63	73	13	17	28
2009	0	33	42	43	7	12	21
2010	0	57	57	74	16	20	39
2011	0	60	69	73	23	32	29
2012	0	52	55	57	16	23	30
2013	0	39	48	44	10	15	14
2014	0	42	40	35	7	20	15
2015	0	40	47	42	11	14	11
2016	0	52	55	54	19	17	22
2017	0	38	50	42	14	16	24
2018	0	52	48	46	11	23	20
2019	1	45	32	36	15	11	17
2020	0	44	46	46	13	13	22
2021	0	41	49	53	11	17	25
2022	1	61	53	52	18	20	27



Tabla B-2. Eventos de lluvia registrados por la estación Garagoa y los productos CHIRPS e IMERG

ESTACIÓN: GARAGOA [35070080]							
Año	Datos faltantes	Eventos con lluvia mayor a 0 mm			Eventos con lluvia mayor a 5 mm		
		Observados	CHIRPS	IMERG	Observados	CHIRPS	IMERG
2000	0	218	106	177	92	99	59
2001	0	215	98	283	72	85	87
2002	31	205	107	263	83	97	91
2003	0	215	103	263	86	93	98
2004	0	200	109	263	94	93	100
2005	0	176	101	268	83	95	99
2006	0	217	101	268	98	101	96
2007	0	204	90	249	88	83	104
2008	0	202	110	274	86	97	113
2009	0	193	92	259	70	84	84
2010	0	206	132	270	93	115	114
2011	0	229	121	293	107	107	121
2012	0	206	103	268	106	99	101
2013	0	212	97	246	81	87	76
2014	0	203	72	236	75	68	75
2015	1	199	80	240	78	79	73
2016	1	197	106	249	94	97	90
2017	0	217	95	245	76	80	75
2018	0	237	90	238	88	84	84
2019	0	235	103	227	85	87	85
2020	2	228	114	229	82	95	79
2021	0	236	106	242	89	102	94
2022	0	235	112	238	102	100	94

Año	Datos faltantes	Eventos con lluvia mayor a 10 mm			Eventos con lluvia mayor a 20 mm		
		Observados	CHIRPS	IMERG	Observados	CHIRPS	IMERG
2000	0	43	76	39	17	27	17
2001	0	34	52	57	13	21	28
2002	31	47	63	62	10	25	30
2003	0	45	66	62	17	28	37
2004	0	48	56	71	21	26	32
2005	0	46	73	64	11	31	33
2006	0	55	68	53	14	29	31
2007	0	41	55	57	7	29	26
2008	0	50	70	75	8	28	36
2009	0	34	52	55	7	22	23
2010	0	47	65	71	11	28	38
2011	0	53	70	80	20	39	35
2012	0	55	63	62	20	36	28
2013	0	33	56	44	9	28	17
2014	0	39	48	39	3	25	14
2015	1	32	57	47	12	19	14
2016	1	54	66	58	20	30	28
2017	0	42	54	54	13	29	29
2018	0	48	65	54	14	29	24
2019	0	38	47	46	11	16	21
2020	2	41	64	49	11	24	23
2021	0	45	62	58	9	25	27
2022	0	52	73	60	13	33	29



Tabla B-3. Eventos de lluvia registrados por la estación Jenesano y los productos CHIRPS e IMERG

ESTACIÓN: JENESANO [35070080]							
Año	Datos faltantes	Eventos con lluvia mayor a 0 mm			Eventos con lluvia mayor a 5 mm		
		Observados	CHIRPS	IMERG	Observados	CHIRPS	IMERG
2000	0	252	107	159	55	89	53
2001	61	175	97	274	37	71	55
2002	275	29	106	250	7	67	70
2003	365	0	107	252	0	84	65
2004	366	0	114	242	0	78	71
2005	365	0	101	255	0	86	71
2006	365	0	95	246	0	81	65
2007	365	0	82	217	0	67	52
2008	366	0	99	231	0	84	67
2009	365	0	96	228	0	68	44
2010	365	0	121	266	0	95	89
2011	365	0	116	270	0	91	95
2012	366	0	102	261	0	70	56
2013	365	0	93	224	0	69	40
2014	365	0	81	227	0	61	45
2015	365	0	77	205	0	70	47
2016	366	0	107	226	0	86	55
2017	365	0	104	229	0	74	47
2018	365	0	104	218	0	86	52
2019	365	0	104	216	0	77	42
2020	366	0	109	204	0	75	47
2021	365	0	92	238	0	88	60
2022	365	0	124	225	0	97	74

Año	Datos faltantes	Eventos con lluvia mayor a 10 mm			Eventos con lluvia mayor a 20 mm		
		Observados	CHIRPS	IMERG	Observados	CHIRPS	IMERG
2000	0	30	32	26	7	9	7
2001	61	11	29	24	2	7	9
2002	275	1	34	39	1	6	17
2003	365	0	46	39	0	11	16
2004	366	0	39	37	0	9	17
2005	365	0	38	39	0	8	15
2006	365	0	46	31	0	15	15
2007	365	0	33	31	0	15	9
2008	366	0	47	44	0	8	13
2009	365	0	38	24	0	5	10
2010	365	0	49	58	0	12	24
2011	365	0	51	58	0	20	27
2012	366	0	29	33	0	13	15
2013	365	0	37	22	0	7	7
2014	365	0	32	20	0	6	7
2015	365	0	45	20	0	12	4
2016	366	0	44	35	0	6	9
2017	365	0	36	21	0	8	5
2018	365	0	34	32	0	9	11
2019	365	0	26	23	0	4	10
2020	366	0	31	27	0	9	8
2021	365	0	43	35	0	7	12
2022	365	0	50	46	0	3	16



Tabla B-4. Eventos de lluvia registrados por la estación Nuevo Colón y los productos CHIRPS e IMERG

ESTACIÓN: NUEVO COLON [35075010]							
Año	Datos faltantes	Eventos con lluvia mayor a 0 mm			Eventos con lluvia mayor a 5 mm		
		Observados	CHIRPS	IMERG	Observados	CHIRPS	IMERG
2000	0	208	107	153	58	91	49
2001	1	192	100	249	59	72	52
2002	1	209	102	237	58	74	68
2003	0	231	102	240	56	89	67
2004	0	234	113	235	68	87	57
2005	31	208	92	231	50	78	61
2006	1	246	91	243	69	76	54
2007	30	199	76	193	53	66	52
2008	0	216	96	233	71	79	73
2009	1	190	89	213	49	74	47
2010	30	184	116	251	62	95	90
2011	0	213	105	257	76	93	90
2012	0	188	96	228	60	68	56
2013	1	193	91	191	59	77	45
2014	0	172	71	214	65	56	50
2015	3	178	74	195	49	71	45
2016	3	196	103	207	61	91	52
2017	2	176	104	228	50	77	47
2018	0	182	100	201	70	85	51
2019	1	154	101	206	61	78	42
2020	10	198	111	196	55	75	47
2021	0	183	98	218	65	81	66
2022	2	179	110	209	70	94	71

Año	Datos faltantes	Eventos con lluvia mayor a 10 mm			Eventos con lluvia mayor a 20 mm		
		Observados	CHIRPS	IMERG	Observados	CHIRPS	IMERG
2000	0	27	45	22	10	7	12
2001	1	20	35	27	2	10	6
2002	1	23	44	36	4	6	14
2003	0	21	45	36	1	11	16
2004	0	26	42	32	4	9	9
2005	31	16	46	36	2	13	17
2006	1	30	50	37	6	17	11
2007	30	21	34	34	3	17	13
2008	0	30	49	38	6	16	12
2009	1	24	41	22	6	5	7
2010	30	24	44	52	4	13	23
2011	0	43	55	59	15	23	28
2012	0	21	37	33	3	17	12
2013	1	30	43	21	6	13	5
2014	0	17	32	18	3	13	6
2015	3	17	51	19	2	12	4
2016	3	27	50	27	2	11	7
2017	2	25	41	22	5	8	9
2018	0	30	48	32	6	11	10
2019	1	25	33	21	2	3	8
2020	10	19	43	27	2	7	10
2021	0	27	39	36	5	11	12
2022	2	31	51	38	5	12	15



Tabla B-5. Eventos de lluvia registrados por la estación Pachavita y los productos CHIRPS e IMERG

ESTACIÓN: PACHAVITA [35070210]							
Año	Datos faltantes	Eventos con lluvia mayor a 0 mm			Eventos con lluvia mayor a 5 mm		
		Observados	CHIRPS	IMERG	Observados	CHIRPS	IMERG
2000	0	197	104	182	68	97	65
2001	0	182	93	300	74	82	88
2002	0	188	101	281	82	83	91
2003	31	177	98	261	87	89	98
2004	0	184	117	275	90	97	90
2005	0	163	94	274	79	86	99
2006	0	192	97	279	95	96	80
2007	0	180	87	251	87	78	80
2008	0	179	112	272	87	102	103
2009	0	168	96	260	62	86	80
2010	0	201	135	276	85	105	108
2011	0	211	114	292	90	102	116
2012	0	201	100	279	93	93	91
2013	0	196	93	251	78	80	72
2014	0	178	71	256	59	66	68
2015	0	194	81	252	67	72	68
2016	0	200	109	251	80	102	82
2017	0	194	98	247	73	85	72
2018	0	208	90	247	83	81	69
2019	0	185	104	237	77	87	77
2020	0	188	115	228	76	85	73
2021	0	214	98	250	76	91	82
2022	0	207	113	238	88	99	91
Año	Datos faltantes	Eventos con lluvia mayor a 10 mm			Eventos con lluvia mayor a 20 mm		
		Observados	CHIRPS	IMERG	Observados	CHIRPS	IMERG
2000	0	39	66	40	13	21	16
2001	0	38	44	58	16	22	22
2002	0	46	56	54	17	21	23
2003	31	48	66	54	9	20	35
2004	0	51	56	57	14	18	31
2005	0	37	62	64	9	30	30
2006	0	48	67	50	9	25	30
2007	0	39	48	43	7	22	23
2008	0	42	62	73	6	17	28
2009	0	28	40	43	5	17	21
2010	0	44	60	74	14	27	39
2011	0	51	73	73	20	33	29
2012	0	45	60	57	13	28	30
2013	0	33	51	44	9	23	14
2014	0	26	42	35	3	19	15
2015	0	32	53	42	8	15	11
2016	0	43	60	54	17	21	22
2017	0	35	46	42	13	22	24
2018	0	45	55	46	12	23	20
2019	0	38	39	36	6	14	17
2020	0	37	56	46	8	16	22
2021	0	39	56	53	12	22	25
2022	0	45	62	52	7	24	27



Tabla B-6. Eventos de lluvia registrados por la estación Los Quinchos y los productos CHIRPS e IMERG

ESTACIÓN: LOS QUINCHOS [35070060]							
Año	Datos faltantes	Eventos con lluvia mayor a 0 mm			Eventos con lluvia mayor a 5 mm		
		Observados	CHIRPS	IMERG	Observados	CHIRPS	IMERG
2000	0	226	97	165	111	86	57
2001	0	219	94	270	141	83	74
2002	0	206	97	247	118	91	77
2003	0	226	104	249	126	93	82
2004	0	194	120	251	114	103	76
2005	0	216	100	243	99	95	84
2006	0	215	95	244	117	91	70
2007	1	171	69	217	106	63	63
2008	61	169	101	235	93	93	85
2009	1	215	96	227	74	86	56
2010	0	225	131	255	110	108	98
2011	1	267	113	264	127	104	105
2012	0	226	95	250	106	84	73
2013	31	205	96	218	92	88	69
2014	0	231	71	222	103	68	52
2015	0	228	81	214	100	74	57
2016	0	196	107	231	111	101	66
2017	0	226	95	229	106	86	67
2018	0	264	91	220	157	83	64
2019	1	217	103	213	98	82	52
2020	0	184	107	215	52	85	61
2021	0	230	98	227	58	87	73
2022	11	227	105	217	44	98	79

