



Estudio hidrológico y modelación hidráulica Llanos 34 – Análisis hidroclimatológico

Presentado a:



Dirigido por:

Ing. Gonzalo Cifuentes Ospina

Gerente técnico

Magister en recursos hídricos e hidroinformática

Aqualogs SAS

Aprobado por:

GeoPark Colombia SAS

Versión 02

Bogotá, Diciembre de 2025

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEPARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

DATOS DEL INFORME

Título	Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 – Análisis hidroclimatológico		
Código del informe	AQ194	Versión del informe	02

CONTROL DE CALIDAD INTERNO AQUALOGS SAS

Elaborado por	GONZALO CIFUENTES OSPINA Gerente Técnico
	CARLOS PUENTES Director de Proyectos
	CAMILO FERRO Ingeniero de Proyectos JORGE MARIN Ingeniero de Proyectos
Fecha	Diciembre 5 del 2025

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEO PARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

Tabla de contenido

1.	Introducción	8
2.	Análisis de la cuenca de estudio.....	9
2.1.	Localización de las cuencas pivote.....	11
2.2.	Marco teórico	12
2.2.1.	Morfometría.....	13
2.2.2.	Curvas hipsométricas	16
2.2.1.	Método SCS Número de Curva (CN)	16
2.3.	Resultados.....	18
2.3.1.	Análisis morfométrico de las cuencas.....	19
2.3.2.	Curvas hipsométricas	20
2.3.3.	Comportamiento por cobertura de la tierra y tipo de suelo	22
3.	Análisis de datos climatológicos.....	26
3.1.	Marco teórico	26
3.1.1.	Valores faltantes	26
3.1.2.	Correlación	26
3.1.3.	Prueba de homogeneidad.....	28
3.1.4.	Análisis de valores atípicos	29
3.1.5.	Imputación de datos	30
3.2.	Variables hidrológicas.....	32
3.3.	Resultados.....	34
3.3.1.	Valores faltantes	35
3.3.1.	Correlación de las series de tiempo	39
3.3.2.	Prueba de homogeneidad.....	43
3.3.1.	Datos atípicos.....	45
3.3.2.	Imputación de datos	52
3.3.3.	Selección de estaciones	56
4.	Cambio climático.....	57
4.1.	Marco teórico	57
4.1.1.	Definición de Cambio Climático	57
4.1.2.	Modelos de cambio climático	59

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEO PARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

4.1.3.	Reducción de escala (<i>downscaling</i>)	60
4.2.	Resultados.....	65
4.2.1.	Reducción de escala	65
4.2.2.	Efecto del cambio climático sobre la precipitación	67
5.	Estudio hidrológico.....	70
5.1.	Marco teórico	70
5.1.1.	Escorrentía superficial – Modelo conceptual.....	70
5.1.2.	TOP MODEL – Modelo numérico	70
5.1.3.	Criterios de desempeño del modelo – Calibración y validación	71
5.1.4.	Tránsito de caudales	73
5.2.	Modelación hidrológica	75
5.2.1.	TOPMODEL.....	75
5.2.2.	Metodología de estimación caudales del río Upía.....	92
5.3.	Resultados Modelación Hidrológica	101
5.3.1.	Hidrogramas resultados	101
5.3.2.	Caudales río Upía	104
6.	Análisis flujo base	105
6.1.	Marco teórico	105
6.2.	Metodología.....	105
6.3.	Resultados.....	107
7.	Anexos	107
7.1.	Anexo 1. Localización.....	107
7.2.	Anexo 2. Climatología.	107
7.3.	Anexo 3. Cambio Climático	107
7.4.	Anexo 4. Estudio hidrológico	107
7.5.	Anexo 5. Flujo base	108
8.	Bibliografía	109

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEO PARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