Año	Datos faltantes	Eventos con lluvia mayor a 10 mm			Eventos con lluvia mayor a 20 mm		
		Observados	CHIRPS	IMERG	Observados	CHIRPS	IMERG
2000	0	63	67	34	19	24	14
2001	0	76	50	44	33	16	16
2002	0	57	66	47	16	29	24
2003	0	76	64	56	27	18	27
2004	0	67	51	47	22	23	16
2005	0	49	59	46	16	20	24
2006	0	64	66	45	28	23	24
2007	1	65	42	34	29	24	17
2008	61	45	62	55	22	24	20
2009	1	38	47	33	12	14	14
2010	0	61	58	64	23	26	30
2011	1	83	70	63	35	36	27
2012	0	58	53	49	24	23	21
2013	31	44	53	32	13	15	6
2014	0	57	43	25	23	20	10
2015	0	47	43	30	20	14	10
2016	0	62	56	39	24	13	13
2017	0	48	46	32	18	18	13
2018	0	68	53	31	32	18	14
2019	1	21	40	34	7	12	15
2020	0	18	48	34	2	16	16
2021	0	18	54	46	3	16	25
2022	11	10	62	48	1	19	23



Tabla B-7. Eventos de lluvia registrados por la estación Ramiriquí y los productos CHIRPS e IMERG

ESTACIÓN: RAMIRIQUI [35070010]							
Año	Datos faltantes	Eventos con lluvia mayor a 0 mm			Eventos con lluvia mayor a 5 mm		
		Observados	CHIRPS	IMERG	Observados	CHIRPS	IMERG
2000	0	251	100	159	65	86	53
2001	0	228	96	274	68	75	55
2002	1	224	97	250	76	83	70
2003	0	236	105	252	84	90	65
2004	0	243	115	242	73	89	71
2005	61	194	97	255	59	83	71
2006	59	227	97	246	82	87	65
2007	0	222	68	217	81	63	52
2008	0	231	96	231	89	87	67
2009	30	199	89	228	53	78	44
2010	0	223	123	266	87	95	89
2011	1	248	102	270	93	92	95
2012	62	175	101	261	60	88	56
2013	0	219	91	224	69	74	40
2014	1	210	68	227	56	62	45
2015	0	219	76	205	51	72	47
2016	0	211	104	226	71	96	55
2017	0	201	86	229	62	74	47
2018	1	216	104	218	74	96	52
2019	0	201	101	216	67	85	42
2020	0	191	109	204	70	84	47
2021	0	206	89	238	66	86	60
2022	1	209	115	225	84	99	74

Año	Datos faltantes	Eventos con lluvia mayor a 10 mm			Eventos con lluvia mayor a 20 mm		
		Observados	CHIRPS	IMERG	Observados	CHIRPS	IMERG
2000	0	39	48	26	10	11	7
2001	0	20	42	24	1	10	9
2002	1	33	49	39	8	6	17
2003	0	36	49	39	3	7	16
2004	0	35	48	37	6	7	17
2005	61	18	43	39	2	10	15
2006	59	34	53	31	8	16	15
2007	0	26	39	31	4	14	9
2008	0	47	53	44	10	10	13
2009	30	23	39	24	2	8	10
2010	0	41	45	58	10	13	24
2011	1	53	57	58	12	28	27
2012	62	22	40	33	5	14	15
2013	0	29	41	22	6	13	7
2014	1	22	36	20	10	13	7
2015	0	22	50	20	4	12	4
2016	0	28	54	35	5	9	9
2017	0	30	43	21	8	13	5
2018	1	32	49	32	15	14	11
2019	0	33	40	23	5	9	10
2020	0	32	54	27	5	11	8
2021	0	34	56	35	8	15	12
2022	1	46	66	46	7	17	16



Tabla B-8. Eventos de lluvia registrados por la estación Teatinos y los productos CHIRPS e IMERG

ESTACIÓN: TEATINOS [35070310]							
Año	Datos faltantes	Eventos con lluvia mayor a 0 mm			Eventos con lluvia mayor a 5 mm		
		Observados	CHIRPS	IMERG	Observados	CHIRPS	IMERG
2000	0	249	107	159	82	89	53
2001	0	233	97	274	82	71	55
2002	5	228	106	250	75	67	70
2003	0	226	107	252	80	84	65
2004	0	248	114	242	94	78	71
2005	62	198	101	255	65	86	71
2006	1	264	95	246	95	81	65
2007	0	238	82	217	82	67	52
2008	0	237	99	231	89	84	67
2009	0	227	96	228	93	68	44
2010	1	229	121	266	88	95	89
2011	92	186	116	270	85	91	95
2012	0	213	102	261	95	70	56
2013	0	201	93	224	74	69	40
2014	0	191	81	227	84	61	45
2015	0	211	77	205	71	70	47
2016	0	224	107	226	83	86	55
2017	0	222	104	229	84	74	47
2018	0	244	104	218	93	86	52
2019	0	209	104	216	72	77	42
2020	15	184	109	204	77	75	47
2021	0	208	92	238	91	88	60
2022	184	106	124	225	42	97	74
Año	Datos faltantes	Eventos con lluvia mayor a 10 mm			Eventos con lluvia mayor a 20 mm		
		Observados	CHIRPS	IMERG	Observados	CHIRPS	IMERG
2000	0	35	32	26	8	9	7
2001	0	36	29	24	3	7	9
2002	5	36	34	39	12	6	17
2003	0	37	46	39	9	11	16
2004	0	40	39	37	10	9	17
2005	62	32	38	39	7	8	15
2006	1	46	46	31	14	15	15
2007	0	39	33	31	8	15	9
2008	0	39	47	44	8	8	13
2009	0	31	38	24	8	5	10
2010	1	43	49	58	10	12	24
2011	92	53	51	58	17	20	27
2012	0	45	29	33	8	13	15
2013	0	36	37	22	9	7	7
2014	0	33	32	20	5	6	7
2015	0	32	45	20	10	12	4
2016	0	35	44	35	7	6	9
2017	0	44	36	21	12	8	5
2018	0	45	34	32	12	9	11
2019	0	39	26	23	10	4	10
2020	15	40	31	27	13	9	8
2021	0	34	43	35	8	7	12
2022	184	14	50	46	2	3	16



Tabla B-9. Eventos de lluvia registrados por la estación Tibana y los productos CHIRPS e IMERG

ESTACIÓN: TIBANA [35070040]							
Año	Datos faltantes	Eventos con lluvia mayor a 0 mm			Eventos con lluvia mayor a 5 mm		
		Observados	CHIRPS	IMERG	Observados	CHIRPS	IMERG
2000	0	198	95	161	78	84	50
2001	0	197	96	257	64	74	62
2002	244	53	100	240	15	80	70
2003	59	277	99	242	159	93	69
2004	1	234	120	229	114	92	71
2005	30	203	93	240	117	85	73
2006	0	249	97	247	181	84	65
2007	30	213	74	206	150	63	61
2008	0	232	94	232	129	83	79
2009	0	184	90	217	82	77	49
2010	0	203	120	253	115	103	92
2011	0	264	103	268	169	93	101
2012	60	216	98	235	106	80	64
2013	0	218	96	211	114	82	48
2014	0	181	63	218	102	60	50
2015	0	176	72	203	90	71	44
2016	0	192	105	219	125	94	55
2017	0	173	101	225	128	87	61
2018	0	188	99	204	120	81	49
2019	1	152	99	208	95	80	45
2020	1	144	114	203	131	90	49
2021	0	197	94	222	181	89	68
2022	0	155	107	225	125	91	81

Año	Datos faltantes	Eventos con lluvia mayor a 10 mm			Eventos con lluvia mayor a 20 mm		
		Observados	CHIRPS	IMERG	Observados	CHIRPS	IMERG
2000	0	38	57	30	11	14	11
2001	0	24	40	29	8	11	11
2002	244	6	42	44	3	9	20
2003	59	53	52	45	20	14	19
2004	1	49	44	42	22	9	18
2005	30	49	50	47	17	13	21
2006	0	113	57	34	25	19	15
2007	30	79	39	31	20	16	16
2008	0	48	54	44	12	17	16
2009	0	25	42	26	4	10	12
2010	0	53	47	59	15	17	24
2011	0	68	60	58	17	24	25
2012	60	34	38	37	11	18	12
2013	0	55	45	27	10	17	7
2014	0	44	39	26	5	14	9
2015	0	36	48	19	9	16	5
2016	0	40	55	34	16	17	13
2017	0	63	47	30	11	9	7
2018	0	43	48	34	9	15	12
2019	1	25	43	24	5	7	11
2020	1	59	44	27	14	12	12
2021	0	88	52	35	22	11	15
2022	0	45	64	42	14	14	20



Tabla B-10. Eventos de lluvia registrados por la estación Turmequé y los productos CHIRPS e IMERG

ESTACIÓN: TURMEQUÉ [35070030]							
Año	Datos faltantes	Eventos con lluvia mayor a 0 mm			Eventos con lluvia mayor a 5 mm		
		Observados	CHIRPS	IMERG	Observados	CHIRPS	IMERG
2000	3	206	99	153	58	83	49
2001	0	219	98	249	42	67	52
2002	0	231	100	237	22	66	68
2003	31	236	106	240	60	82	67
2004	0	233	103	235	66	72	57
2005	0	244	95	231	32	74	61
2006	0	286	91	243	47	75	54
2007	0	237	71	193	43	55	52
2008	0	251	94	233	62	71	73
2009	0	238	90	213	36	57	47
2010	0	232	120	251	63	84	90
2011	0	275	108	257	71	84	90
2012	0	231	90	228	53	67	56
2013	1	208	87	191	45	65	45
2014	0	220	74	214	43	53	50
2015	0	219	81	195	39	66	45
2016	0	227	108	207	43	85	52
2017	0	188	102	228	31	74	47
2018	0	233	96	201	38	70	51
2019	2	198	103	206	37	67	42
2020	2	187	107	196	48	72	47
2021	0	191	96	218	62	80	66
2022	334	3	114	209	1	80	71
Año	Datos faltantes	Eventos con lluvia mayor a 10 mm			Eventos con lluvia mayor a 20 mm		
		Observados	CHIRPS	IMERG	Observados	CHIRPS	IMERG
2000	3	33	38	22	3	6	12
2001	0	28	26	27	6	5	6
2002	0	14	39	36	4	5	14
2003	31	23	30	36	5	6	16
2004	0	10	35	32	3	9	9
2005	0	16	37	36	2	8	17
2006	0	23	47	37	5	9	11
2007	0	25	32	34	3	12	13
2008	0	26	40	38	5	7	12
2009	0	13	27	22	5	6	7
2010	0	30	38	52	11	9	23
2011	0	42	52	59	7	18	28
2012	0	25	31	33	3	16	12
2013	1	14	29	21	5	10	5
2014	0	15	26	18	5	8	6
2015	0	13	41	19	0	3	4
2016	0	18	33	27	2	7	7
2017	0	14	34	22	1	4	9
2018	0	16	35	32	4	7	10
2019	2	13	28	21	2	2	8
2020	2	22	34	27	2	5	10
2021	0	25	28	36	9	7	12
2022	334	0	42	38	0	5	15



Tabla B-11. Eventos de lluvia registrados por la estación Umbita y los productos CHIRPS e IMERG

ESTACIÓN: UMBITA [35070050]							
Año	Datos faltantes	Eventos con lluvia mayor a 0 mm			Eventos con lluvia mayor a 5 mm		
		Observados	CHIRPS	IMERG	Observados	CHIRPS	IMERG
2000	0	227	100	167	69	92	55
2001	0	209	95	264	56	75	66
2002	92	169	98	251	58	85	72
2003	0	217	99	248	68	87	76
2004	1	178	115	255	81	88	62
2005	0	182	90	249	62	77	67
2006	0	208	98	248	76	90	67
2007	0	218	76	212	63	62	58
2008	0	208	97	243	68	88	81
2009	0	192	95	226	60	75	49
2010	1	211	122	259	77	94	102
2011	1	246	107	270	86	93	96
2012	0	201	100	249	80	79	67
2013	0	187	95	214	66	82	59
2014	0	182	68	215	68	59	51
2015	1	198	84	210	51	71	46
2016	0	201	94	231	60	83	65
2017	0	210	89	226	58	69	53
2018	0	205	88	211	71	77	53
2019	0	194	102	214	51	77	49
2020	0	195	106	204	57	74	67
2021	0	208	96	223	68	80	82
2022	0	203	110	219	79	91	73
Año	Datos faltantes	Eventos con lluvia mayor a 10 mm			Eventos con lluvia mayor a 20 mm		
		Observados	CHIRPS	IMERG	Observados	CHIRPS	IMERG
2000	0	34	59	26	12	10	14
2001	0	17	37	34	6	14	14
2002	92	25	51	46	6	17	21
2003	0	24	52	45	4	16	21
2004	1	31	43	38	9	15	13
2005	0	26	52	44	5	17	21
2006	0	32	58	40	7	17	19
2007	0	25	42	31	5	19	18
2008	0	35	56	53	3	20	21
2009	0	21	39	29	6	12	11
2010	1	38	55	65	12	20	30
2011	1	44	66	66	14	28	31
2012	0	33	43	42	7	20	16
2013	0	28	42	32	3	11	9
2014	0	26	31	21	7	10	9
2015	1	20	39	20	2	3	7
2016	0	21	44	34	8	10	7
2017	0	23	42	27	7	11	9
2018	0	25	44	32	5	12	12
2019	0	22	30	26	3	5	12
2020	0	27	42	35	9	11	16
2021	0	31	40	41	6	7	15
2022	0	39	53	44	9	9	21



Tabla B-12. Eventos de lluvia registrados por la estación Valle Grande y los productos CHIRPS e IMERG

ESTACIÓN: VALLE GRANDE [35070550]							
Año	Datos faltantes	Eventos con lluvia mayor a 0 mm			Eventos con lluvia mayor a 5 mm		
		Observados	CHIRPS	IMERG	Observados	CHIRPS	IMERG
2000	0	210	108	174	78	99	70
2001	0	211	102	288	62	90	78
2002	0	199	97	271	70	86	87
2003	214	32	100	260	26	88	80
2004	60	149	119	272	78	103	90
2005	32	170	100	281	78	100	98
2006	0	206	98	280	76	95	76
2007	0	146	87	252	70	79	88
2008	35	126	107	273	68	99	106
2009	0	108	92	253	64	87	76
2010	1	112	131	273	81	111	127
2011	1	194	119	284	88	101	115
2012	32	166	95	260	85	89	92
2013	0	159	100	243	67	90	71
2014	0	182	68	228	73	62	70
2015	31	121	81	230	69	78	68
2016	0	205	100	240	92	97	78
2017	1	199	97	239	66	84	68
2018	30	153	95	220	68	85	67
2019	0	167	107	227	78	92	68
2020	1	186	119	225	71	91	78
2021	1	209	111	246	89	104	86
2022	123	126	115	238	61	99	91

Año	Datos faltantes	Eventos con lluvia mayor a 10 mm			Eventos con lluvia mayor a 20 mm		
		Observados	CHIRPS	IMERG	Observados	CHIRPS	IMERG
2000	0	40	75	40	18	29	17
2001	0	32	55	50	7	24	27
2002	0	33	57	58	14	30	30
2003	214	13	53	56	3	34	32
2004	60	41	68	57	18	26	26
2005	32	37	73	66	11	26	36
2006	0	37	68	49	14	32	27
2007	0	30	54	55	7	25	26
2008	35	35	69	69	13	32	29
2009	0	29	54	47	9	23	20
2010	1	34	68	76	8	28	34
2011	1	43	69	75	15	39	34
2012	32	37	64	50	13	37	25
2013	0	30	65	38	9	24	16
2014	0	27	45	30	6	23	13
2015	31	31	52	34	10	21	15
2016	0	45	68	46	17	29	23
2017	1	33	51	44	10	28	26
2018	30	40	63	50	9	30	22
2019	0	38	48	41	12	16	18
2020	1	39	56	43	9	24	20
2021	1	42	56	55	16	24	25
2022	123	30	66	61	7	33	26



Tabla B-13. Eventos de lluvia registrados por la estación Villa Luisa y los productos CHIRPS e IMERG

ESTACIÓN: VILLA LUISA [35075030]							
Año	Datos faltantes	Eventos con lluvia mayor a 0 mm			Eventos con lluvia mayor a 5 mm		
		Observados	CHIRPS	IMERG	Observados	CHIRPS	IMERG
2000	0	231	100	159	53	80	53
2001	0	226	102	274	51	67	55
2002	0	212	102	250	64	76	70
2003	0	224	106	252	67	85	65
2004	0	239	112	242	69	78	71
2005	92	155	98	255	37	81	71
2006	28	243	102	246	74	90	65
2007	0	221	71	217	68	63	52
2008	0	226	93	231	75	83	67
2009	0	216	93	228	53	72	44
2010	0	226	124	266	72	102	89
2011	1	257	105	270	92	88	95
2012	63	180	107	261	51	81	56
2013	32	189	91	224	52	68	40
2014	31	188	80	227	41	63	45
2015	60	184	75	205	38	72	47
2016	1	226	104	226	61	92	55
2017	0	228	94	229	56	74	47
2018	0	239	103	218	64	89	52
2019	0	232	107	216	52	86	42
2020	0	221	110	204	66	77	47
2021	0	230	98	238	64	94	60
2022	0	228	120	225	80	102	74
Año	Datos faltantes	Eventos con lluvia mayor a 10 mm			Eventos con lluvia mayor a 20 mm		
		Observados	CHIRPS	IMERG	Observados	CHIRPS	IMERG
2000	0	30	37	26	6	11	7
2001	0	17	30	24	2	9	9
2002	0	26	36	39	8	11	17
2003	0	30	43	39	3	9	16
2004	0	27	43	37	5	8	17
2005	92	17	37	39	4	10	15
2006	28	34	43	31	6	14	15
2007	0	28	38	31	10	13	9
2008	0	40	45	44	5	10	13
2009	0	17	35	24	3	7	10
2010	0	37	48	58	12	11	24
2011	1	55	53	58	14	21	27
2012	63	19	36	33	5	10	15
2013	32	24	41	22	5	9	7
2014	31	17	31	20	4	10	7
2015	60	7	51	20	1	14	4
2016	1	26	57	35	3	14	9
2017	0	21	44	21	6	9	5
2018	0	29	47	32	9	11	11
2019	0	20	33	23	6	5	10
2020	0	28	46	27	4	10	8
2021	0	25	48	35	8	8	12
2022	0	41	56	46	10	13	16

Anexo C. Esquema de producción – Simulaciones con el modelo CEQUEAU

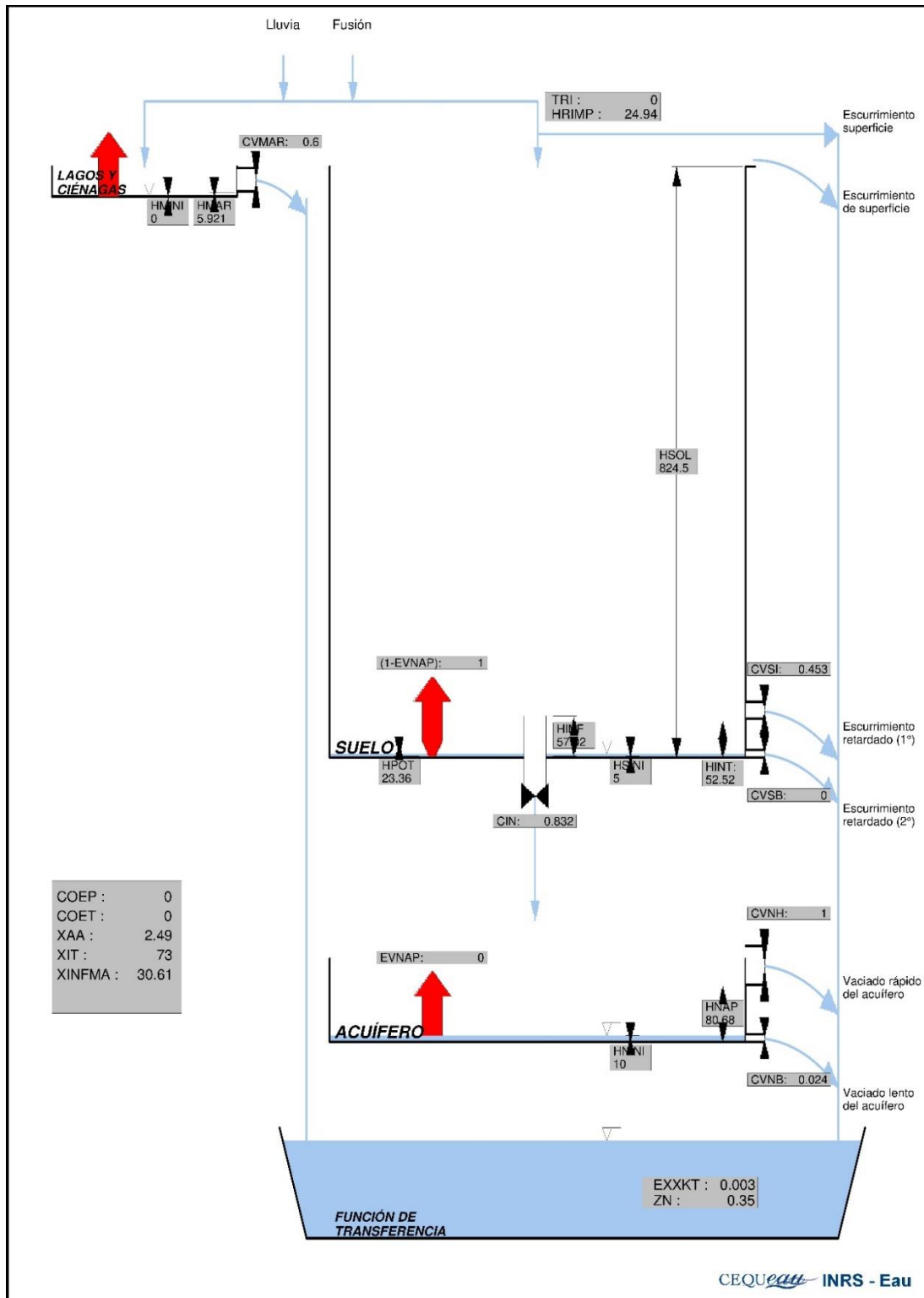


Figura C-1. Esquema de producción – Parámetros calibrados para simulaciones con el modelo CEQUEAU