Tablas

Tabla 2-1. Estaciones limnimétricas y limnigráficas en los cauces que ingresar al bloque Llanos 34	9
Tabla 2-2. Estaciones limnimétricas y limnigráficas de cierre de las cuencas pivote	11
Tabla 2-3. Descripción de los grupos hidrológicos.	17
Tabla 2-4. Algunos valores comunes de CN según grupo hidrológico del suelo y cobertura vegetal.	17
Tabla 2-5. Condiciones antecedentes de humedad básicas empleadas en el método SCS.	18
Tabla 2-6. Cálculo de números de curva en condiciones secas y húmedas.	18
Tabla 2-7. Morfometría de las cuatro cuencas de estudio	19
Tabla 3-1. Estaciones climatológicas en el área de trabajo.	32
Tabla 3-2. Análisis de datos faltantes de todas las estaciones.	35
Tabla 3-3. Límite superior para la información a de las estaciones del área de estudio.	46
Tabla 3-4. Datos atípicos en las estaciones del área de estudio.	47
Tabla 3-5. Límite superior para la información a de las estaciones en las cuencas pivote.	48
Tabla 3-6. Datos a típicos en las estaciones en las cuencas pivote.	49
Tabla 3-7. Datos completados en las estaciones del área de estudio	52
Tabla 3-8. Datos completados en las estaciones de la cuenca del río Cusiana.	53
Tabla 3-9. Datos completados en las estaciones de la cuenca del río Cabuyarito.	54
Tabla 3-10. Datos completados en las estaciones de la cuenca del río Charte.	55
Tabla 3-11. Estaciones finales seleccionadas después del análisis hidrológico.	56
Tabla 5-1. Parámetros iniciales empleados para el Topmodel.	76
Tabla 5-2. Parámetros iniciales empleados para el Topmodel.	77
Tabla 5-3. Fechas de las series de tiempo para cuencas hidrológicamente similares.	78
Tabla 5-4. Parámetros óptimos resultantes para cuencas pivote sujetas a calibración diaria.	79
Tabla 5-5. Parámetros óptimos resultantes para cuencas pivote sujetas a calibración subdiaria. ..	81
Tabla 5-6. Proporción de área de influencia de cada estación pluviométrica en la cuenca del río Túa.	86
Tabla 5-7. Resultado de la prueba K-S para la serie de máximos utilizada.	88
Tabla 5-8. Precipitaciones máximas para diferentes periodos de retorno en la cuenca del río Túa.	88
Tabla 5-9. Distancias del río entre las localizaciones importantes.	93
Tabla 5-10. Resultados test de Pettitt para la estación GUAICARAMO - AUT [35107040].	96
Tabla 5-11. Caudales asociados a los periodos de retorno del río Upía.	99
Tabla 5-12. Caudales asociados a los periodos de retorno del río Upía teniendo en cuenta el cambio climático.	100
Tabla 5-13. Caudales asociados a los periodos de retorno del río Upía.	104
Tabla 5-14. Caudales asociados a los periodos de retorno del río Upía teniendo en cuenta el cambio climático.	104
Tabla 6-1. Áreas de los polígonos de Thiessen.	106
Tabla 6-2. Caudales bases estimados.	107

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEO PARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

Figuras

Figura 2-1. Estaciones limimétricas y limnigráficas en las cuencas del bloque.	10
Figura 2-2. Estaciones limnimétricas y limnigráficas en las cuencas pivote.	12
Figura 2-3. Curvas hipsométricas de las cuatro cuencas de estudio.....	21
Figura 2-4. Coberturas del suelo	23
Figura 2-5. Tipos del suelo.....	24
Figura 2-6. Número de curva.....	25
Figura 3-1. Flujo del proceso de datos.	32
Figura 3-2. Estaciones con información precipitación del IDEAM.	34
Figura 3-3. Análisis de vacíos en las estaciones en el área de estudio.	37
Figura 3-4. Análisis de vacíos en las estaciones en la cuenca del río Cusiana.....	37
Figura 3-5 Análisis de vacíos en las estaciones en la cuenca del río Cabuyarito.	38
Figura 3-6. Análisis de vacíos en las estaciones en la cuenca del río Charte.	38
Figura 3-7. Datos completados en las estaciones del área de estudio	53
Figura 3-8. Datos completados en las estaciones de la cuenca del río Cusiana	54
Figura 3-9. Datos completados en las estaciones de la cuenca del río Cabuyarito	55
Figura 3-10. Datos completados en las estaciones de la cuenca del río Charte	56
Figura 4-1. Concentración de CO ₂ en la atmosfera y su relación con los escenarios RCP y SSP	58
Figura 4-2. Distribución de estadístico KS para todos los modelos de circulación general y métodos de downscaling.....	66
Figura 4-3. Distribución de estadístico IOA para todos los modelos de circulación general y métodos de downscaling.	67
Figura 4-4. Evaluación de escenarios futuros de precipitación en la cuenca del río Túa mediante técnicas de reducción de escala. Panel A: climatología mensual; Panel B: curvas de excedencia; Panel C: serie anual. Se muestran los datos históricos crudos de los modelos (RAW), los modelos históricos corregidos (Histórico KS), las observaciones y los escenarios futuros corregidos SSP1-2.6, SSP2-4.5 y SSP5-8.5.	68
Figura 5-1. Resultados de calibración para la cuenca Cabuyarito.....	80
Figura 5-2. Series de calibración horaria.....	81
Figura 5-3. Análisis de sensibilidad de parámetros horarios.	81
Figura 5-4. Resultados de calibración a nivel horario.	82
Figura 5-5. Subdominios sistema Túa.	84
Figura 5-6. Precipitaciones máximas diarias para las estaciones de la cuenca Túa.....	85
Figura 5-7. Box-plots de los datos máximos anuales por estación para la cuenca del río Túa.	86
Figura 5-8. Ajuste de precipitaciones máximas a diferentes funciones de probabilidad.	87
Figura 5-9. Hietograma generado para la cuenca del río Túa (Log Pearson III).	90
Figura 5-10. Hietograma generado para la cuenca del río Túa (Gumbel).....	91
Figura 5-11. Hietogramas de precipitación para diferentes periodos de retorno, con Log Pearson III considerando cambio climático.	92

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEO PARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

Figura 5-12. Hietogramas de precipitación para diferentes periodos de retorno, con Gumbel considerando cambio climático.	92
Figura 5-13. Localización estación GUAICARAMO - AUT [35107040] y VISO EL [35107020].....	93
Figura 5-14. Correlación cruzada entre las series de caudales de la estación GUAICARAMO - AUT [35107040] y la estación VISO EL [35107020].	94
Figura 5-15.Series de caudal de la estación VISO EL [35107020] y GUAICARAMO-AUT [35107040].	94
Figura 5-16.Calibración tránsito de Muskingum - Cunge.....	95
Figura 5-17.Serie de validación para el modelo de tránsito de Muskingum - Cunge.	95
Figura 5-18.Comparación de la validación para el modelo de tránsito de Muskingum - Cunge.	96
Figura 5-19.Análisis de datos faltantes.	96
Figura 5-20.Comparación serie de caudales de la estación con y sin datos atípicos.....	97
Figura 5-21.Transito de caudales hasta la frontera del dominio de modelación hidráulica.....	97
Figura 5-22.Caudales máximos anuales del caudal en el Dominio del modelo hidráulico.	98
Figura 5-23.Análisis probabilístico de las series de caudales máximos.	99
Figura 5-24.Análisis probabilístico de las series de caudales máximos.	100
Figura 6-1.Series de caudal flujo base.....	106

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEO PARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

1. Introducción

El presente documento corresponde al análisis hidroclimatológico en el marco del Estudio Hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 (en adelante Bloque Lla-34) en respuesta al artículo primero de la Resolución 1089 del 13 de junio de 2024, resuelta por la Resolución 2330 del 23 de octubre de 2024. El documento tiene como objetivo el desarrollo de un estudio hidrológico orientado a la generación de caudales de entrada requeridos para la construcción de un modelo hidráulico de inundaciones en el área de estudio. Dicho proceso permitirá comprender de manera integral la dinámica hidrológica de la cuenca, incorporando tanto la caracterización de la precipitación como los procesos asociados al flujo superficial y subterráneo, con el fin de representar de manera confiable los escenarios de crecida.