Anexo D. Balance hídrico de las simulaciones con el modelo SWAT

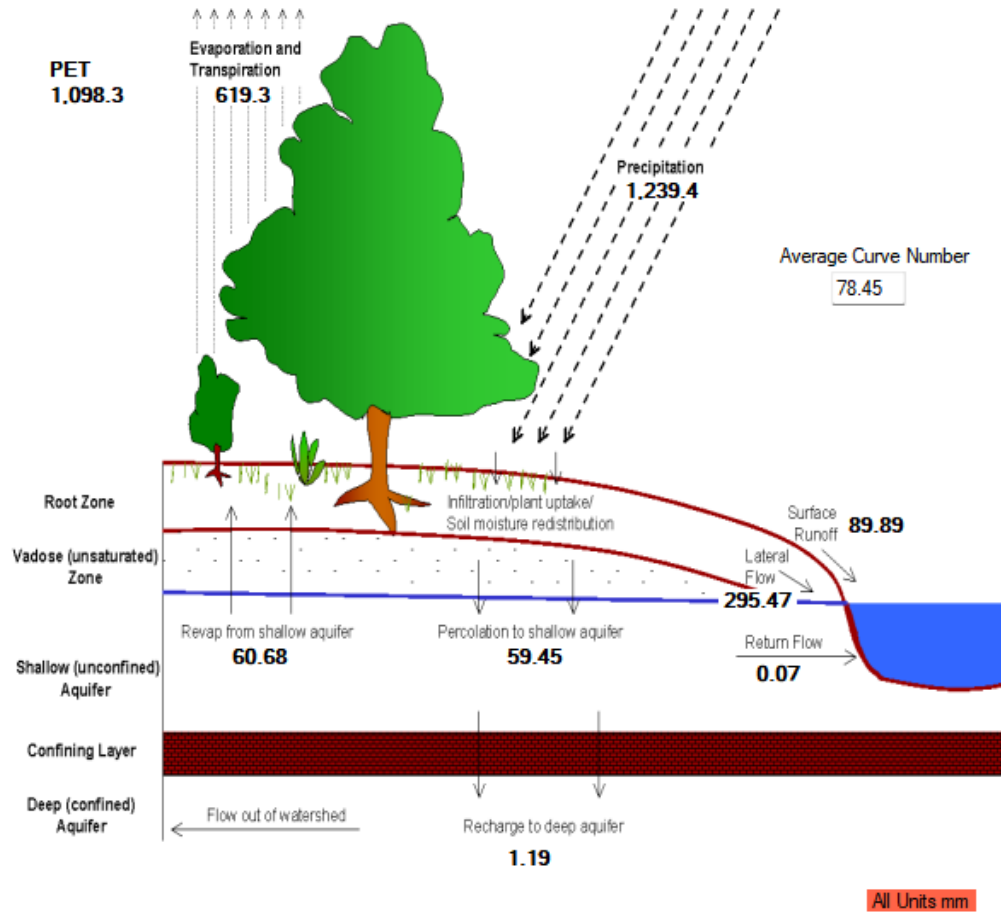


Figura D-1. Balance Hídrico – simulación con datos de precipitación observada y mapa de UCS del año 2000

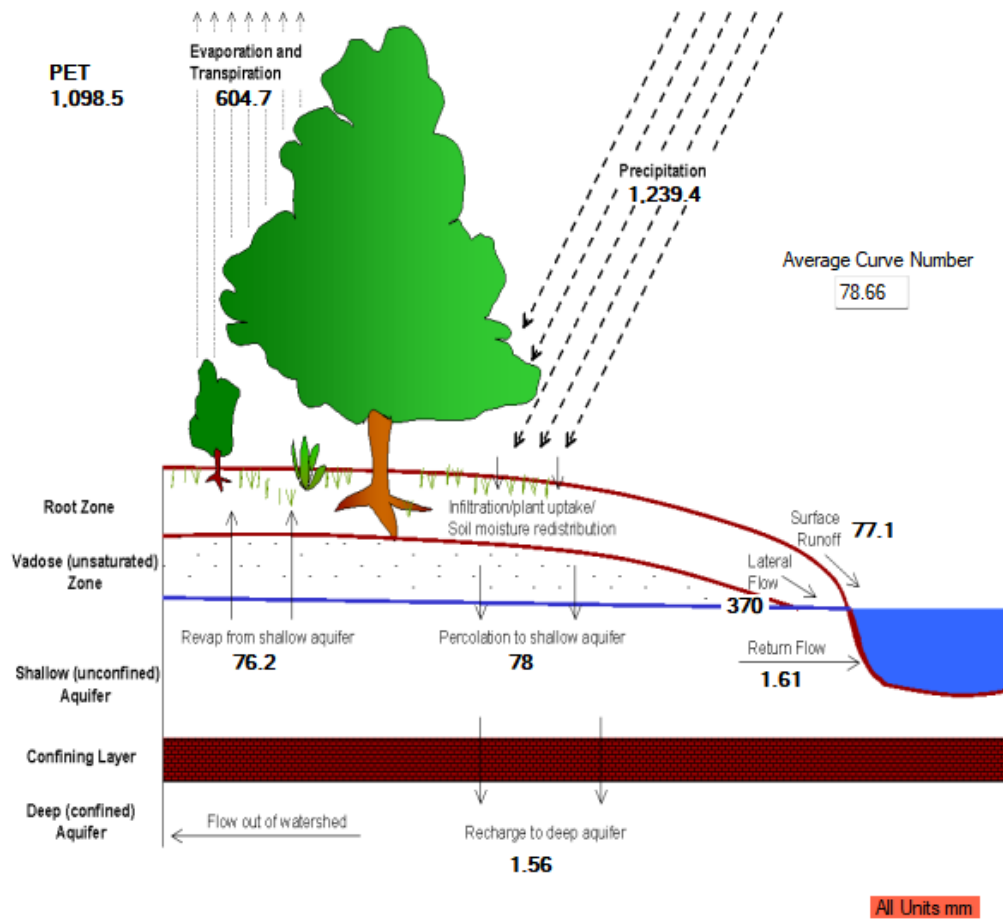


Figura D-2. Balance Hídrico – simulación con datos de precipitación observada y mapa de UCS del año 2018

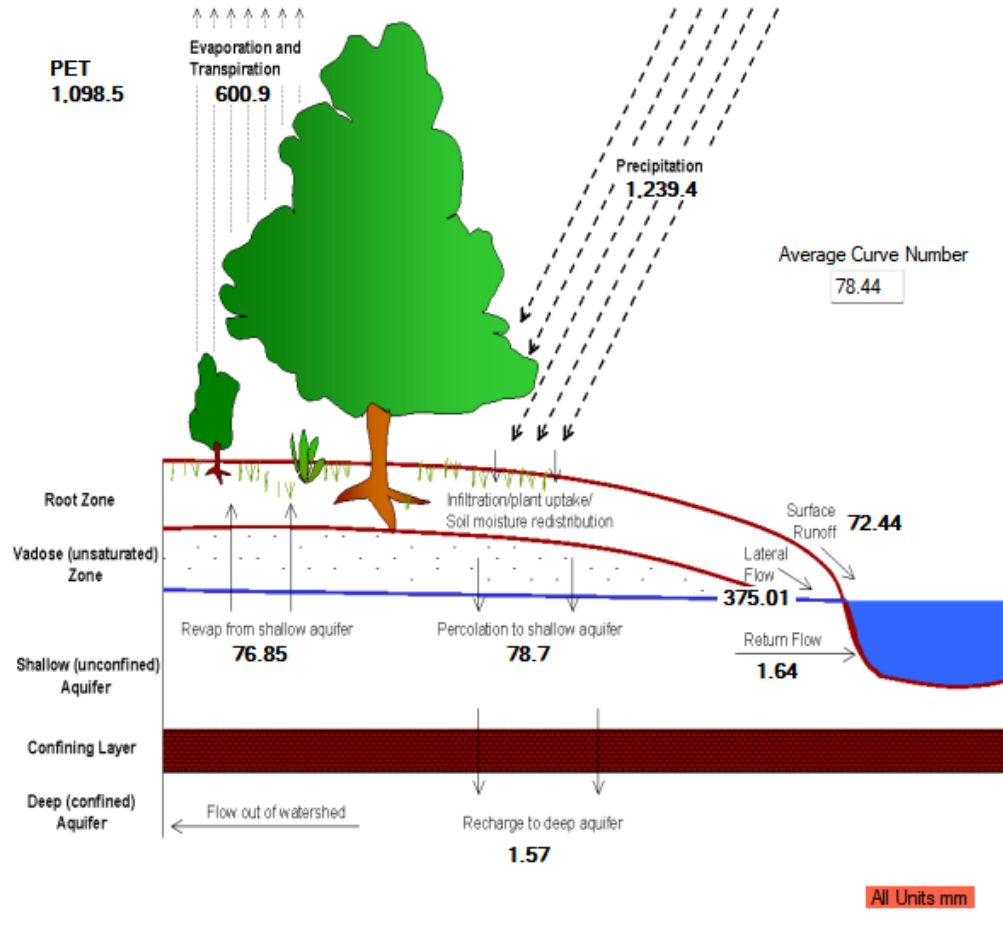


Figura D-3. Balance Hídrico – simulación con datos de precipitación observada y mapa de UCS del año 2050

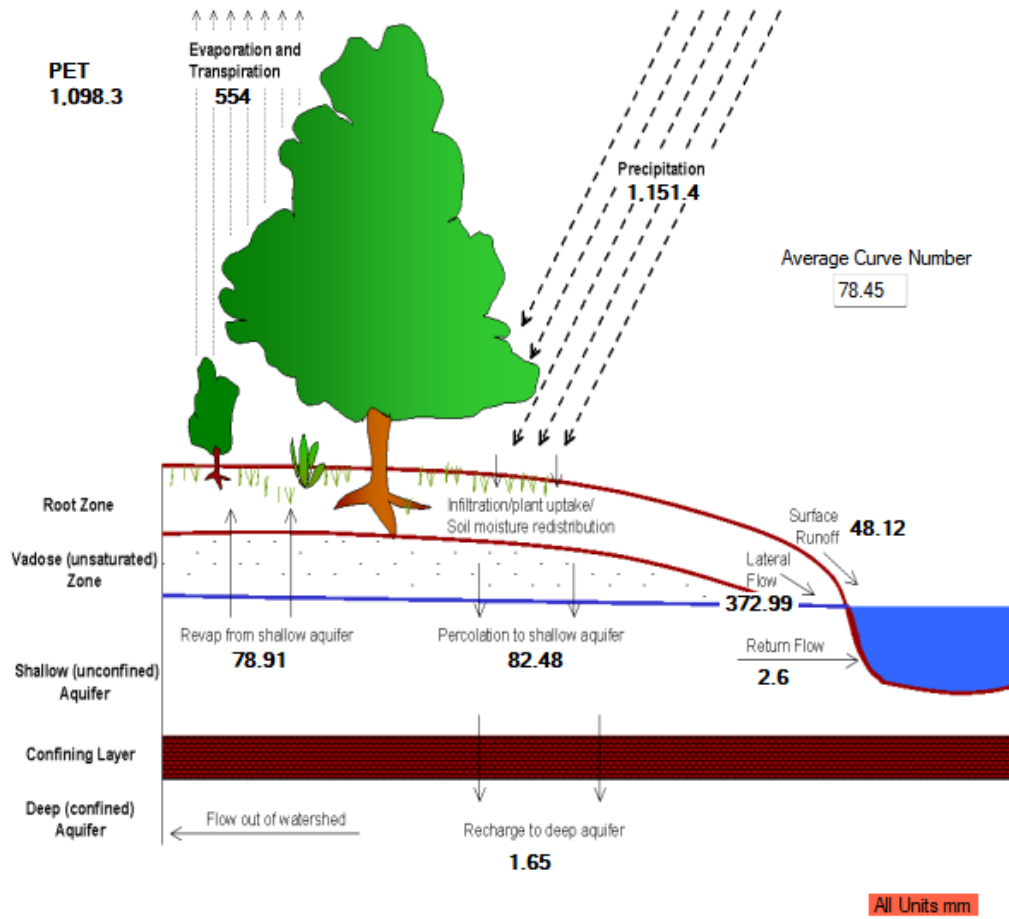


Figura D-4. Balance Hídrico – Simulación con datos de precipitación CHIRPS y mapa de UCS del año 2000