Para este propósito, se ha diseñado una estructura metodológica que contempla varios capítulos específicos. En primera instancia, se presenta la regionalización de la cuenca, fundamentada en la información disponible sobre suelos, cobertura, topografía y condiciones climáticas. Posteriormente, se desarrolla un capítulo orientado al análisis de la precipitación, complementado con un apartado específico para el tratamiento de los posibles efectos del cambio climático, considerando su incidencia en la disponibilidad y variabilidad de los recursos hídricos. De igual forma, se incluye un capítulo destinado al análisis del flujo base, con el fin de caracterizar la contribución subterránea al régimen hidrológico.

Finalmente, se dispone de un capítulo técnico que describe en detalle los inputs, outputs y el protocolo de modelación implementado en el modelo hidrológico. Cada uno de los capítulos mencionados se estructura de manera uniforme en tres secciones: un marco teórico, que sustenta científicamente los conceptos abordados; una metodología, que explica el procedimiento seguido y las herramientas empleadas; y una sección de resultados, donde se presentan los hallazgos y productos obtenidos.

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEO PARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

2. Análisis de la cuenca de estudio

Una de las etapas más importantes en el desarrollo de un modelo hidrológico es la identificación de los datos que se van a usar para la construcción de este. Para ello, se hace uso de estaciones hidroclimatológicas, encargadas de medir los parámetros que se desean modelar.

En este estudio se requiere el uso de estaciones limnimétricas y limnigráficas que registren los caudales de los cuerpos de agua que ingresan al bloque Llanos 34. En la **Figura 2-1** se presentan las estaciones identificadas dentro de las cuencas asociadas al área de estudio.

Tabla 2-1. Estaciones limnimétricas y limnigráficas en los cauces que ingresar al bloque Llanos 34

Código de la estación	Nombre de la estación	Tipo	Cauce	Responsable	Altitud (m.s.n.m)	Coordenadas MAGNA-SIRGA_CTM12	
						Este	Norte
35107020	VISO EL	Limnigráfica (LG)	Río Upía	IDEAM	169	5024031.02	2038675.54
35107040	GUAICARAMO - AUT	Limnigráfica (LG)	Río Upía	IDEAM	264	4994842.83	2076139.73
3518700145	TUA BALNEARIO - AUT	Limnigráfica (LG)	Río Túa	IDEAM	412	5010984.39	2097858.49
35097090	LA REVENTONERA	Limnigráfica (LG)	Río Upía	IDEAM	451	4994723.46	2099992.85

Fuente. Aqualogs SAS (2025)

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEO PARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

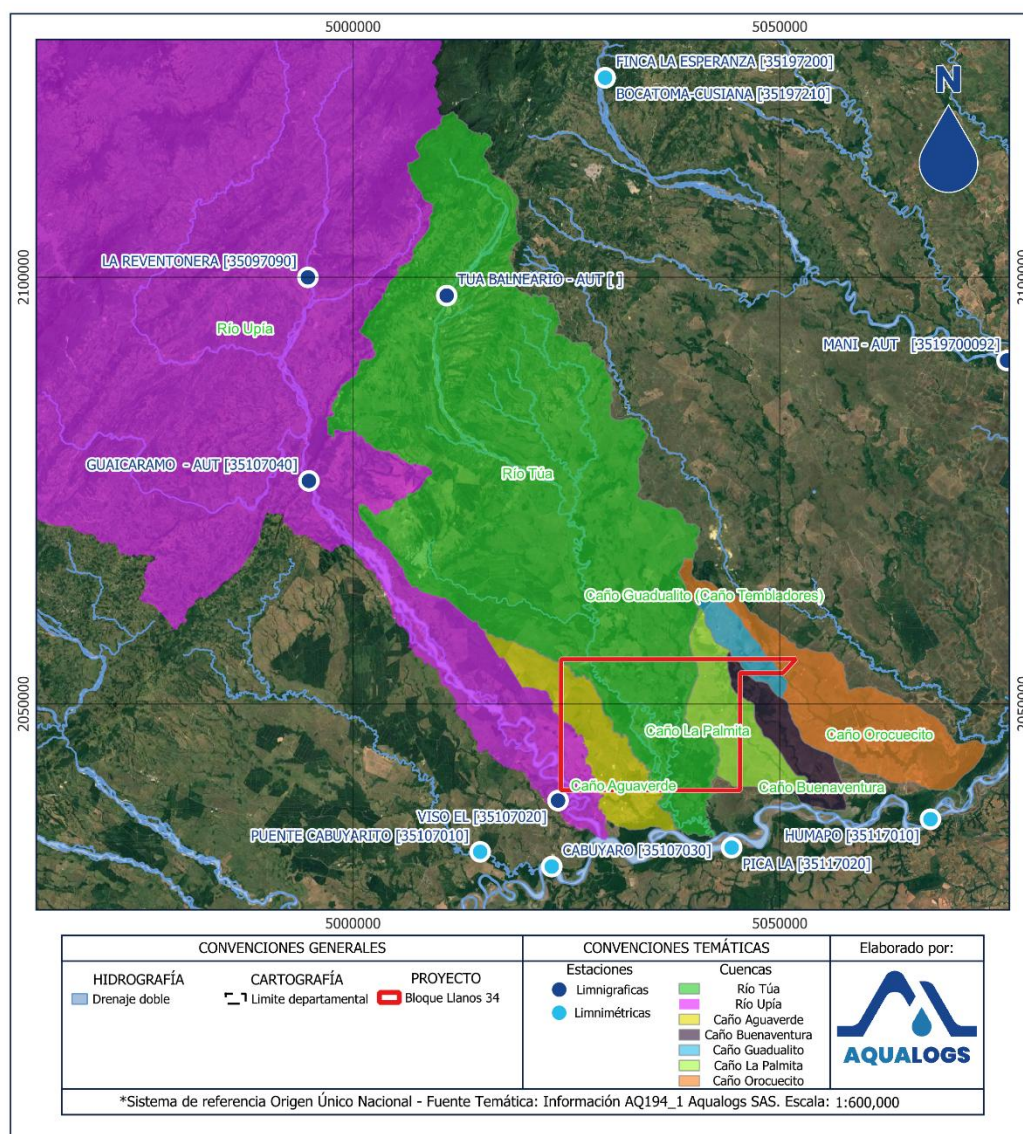


Figura 2-1. Estaciones limnigráficas y limnimétricas en las cuencas del bloque.

Fuente. Aqualogs SAS (2025)

Como se aprecia en la Figura 2-1, la cuenca del río Túa en el área del bloque Llanos 34 no dispone de un punto de aforo que permita contar con registros directos de caudal, lo cual limita la calibración del modelo hidrológico de manera local. Para superar esta limitación, se suele recurrir al uso de una cuenca pivote, entendida como una cuenca vecina o comparable que cuenta con información hidrométrica suficiente y que presenta condiciones morfométricas, climatológicas y de cobertura similares a las de la cuenca de estudio (Blöschl, 2005). Esta estrategia permite transferir los parámetros calibrados desde la cuenca pivote hacia la cuenca del Túa, con el fin de obtener una representación hidrológica más realista y confiable en el área de interés.