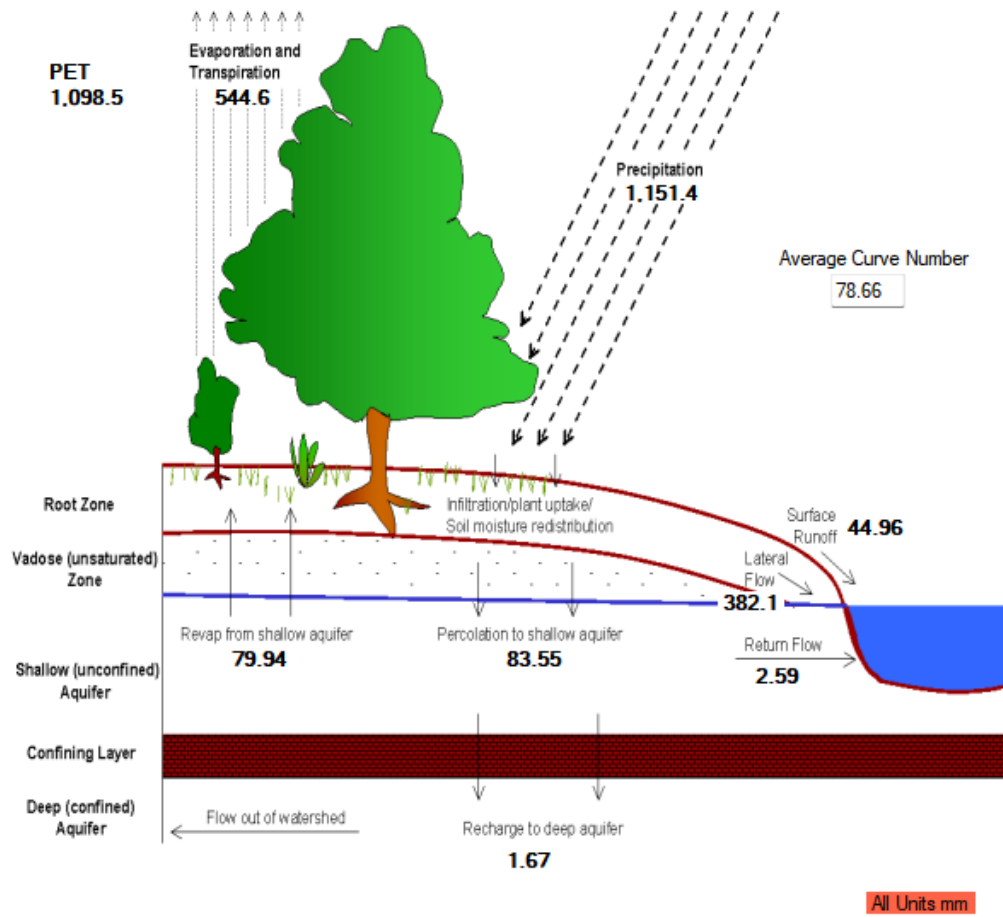


Figura D-5. Balance Hídrico – Simulación con datos de precipitación CHIRPS y mapa de UCS del año 2018

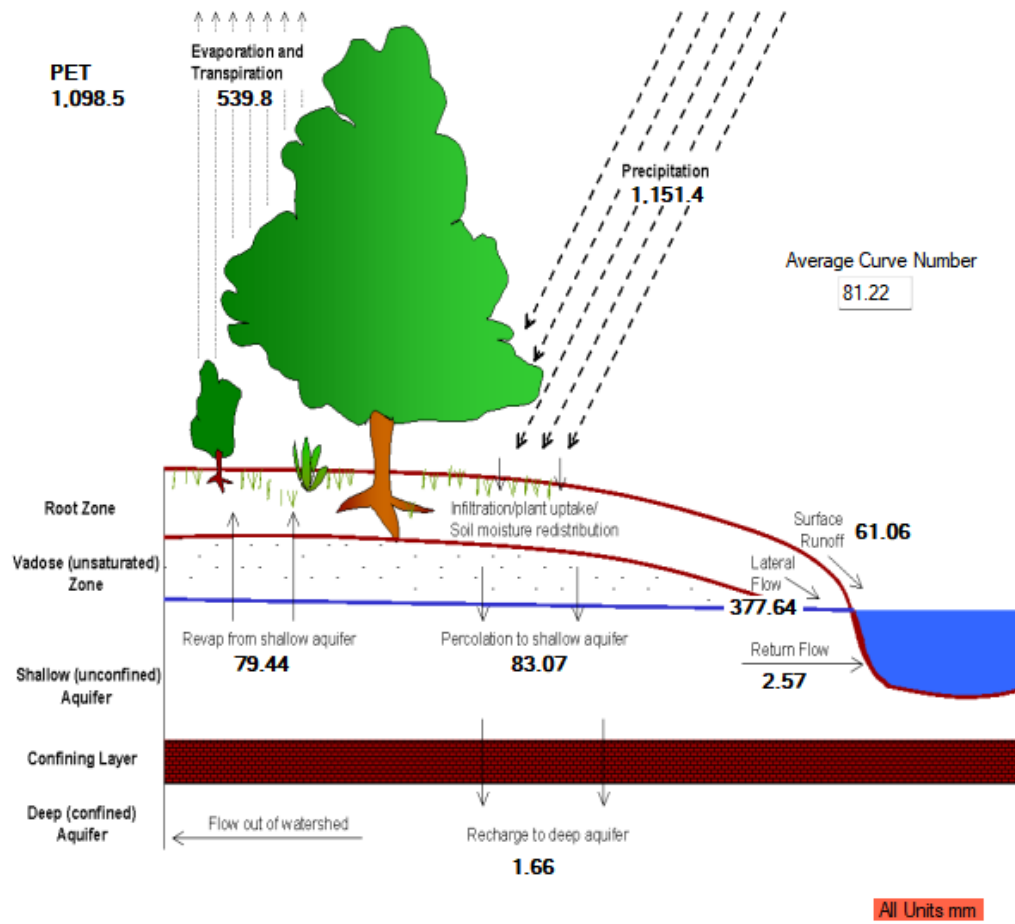


Figura D-6. Balance Hídrico – Simulación con datos de precipitación CHIRPS y mapa de UCS del año 2050



Anexo E. Evaluación mensual por año de los periodos de calibración y validación de los modelos CEQUEAU y SWAT según los criterios de evaluación recomendados por Moriasi et al. (2015)

Tabla E-1. Evaluación mensual por año de las simulaciones realizadas a partir de los datos de precipitación observada – Mapa UCS del año 2000

PRECIPITACIÓN OBSERVADA - USO/COBERTURA DEL SUELO - AÑO 2000												
Año	MODELO CEQUEAU						MODELO SWAT					
	NSE		R ²		PBIAS		NSE		R ²		PBIAS	
1983	0.85	Muy bueno	0.93	Muy bueno	-9.17	Bueno	0.83	Muy bueno	0.86	Muy bueno	-5.20	Bueno
1984	0.52	Satisfactorio	0.98	Muy bueno	-32.11	Insatisfactorio	0.84	Muy bueno	0.97	Muy bueno	-19.24	Insatisfactorio
1985	0.94	Muy bueno	0.95	Muy bueno	4.13	Bueno	0.78	Bueno	0.96	Muy bueno	23.97	Insatisfactorio
1986	0.85	Muy bueno	0.93	Muy bueno	11.28	Satisfactorio	0.73	Bueno	0.89	Muy bueno	20.49	Insatisfactorio
1987	0.89	Muy bueno	0.97	Muy bueno	17.59	Insatisfactorio	0.74	Bueno	0.95	Muy bueno	22.17	Insatisfactorio
1988	0.90	Muy bueno	0.90	Muy bueno	2.95	Bueno	0.77	Bueno	0.79	Bueno	21.51	Insatisfactorio
1989	0.73	Bueno	0.95	Muy bueno	22.39	Insatisfactorio	0.64	Satisfactorio	0.88	Muy bueno	21.30	Insatisfactorio
1990	0.82	Muy bueno	0.95	Muy bueno	22.89	Insatisfactorio	0.75	Bueno	0.86	Muy bueno	18.40	Insatisfactorio
1991	0.97	Muy bueno	0.98	Muy bueno	10.76	Satisfactorio	0.92	Muy bueno	0.98	Muy bueno	13.48	Satisfactorio
1992	0.91	Muy bueno	0.95	Muy bueno	16.79	Insatisfactorio	0.89	Muy bueno	0.97	Muy bueno	13.06	Satisfactorio
1993	0.84	Muy bueno	0.89	Muy bueno	13.52	Satisfactorio	0.83	Muy bueno	0.95	Muy bueno	19.09	Insatisfactorio
1994	0.87	Muy bueno	0.91	Muy bueno	12.53	Satisfactorio	0.86	Muy bueno	0.93	Muy bueno	12.54	Satisfactorio
1995	0.95	Muy bueno	0.96	Muy bueno	-0.78	Bueno	0.88	Muy bueno	0.91	Muy bueno	-9.06	Bueno
1996	0.98	Muy bueno	0.99	Muy bueno	2.75	Bueno	0.90	Muy bueno	0.90	Muy bueno	9.76	Bueno
1997	0.82	Muy bueno	0.96	Muy bueno	30.29	Insatisfactorio	0.79	Bueno	0.96	Muy bueno	24.62	Insatisfactorio
1998	0.96	Muy bueno	0.96	Muy bueno	4.49	Bueno	0.92	Muy bueno	0.93	Muy bueno	5.07	Bueno
1999	0.79	Bueno	0.87	Muy bueno	-10.01	Satisfactorio	0.86	Muy bueno	0.87	Muy bueno	2.84	Muy bueno
2000	0.86	Muy bueno	0.98	Muy bueno	-17.23	Insatisfactorio	0.92	Muy bueno	0.97	Muy bueno	-15.00	Satisfactorio
2001	0.87	Muy bueno	0.88	Muy bueno	1.14	Bueno	0.87	Muy bueno	0.88	Muy bueno	0.60	Muy bueno
2002*												
2003	0.75	Bueno	0.86	Muy bueno	-29.40	Insatisfactorio	0.70	Bueno	0.85	Bueno	-32.84	Insatisfactorio
2004	0.83	Muy bueno	0.85	Bueno	1.50	Bueno	0.84	Muy bueno	0.89	Muy bueno	3.18	Muy bueno
2005*												
2006*												
2007	0.86	Muy bueno	0.87	Muy bueno	-0.63	Bueno	0.85	Muy bueno	0.88	Muy bueno	-1.84	Muy bueno
2008	0.93	Muy bueno	0.95	Muy bueno	7.55	Bueno	0.87	Muy bueno	0.91	Muy bueno	4.52	Muy bueno
2009	0.64	Satisfactorio	0.97	Muy bueno	28.81	Insatisfactorio	0.50	Satisfactorio	0.90	Muy bueno	27.73	Insatisfactorio
2010	0.79	Bueno	0.96	Muy bueno	-25.34	Insatisfactorio	0.86	Muy bueno	0.95	Muy bueno	-20.00	Insatisfactorio
2011	0.08	Insatisfactorio	0.92	Muy bueno	-37.38	Insatisfactorio	0.24	Insatisfactorio	0.88	Muy bueno	-31.94	Insatisfactorio
2012*												
2013	0.44	Insatisfactorio	0.86	Muy bueno	-18.73	Insatisfactorio	0.62	Satisfactorio	0.84	Bueno	-17.88	Insatisfactorio
2014	0.55	Satisfactorio	0.92	Muy bueno	-35.28	Insatisfactorio	0.59	Satisfactorio	0.94	Muy bueno	-39.93	Insatisfactorio
2015*												
2016*												
2017	0.84	Muy bueno	0.93	Muy bueno	19.97	Insatisfactorio	0.83	Muy bueno	0.91	Muy bueno	12.79	Satisfactorio
2018	0.93	Muy bueno	0.94	Muy bueno	-5.31	Bueno	0.94	Muy bueno	0.96	Muy bueno	1.32	Muy bueno
2019	0.93	Muy bueno	0.96	Muy bueno	12.93	Satisfactorio	0.85	Muy bueno	0.94	Muy bueno	18.75	Insatisfactorio
2020	0.90	Muy bueno	0.93	Muy bueno	12.63	Satisfactorio	0.91	Muy bueno	0.94	Muy bueno	5.57	Bueno
2021	0.87	Muy bueno	0.91	Muy bueno	3.95	Bueno	0.84	Muy bueno	0.88	Muy bueno	-5.70	Bueno
2022	0.76	Bueno	0.79	Bueno	8.88	Bueno	0.46	Satisfactorio	0.59	Insatisfactorio	25.95	Insatisfactorio