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEO PARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

2.1. Localización de las cuencas pivote

Para este estudio se seleccionaron tres cuencas pivote que sirvieron de base en el proceso de parametrización del modelo hidrológico de la cuenca del río Túa. La primera corresponde a la cuenca del río Cabuyarito, ubicada entre los departamentos de Meta y Cundinamarca, cuyo punto de cierre se encuentra en la estación limnimétrica Puente Cabuyarito [35107010]. La segunda es la cuenca del río Charte, localizada entre los departamentos de Boyacá y Casanare, delimitada hasta la estación limnimétrica Puente Charte [35197040]. Finalmente, se consideró la cuenca del río Cusiana, también situada entre los departamentos de Casanare y Boyacá, delimitada hasta la estación limnimétrica Maní [35197180].

Tabla 2-2. Estaciones limnimétricas y limnigráficas de cierre de las cuencas pivote

Código de la estación	Nombre de la estación	Tipo	Cauce	Responsable	Altitud (m.s.n.m)	Coordenadas MAGNA-SIRGA_CTM12	
						Este	Norte
35107010	PUENTE CABUYARITO	Limnimétrica (LM)	Río Cabuyarito	IDEAM	168	5014906.44	2032666.93
35197180	MANI	Limnimétrica (LM)	Río Cusiana	IDEAM	290	5078544.57	2090313.07
35197040	PUENTE CHARTE	Limnimétrica (LM)	Río Charte	IDEAM	291	5056940.52	2138854.89

Fuente. Aqualogs SAS (2025)

La **Figura 2-2** muestra la ubicación geográfica de las tres cuencas seleccionadas y de sus respectivas estaciones de cierre, utilizadas como referencia en el proceso de calibración del modelo.

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEO PARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