*Ausencia de datos de caudal observados



Tabla E-2. Evaluación mensual por año de las simulaciones realizadas a partir de los datos de precipitación observada – Mapa UCS del año 2018

PRECIPITACIÓN OBSERVADA - USO/COBERTURA DEL SUELO - AÑO 2018												
Año	MODELO CEQUEAU						MODELO SWAT					
	NSE		R ²		PBIAS		NSE		R ²		PBIAS	
1983	0.83	Muy bueno	0.93	Muy bueno	-10.68	Satisfactorio	0.84	Muy bueno	0.87	Muy bueno	-5.38	Bueno
1984	0.51	Satisfactorio	0.98	Muy bueno	-33.47	Insatisfactorio	0.82	Muy bueno	0.97	Muy bueno	-20.25	Insatisfactorio
1985	0.94	Muy bueno	0.95	Muy bueno	3.08	Bueno	0.81	Muy bueno	0.97	Muy bueno	23.51	Insatisfactorio
1986	0.85	Muy bueno	0.93	Muy bueno	10.44	Satisfactorio	0.73	Bueno	0.90	Muy bueno	21.01	Insatisfactorio
1987	0.89	Muy bueno	0.97	Muy bueno	16.52	Insatisfactorio	0.76	Bueno	0.95	Muy bueno	22.56	Insatisfactorio
1988	0.90	Muy bueno	0.90	Muy bueno	1.07	Muy bueno	0.76	Bueno	0.77	Bueno	7.89	Satisfactorio
1989	0.75	Bueno	0.95	Muy bueno	21.18	Insatisfactorio	0.68	Satisfactorio	0.90	Muy bueno	21.54	Insatisfactorio
1990	0.84	Muy bueno	0.95	Muy bueno	21.79	Insatisfactorio	0.78	Bueno	0.89	Muy bueno	18.00	Insatisfactorio
1991	0.97	Muy bueno	0.98	Muy bueno	9.73	Bueno	0.92	Muy bueno	0.98	Muy bueno	14.65	Satisfactorio
1992	0.91	Muy bueno	0.95	Muy bueno	15.59	Insatisfactorio	0.90	Muy bueno	0.96	Muy bueno	12.16	Satisfactorio
1993	0.85	Muy bueno	0.88	Muy bueno	12.38	Satisfactorio	0.84	Muy bueno	0.95	Muy bueno	19.02	Insatisfactorio
1994	0.88	Muy bueno	0.91	Muy bueno	11.74	Satisfactorio	0.86	Muy bueno	0.93	Muy bueno	13.04	Satisfactorio
1995	0.95	Muy bueno	0.96	Muy bueno	-2.25	Muy bueno	0.84	Muy bueno	0.88	Muy bueno	-7.40	Bueno
1996	0.98	Muy bueno	0.99	Muy bueno	1.52	Muy bueno	0.88	Muy bueno	0.90	Muy bueno	9.80	Bueno
1997	0.83	Muy bueno	0.96	Muy bueno	29.40	Insatisfactorio	0.80	Bueno	0.95	Muy bueno	24.53	Insatisfactorio
1998	0.96	Muy bueno	0.96	Muy bueno	3.51	Muy bueno	0.92	Muy bueno	0.92	Muy bueno	5.06	Bueno
1999	0.77	Bueno	0.88	Muy bueno	-11.51	Satisfactorio	0.89	Muy bueno	0.90	Muy bueno	2.91	Muy bueno
2000	0.85	Muy bueno	0.98	Muy bueno	-18.49	Insatisfactorio	0.90	Muy bueno	0.96	Muy bueno	-14.32	Satisfactorio
2001	0.87	Muy bueno	0.87	Muy bueno	-0.12	Muy bueno	0.86	Muy bueno	0.87	Muy bueno	0.83	Muy bueno
2002*												
2003	0.74	Bueno	0.86	Muy bueno	-30.68	Insatisfactorio	0.70	Bueno	0.85	Bueno	-33.10	Insatisfactorio
2004	0.83	Muy bueno	0.85	Bueno	0.79	Muy bueno	0.84	Muy bueno	0.88	Muy bueno	4.33	Muy bueno
2005*												
2006*												
2007	0.86	Muy bueno	0.87	Muy bueno	-1.69	Muy bueno	0.85	Muy bueno	0.87	Muy bueno	-1.12	Muy bueno
2008	0.94	Muy bueno	0.95	Muy bueno	6.67	Bueno	0.87	Muy bueno	0.90	Muy bueno	4.94	Muy bueno
2009	0.65	Satisfactorio	0.97	Muy bueno	27.59	Insatisfactorio	0.50	Satisfactorio	0.88	Muy bueno	28.51	Insatisfactorio
2010	0.77	Bueno	0.96	Muy bueno	-26.72	Insatisfactorio	0.85	Muy bueno	0.95	Muy bueno	-20.15	Insatisfactorio
2011	0.04	Insatisfactorio	0.92	Muy bueno	-38.47	Insatisfactorio	0.25	Insatisfactorio	0.87	Muy bueno	-30.69	Insatisfactorio
2012*												
2013	0.40	Insatisfactorio	0.86	Muy bueno	-20.29	Insatisfactorio	0.56	Satisfactorio	0.82	Bueno	-18.58	Insatisfactorio
2014	0.52	Satisfactorio	0.93	Muy bueno	-37.07	Insatisfactorio	0.59	Satisfactorio	0.93	Muy bueno	-38.92	Insatisfactorio
2015*												
2016*												
2017	0.84	Muy bueno	0.93	Muy bueno	18.87	Insatisfactorio	0.83	Muy bueno	0.89	Muy bueno	13.65	Satisfactorio
2018	0.93	Muy bueno	0.94	Muy bueno	-6.26	Bueno	0.93	Muy bueno	0.94	Muy bueno	1.82	Muy bueno
2019	0.94	Muy bueno	0.96	Muy bueno	11.80	Satisfactorio	0.87	Muy bueno	0.95	Muy bueno	18.58	Insatisfactorio
2020	0.91	Muy bueno	0.93	Muy bueno	11.21	Satisfactorio	0.91	Muy bueno	0.94	Muy bueno	4.22	Muy bueno
2021	0.87	Muy bueno	0.91	Muy bueno	2.92	Muy bueno	0.84	Muy bueno	0.87	Muy bueno	-4.71	Muy bueno
2022	0.76	Bueno	0.79	Bueno	7.84	Bueno	0.45	Satisfactorio	0.57	Insatisfactorio	26.48	Insatisfactorio

*Ausencia de datos de caudal observados



Tabla E-3. Evaluación mensual por año de las simulaciones realizadas a partir de los datos de precipitación observada – Mapa UCS del año 2050

PRECIPITACIÓN OBSERVADA - USO/COBERTURA DEL SUELO - AÑO 2050												
Año	MODELO CEQUEAU					MODELO SWAT						
	NSE		R ²	PBIAS		NSE		R ²	PBIAS			
1983	0.83	Muy bueno	0.93	Muy bueno	-11.42	Satisfactorio	0.84	Muy bueno	0.87	Muy bueno	-6.13	Bueno
1984	0.49	Satisfactorio	0.98	Muy bueno	-34.16	Insatisfactorio	0.82	Muy bueno	0.97	Muy bueno	-20.83	Insatisfactorio
1985	0.94	Muy bueno	0.95	Muy bueno	2.54	Muy bueno	0.82	Muy bueno	0.97	Muy bueno	23.13	Insatisfactorio
1986	0.85	Muy bueno	0.93	Muy bueno	10.01	Satisfactorio	0.74	Bueno	0.90	Muy bueno	20.67	Insatisfactorio
1987	0.90	Muy bueno	0.97	Muy bueno	15.98	Insatisfactorio	0.76	Bueno	0.95	Muy bueno	21.96	Insatisfactorio
1988	0.90	Muy bueno	0.90	Muy bueno	0.39	Muy bueno	0.76	Bueno	0.76	Bueno	7.26	Bueno
1989	0.75	Bueno	0.95	Muy bueno	20.53	Insatisfactorio	0.68	Satisfactorio	0.90	Muy bueno	20.94	Insatisfactorio
1990	0.84	Muy bueno	0.95	Muy bueno	21.23	Insatisfactorio	0.79	Bueno	0.88	Muy bueno	17.49	Insatisfactorio
1991	0.97	Muy bueno	0.98	Muy bueno	9.24	Bueno	0.93	Muy bueno	0.98	Muy bueno	14.20	Satisfactorio
1992	0.91	Muy bueno	0.95	Muy bueno	14.95	Satisfactorio	0.90	Muy bueno	0.96	Muy bueno	11.49	Satisfactorio
1993	0.85	Muy bueno	0.88	Muy bueno	11.80	Satisfactorio	0.85	Muy bueno	0.95	Muy bueno	18.48	Insatisfactorio
1994	0.88	Muy bueno	0.91	Muy bueno	11.32	Satisfactorio	0.86	Muy bueno	0.92	Muy bueno	12.62	Satisfactorio
1995	0.95	Muy bueno	0.96	Muy bueno	-3.04	Muy bueno	0.84	Muy bueno	0.88	Muy bueno	-8.16	Bueno
1996	0.98	Muy bueno	0.98	Muy bueno	0.86	Muy bueno	0.89	Muy bueno	0.90	Muy bueno	9.24	Bueno
1997	0.83	Muy bueno	0.96	Muy bueno	28.87	Insatisfactorio	0.80	Bueno	0.95	Muy bueno	24.07	Insatisfactorio
1998	0.96	Muy bueno	0.96	Muy bueno	3.01	Muy bueno	0.92	Muy bueno	0.92	Muy bueno	4.61	Muy bueno
1999	0.76	Bueno	0.88	Muy bueno	-12.35	Satisfactorio	0.89	Muy bueno	0.90	Muy bueno	2.16	Muy bueno
2000	0.84	Muy bueno	0.98	Muy bueno	-19.13	Insatisfactorio	0.90	Muy bueno	0.96	Muy bueno	-14.87	Satisfactorio
2001	0.86	Muy bueno	0.87	Muy bueno	-0.77	Muy bueno	0.86	Muy bueno	0.87	Muy bueno	0.23	Muy bueno
2002*												
2003	0.73	Bueno	0.86	Muy bueno	-31.33	Insatisfactorio	0.70	Bueno	0.85	Bueno	-33.66	Insatisfactorio
2004	0.83	Muy bueno	0.85	Bueno	0.43	Muy bueno	0.84	Muy bueno	0.88	Muy bueno	4.13	Muy bueno
2005*												
2006*												
2007	0.86	Muy bueno	0.87	Muy bueno	-2.23	Muy bueno	0.85	Muy bueno	0.86	Muy bueno	-1.70	Muy bueno
2008	0.94	Muy bueno	0.95	Muy bueno	6.20	Bueno	0.87	Muy bueno	0.90	Muy bueno	4.51	Muy bueno
2009	0.66	Satisfactorio	0.97	Muy bueno	26.94	Insatisfactorio	0.50	Satisfactorio	0.88	Muy bueno	27.92	Insatisfactorio
2010	0.76	Bueno	0.96	Muy bueno	-27.42	Insatisfactorio	0.85	Muy bueno	0.95	Muy bueno	-20.78	Insatisfactorio
2011	0.02	Insatisfactorio	0.92	Muy bueno	-39.02	Insatisfactorio	0.24	Insatisfactorio	0.87	Muy bueno	-31.23	Insatisfactorio
2012*												
2013	0.38	Insatisfactorio	0.86	Muy bueno	-21.09	Insatisfactorio	0.54	Satisfactorio	0.82	Bueno	-19.46	Insatisfactorio
2014	0.51	Satisfactorio	0.93	Muy bueno	-37.99	Insatisfactorio	0.58	Satisfactorio	0.92	Muy bueno	-39.86	Insatisfactorio
2015*												
2016*												
2017	0.85	Muy bueno	0.93	Muy bueno	18.26	Insatisfactorio	0.83	Muy bueno	0.89	Muy bueno	13.12	Satisfactorio
2018	0.93	Muy bueno	0.94	Muy bueno	-6.78	Bueno	0.93	Muy bueno	0.95	Muy bueno	1.40	Muy bueno
2019	0.94	Muy bueno	0.96	Muy bueno	11.15	Satisfactorio	0.87	Muy bueno	0.95	Muy bueno	18.00	Insatisfactorio
2020	0.91	Muy bueno	0.93	Muy bueno	10.47	Satisfactorio	0.91	Muy bueno	0.94	Muy bueno	3.48	Muy bueno
2021	0.87	Muy bueno	0.91	Muy bueno	2.40	Muy bueno	0.84	Muy bueno	0.87	Muy bueno	-5.21	Bueno
2022	0.76	Bueno	0.79	Bueno	7.30	Bueno	0.46	Satisfactorio	0.58	Insatisfactorio	25.94	Insatisfactorio

*Ausencia de datos de caudal observados



Tabla E-4. Evaluación mensual por año de las simulaciones realizadas a partir de los datos de precipitación CHIRPS – Mapa UCS del año 2000

PRECIPITACIÓN CHIRPS - USO/COBERTURA DEL SUELO - AÑO 2000												
Año	MODELO CEQUEAU						MODELO SWAT					
	NSE		R ²		PBIAS		NSE		R ²		PBIAS	
1983	0.89	Muy bueno	0.89	Muy bueno	1.70	Muy bueno	0.87	Muy bueno	0.89	Muy bueno	6.50	Bueno
1984	0.35	Insatisfactorio	0.91	Muy bueno	-46.63	Insatisfactorio	0.75	Bueno	0.91	Muy bueno	-25.86	Insatisfactorio
1985	0.83	Muy bueno	0.86	Muy bueno	7.82	Bueno	0.79	Bueno	0.88	Muy bueno	16.36	Insatisfactorio
1986	0.69	Satisfactorio	0.86	Muy bueno	20.14	Insatisfactorio	0.70	Bueno	0.93	Muy bueno	24.07	Insatisfactorio
1987	0.89	Muy bueno	0.95	Muy bueno	13.78	Satisfactorio	0.80	Bueno	0.96	Muy bueno	19.50	Insatisfactorio
1988	0.85	Muy bueno	0.87	Muy bueno	5.64	Bueno	0.89	Muy bueno	0.94	Muy bueno	5.88	Bueno
1989	0.68	Satisfactorio	0.78	Bueno	18.02	Insatisfactorio	0.71	Bueno	0.87	Muy bueno	17.73	Insatisfactorio
1990	0.83	Muy bueno	0.87	Muy bueno	13.14	Satisfactorio	0.85	Muy bueno	0.93	Muy bueno	14.38	Satisfactorio
1991	0.82	Muy bueno	0.93	Muy bueno	21.64	Insatisfactorio	0.78	Bueno	0.93	Muy bueno	23.42	Insatisfactorio
1992	0.70	Satisfactorio	0.70	Satisfactorio	1.55	Muy bueno	0.75	Bueno	0.83	Bueno	13.87	Satisfactorio
1993	0.84	Muy bueno	0.85	Bueno	7.45	Bueno	0.73	Bueno	0.88	Muy bueno	21.81	Insatisfactorio
1994	0.71	Bueno	0.77	Bueno	16.48	Insatisfactorio	0.67	Satisfactorio	0.77	Bueno	22.23	Insatisfactorio
1995	0.91	Muy bueno	0.92	Muy bueno	1.40	Muy bueno	0.90	Muy bueno	0.91	Muy bueno	5.68	Bueno
1996	0.95	Muy bueno	0.95	Muy bueno	1.15	Muy bueno	0.97	Muy bueno	0.99	Muy bueno	4.28	Muy bueno
1997	0.47	Insatisfactorio	0.66	Satisfactorio	29.79	Insatisfactorio	0.44	Insatisfactorio	0.70	Satisfactorio	30.15	Insatisfactorio
1998	0.85	Muy bueno	0.91	Muy bueno	15.13	Insatisfactorio	0.81	Muy bueno	0.91	Muy bueno	18.67	Insatisfactorio
1999	0.43	Insatisfactorio	0.77	Bueno	-18.92	Insatisfactorio	0.76	Bueno	0.82	Bueno	0.82	Muy bueno
2000	0.88	Muy bueno	0.95	Muy bueno	-14.43	Satisfactorio	0.95	Muy bueno	0.96	Muy bueno	-5.74	Bueno
2001	0.64	Satisfactorio	0.65	Satisfactorio	9.76	Bueno	0.61	Satisfactorio	0.68	Satisfactorio	15.17	Insatisfactorio
2002*												
2003	0.67	Satisfactorio	0.70	Satisfactorio	-14.51	Satisfactorio	0.81	Muy bueno	0.86	Muy bueno	-3.70	Muy bueno
2004	0.73	Bueno	0.78	Bueno	8.78	Bueno	0.72	Bueno	0.85	Bueno	18.21	Insatisfactorio
2005*												
2006*												
2007	0.52	Satisfactorio	0.57	Insatisfactorio	15.82	Insatisfactorio	0.59	Satisfactorio	0.69	Satisfactorio	18.56	Insatisfactorio
2008	0.85	Muy bueno	0.90	Muy bueno	11.91	Satisfactorio	0.78	Bueno	0.91	Muy bueno	18.29	Insatisfactorio
2009	0.60	Satisfactorio	0.83	Bueno	21.83	Insatisfactorio	0.52	Satisfactorio	0.80	Bueno	22.93	Insatisfactorio
2010	0.66	Satisfactorio	0.94	Muy bueno	-30.58	Insatisfactorio	0.88	Muy bueno	0.96	Muy bueno	-16.91	Insatisfactorio
2011	0.28	Insatisfactorio	0.83	Bueno	-26.94	Insatisfactorio	0.62	Satisfactorio	0.87	Muy bueno	-18.85	Insatisfactorio
2012*												
2013	0.63	Satisfactorio	0.91	Muy bueno	-14.24	Satisfactorio	0.77	Bueno	0.88	Muy bueno	-12.24	Satisfactorio
2014	0.75	Bueno	0.77	Bueno	-4.50	Muy bueno	0.82	Muy bueno	0.85	Bueno	-10.60	Satisfactorio
2015*												
2016*												
2017	0.64	Satisfactorio	0.81	Bueno	23.70	Insatisfactorio	0.56	Satisfactorio	0.76	Bueno	24.38	Insatisfactorio
2018	0.80	Bueno	0.93	Muy bueno	19.16	Insatisfactorio	0.74	Bueno	0.96	Muy bueno	24.56	Insatisfactorio
2019	0.76	Bueno	0.89	Muy bueno	20.78	Insatisfactorio	0.70	Bueno	0.95	Muy bueno	29.39	Insatisfactorio
2020	0.88	Muy bueno	0.89	Muy bueno	6.25	Bueno	0.87	Muy bueno	0.90	Muy bueno	9.07	Satisfactorio
2021	0.57	Satisfactorio	0.72	Satisfactorio	23.04	Insatisfactorio	0.50	Satisfactorio	0.71	Satisfactorio	24.07	Insatisfactorio
2022	0.75	Bueno	0.78	Bueno	5.57	Bueno	0.70	Bueno	0.81	Bueno	13.49	Satisfactorio

*Ausencia de datos de caudal observados



Tabla E-5. Evaluación mensual por año de las simulaciones realizadas a partir de los datos de precipitación CHIRPS – Mapa UCS del año 2018

PRECIPITACIÓN CHIRPS - USO/COBERTURA DEL SUELO - AÑO 2018												
Año	MODELO CEQUEAU						MODELO SWAT					
	NSE		R ²		PBIAS		NSE		R ²		PBIAS	
1983	0.89	Muy bueno	0.89	Muy bueno	0.27	Muy bueno	0.88	Muy bueno	0.89	Muy bueno	4.79	Muy bueno
1984	0.32	Insatisfactorio	0.91	Muy bueno	-48.07	Insatisfactorio	0.74	Bueno	0.91	Muy bueno	-27.42	Insatisfactorio
1985	0.83	Muy bueno	0.85	Bueno	6.76	Bueno	0.80	Bueno	0.88	Muy bueno	14.77	Satisfactorio
1986	0.70	Satisfactorio	0.86	Muy bueno	19.33	Insatisfactorio	0.71	Bueno	0.93	Muy bueno	22.94	Insatisfactorio
1987	0.89	Muy bueno	0.95	Muy bueno	12.68	Satisfactorio	0.81	Muy bueno	0.96	Muy bueno	18.17	Insatisfactorio
1988	0.86	Muy bueno	0.87	Muy bueno	4.41	Bueno	0.89	Muy bueno	0.94	Muy bueno	3.99	Muy bueno
1989	0.69	Satisfactorio	0.78	Bueno	16.82	Insatisfactorio	0.72	Bueno	0.87	Muy bueno	15.98	Insatisfactorio
1990	0.83	Muy bueno	0.87	Muy bueno	11.98	Satisfactorio	0.86	Muy bueno	0.93	Muy bueno	12.88	Satisfactorio
1991	0.83	Muy bueno	0.93	Muy bueno	20.71	Insatisfactorio	0.79	Bueno	0.93	Muy bueno	22.08	Insatisfactorio
1992	0.70	Satisfactorio	0.70	Satisfactorio	0.19	Muy bueno	0.75	Bueno	0.83	Bueno	12.01	Satisfactorio
1993	0.84	Muy bueno	0.85	Bueno	6.29	Bueno	0.74	Bueno	0.88	Muy bueno	20.53	Insatisfactorio
1994	0.72	Bueno	0.77	Bueno	15.68	Insatisfactorio	0.67	Satisfactorio	0.77	Bueno	21.15	Insatisfactorio
1995	0.91	Muy bueno	0.92	Muy bueno	-0.01	Muy bueno	0.90	Muy bueno	0.90	Muy bueno	3.85	Muy bueno
1996	0.95	Muy bueno	0.95	Muy bueno	-0.13	Muy bueno	0.98	Muy bueno	0.99	Muy bueno	2.89	Muy bueno
1997	0.48	Insatisfactorio	0.66	Satisfactorio	28.82	Insatisfactorio	0.44	Insatisfactorio	0.69	Satisfactorio	28.66	Insatisfactorio
1998	0.85	Muy bueno	0.90	Muy bueno	14.19	Satisfactorio	0.81	Muy bueno	0.90	Muy bueno	17.41	Insatisfactorio
1999	0.39	Insatisfactorio	0.78	Bueno	-20.51	Insatisfactorio	0.73	Bueno	0.82	Bueno	-13.58	Satisfactorio
2000	0.87	Muy bueno	0.95	Muy bueno	-15.60	Insatisfactorio	0.95	Muy bueno	0.96	Muy bueno	-7.34	Bueno
2001	0.64	Satisfactorio	0.65	Satisfactorio	8.51	Bueno	0.62	Satisfactorio	0.68	Satisfactorio	13.34	Satisfactorio
2002*												
2003	0.67	Satisfactorio	0.70	Satisfactorio	-15.75	Insatisfactorio	0.81	Muy bueno	0.85	Bueno	-5.38	Bueno
2004	0.73	Bueno	0.78	Bueno	8.07	Bueno	0.72	Bueno	0.85	Bueno	17.34	Insatisfactorio
2005*												
2006*												
2007	0.53	Satisfactorio	0.58	Insatisfactorio	14.89	Insatisfactorio	0.60	Satisfactorio	0.68	Satisfactorio	17.20	Insatisfactorio
2008	0.86	Muy bueno	0.90	Muy bueno	11.04	Satisfactorio	0.79	Bueno	0.91	Muy bueno	17.12	Insatisfactorio
2009	0.61	Satisfactorio	0.83	Bueno	20.59	Insatisfactorio	0.53	Satisfactorio	0.80	Bueno	21.37	Insatisfactorio
2010	0.64	Satisfactorio	0.94	Muy bueno	-32.05	Insatisfactorio	0.87	Muy bueno	0.96	Muy bueno	-18.55	Insatisfactorio
2011	0.25	Insatisfactorio	0.83	Bueno	-27.98	Insatisfactorio	0.59	Satisfactorio	0.87	Muy bueno	-20.07	Insatisfactorio
2012*												
2013	0.60	Satisfactorio	0.91	Muy bueno	-15.81	Insatisfactorio	0.74	Bueno	0.88	Muy bueno	-14.32	Satisfactorio
2014	0.75	Bueno	0.78	Bueno	-6.13	Bueno	0.81	Muy bueno	0.84	Bueno	-12.83	Satisfactorio
2015*												
2016*												
2017	0.65	Satisfactorio	0.80	Bueno	22.59	Insatisfactorio	0.57	Satisfactorio	0.76	Bueno	23.05	Insatisfactorio
2018	0.81	Muy bueno	0.93	Muy bueno	18.29	Insatisfactorio	0.75	Bueno	0.95	Muy bueno	23.26	Insatisfactorio
2019	0.77	Bueno	0.89	Muy bueno	19.62	Insatisfactorio	0.71	Bueno	0.95	Muy bueno	27.85	Insatisfactorio
2020	0.88	Muy bueno	0.89	Muy bueno	4.89	Muy bueno	0.88	Muy bueno	0.90	Muy bueno	7.39	Bueno
2021	0.58	Satisfactorio	0.72	Satisfactorio	22.06	Insatisfactorio	0.51	Satisfactorio	0.71	Satisfactorio	22.73	Insatisfactorio
2022	0.75	Bueno	0.77	Bueno	4.57	Muy bueno	0.71	Bueno	0.81	Bueno	12.29	Satisfactorio

*Ausencia de datos de caudal observados



Tabla E-6. Evaluación mensual por año de las simulaciones realizadas a partir de los datos de precipitación CHIRPS – Mapa UCS del año 2050

PRECIPITACIÓN CHIRPS - USO/COBERTURA DEL SUELO - AÑO 2050												
Año	MODELO CEQUEAU						MODELO SWAT					
	NSE		R ²		PBIAS		NSE		R ²		PBIAS	
1983	0.89	Muy bueno	0.89	Muy bueno	-0.46	Muy bueno	0.88	Muy bueno	0.89	Muy bueno	3.59	Muy bueno
1984	0.31	Insatisfactorio	0.91	Muy bueno	-48.82	Insatisfactorio	0.70	Bueno	0.90	Muy bueno	-28.58	Insatisfactorio
1985	0.84	Muy bueno	0.84	Bueno	6.24	Bueno	0.82	Muy bueno	0.90	Muy bueno	13.96	Satisfactorio
1986	0.70	Satisfactorio	0.86	Muy bueno	18.91	Insatisfactorio	0.71	Bueno	0.92	Muy bueno	22.28	Insatisfactorio
1987	0.90	Muy bueno	0.95	Muy bueno	12.12	Satisfactorio	0.82	Muy bueno	0.95	Muy bueno	17.27	Insatisfactorio
1988	0.86	Muy bueno	0.87	Muy bueno	3.78	Muy bueno	0.90	Muy bueno	0.95	Muy bueno	2.63	Muy bueno
1989	0.70	Satisfactorio	0.78	Bueno	16.20	Insatisfactorio	0.73	Bueno	0.87	Muy bueno	15.23	Insatisfactorio
1990	0.84	Muy bueno	0.87	Muy bueno	11.38	Satisfactorio	0.86	Muy bueno	0.93	Muy bueno	11.86	Satisfactorio
1991	0.83	Muy bueno	0.93	Muy bueno	20.23	Insatisfactorio	0.80	Bueno	0.93	Muy bueno	21.25	Insatisfactorio
1992	0.70	Satisfactorio	0.70	Satisfactorio	-0.52	Muy bueno	0.76	Bueno	0.82	Bueno	10.70	Satisfactorio
1993	0.84	Muy bueno	0.85	Bueno	5.70	Bueno	0.75	Bueno	0.87	Muy bueno	19.68	Insatisfactorio
1994	0.72	Bueno	0.78	Bueno	15.27	Insatisfactorio	0.68	Satisfactorio	0.77	Bueno	20.57	Insatisfactorio
1995	0.91	Muy bueno	0.92	Muy bueno	-0.76	Muy bueno	0.91	Muy bueno	0.91	Muy bueno	2.71	Muy bueno
1996	0.95	Muy bueno	0.95	Muy bueno	-0.80	Muy bueno	0.98	Muy bueno	0.99	Muy bueno	1.94	Muy bueno
1997	0.48	Insatisfactorio	0.65	Satisfactorio	28.28	Insatisfactorio	0.45	Insatisfactorio	0.68	Satisfactorio	27.88	Insatisfactorio
1998	0.85	Muy bueno	0.90	Muy bueno	13.69	Satisfactorio	0.81	Muy bueno	0.89	Muy bueno	16.57	Insatisfactorio
1999	0.38	Insatisfactorio	0.78	Bueno	-21.32	Insatisfactorio	0.72	Bueno	0.82	Bueno	-14.48	Satisfactorio
2000	0.86	Muy bueno	0.95	Muy bueno	-16.19	Insatisfactorio	0.94	Muy bueno	0.96	Muy bueno	-8.13	Bueno
2001	0.64	Satisfactorio	0.65	Satisfactorio	7.90	Bueno	0.62	Satisfactorio	0.67	Satisfactorio	12.30	Satisfactorio
2002*												
2003	0.66	Satisfactorio	0.70	Satisfactorio	-16.37	Insatisfactorio	0.81	Muy bueno	0.86	Muy bueno	-6.42	Bueno
2004	0.73	Bueno	0.78	Bueno	7.73	Bueno	0.72	Bueno	0.84	Bueno	16.55	Insatisfactorio
2005*												
2006*												
2007	0.54	Satisfactorio	0.58	Insatisfactorio	14.41	Insatisfactorio	0.62	Satisfactorio	0.70	Satisfactorio	16.27	Insatisfactorio
2008	0.86	Muy bueno	0.90	Muy bueno	10.61	Satisfactorio	0.79	Bueno	0.91	Muy bueno	16.44	Insatisfactorio
2009	0.62	Satisfactorio	0.83	Bueno	19.95	Insatisfactorio	0.54	Satisfactorio	0.80	Bueno	20.70	Insatisfactorio
2010	0.63	Satisfactorio	0.94	Muy bueno	-32.80	Insatisfactorio	0.86	Muy bueno	0.96	Muy bueno	-19.83	Insatisfactorio
2011	0.24	Insatisfactorio	0.83	Bueno	-28.51	Insatisfactorio	0.59	Satisfactorio	0.88	Muy bueno	-20.79	Insatisfactorio
2012*												
2013	0.58	Satisfactorio	0.91	Muy bueno	-16.61	Insatisfactorio	0.72	Bueno	0.88	Muy bueno	-15.69	Insatisfactorio
2014	0.75	Bueno	0.78	Bueno	-6.97	Bueno	0.81	Muy bueno	0.86	Bueno	-14.27	Satisfactorio
2015*												
2016*												
2017	0.65	Satisfactorio	0.80	Bueno	22.01	Insatisfactorio	0.58	Satisfactorio	0.75	Bueno	22.30	Insatisfactorio
2018	0.82	Muy bueno	0.93	Muy bueno	17.82	Insatisfactorio	0.75	Bueno	0.95	Muy bueno	22.49	Insatisfactorio
2019	0.77	Bueno	0.89	Muy bueno	19.00	Insatisfactorio	0.73	Bueno	0.95	Muy bueno	26.87	Insatisfactorio
2020	0.88	Muy bueno	0.89	Muy bueno	4.17	Muy bueno	0.88	Muy bueno	0.89	Muy bueno	6.04	Bueno
2021	0.59	Satisfactorio	0.72	Satisfactorio	21.56	Insatisfactorio	0.53	Satisfactorio	0.72	Satisfactorio	22.07	Insatisfactorio
2022	0.75	Bueno	0.77	Bueno	4.05	Muy bueno	0.71	Bueno	0.80	Bueno	11.51	Satisfactorio

*Ausencia de datos de caudal observados