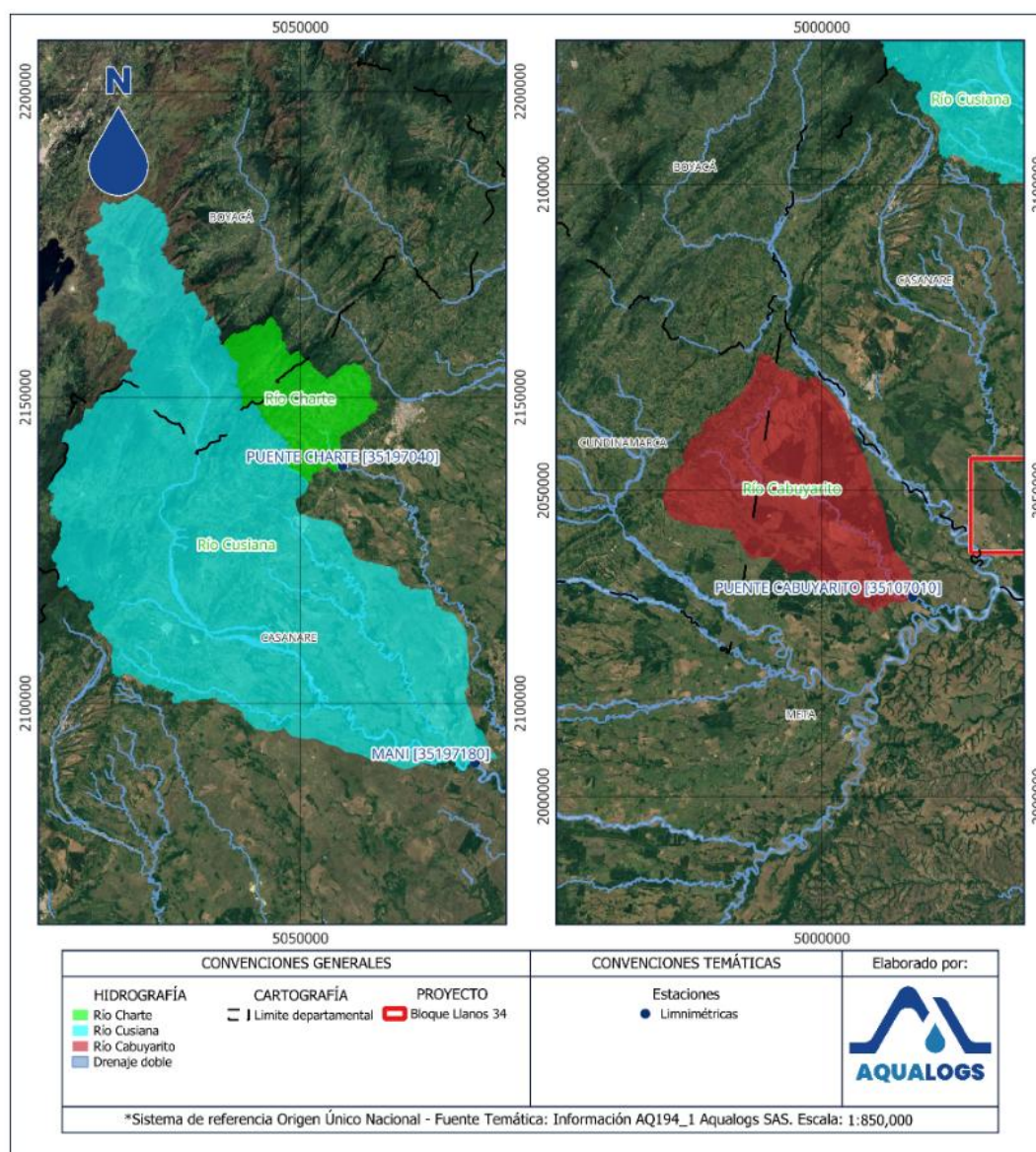


Figura 2-2. Estaciones limnimétricas y limnigráficas en las cuncas pivote.

Fuente. Aqualogs SAS (2025)

2.2. Marco teórico

En el presente marco teórico se desarrollan las principales características utilizadas en el proceso de identificación de la similitud de las cuencas pivote, siendo estos las comparaciones morfológicas, comparación de la respuesta hidrológica de la cuenca y la distribución de los usos del suelo. Además, se presenta la selección de las cuencas empleadas en la regionalización hidrológica.

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEOPARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

2.2.1. Morfometría

El análisis morfométrico realizado en las cuencas hidrográficas de la zona de estudio se apoya en principios clásicos de la hidrología y la geomorfología cuantitativa (Chow & Maidment, 1998; Strahler, 1964). Estos fundamentos retoman aportes de autores pioneros como Horton (1932, 1945), Schumm (1956) y Gravelius (1914), cuyas propuestas constituyen la base para caracterizar la forma, el relieve y la red de drenaje de una cuenca. Dichos parámetros permiten comprender cómo las características físicas influyen en la escorrentía, el comportamiento de los caudales y la respuesta ante eventos extremos.

2.2.1.1. Longitud axial

Representa la línea recta entre el punto más lejano del sistema y el punto de salida. Sirve de base para la estimación de índices de forma y simetría. Es un parámetro fundamental porque permite establecer relaciones geométricas básicas y definir el recorrido máximo del agua dentro de la cuenca.

2.2.1.2. Ancho medio

Se calcula como la relación entre el área de la cuenca y su longitud axial, indicando el grado de ensanchamiento del territorio. Este índice es importante porque permite comparar cuencas con áreas similares, pero con diferentes configuraciones espaciales, lo cual influye en el tiempo de concentración del escurrimiento.

Ecuación 2-1. Ancho medio de la cuenca.

$$W = \frac{A}{L}$$

Donde W es el ancho medio de la cuenca (km), A el área de la cuenca (km²) y L la longitud axial de la cuenca (km) (Gaspari et al., 2009)

2.2.1.3. Densidad de drenaje

Es el cociente entre la longitud total de canales de escorrentía y el área de la cuenca. Un valor alto indica una red hidrográfica más desarrollada y eficiente. Este parámetro es relevante porque refleja la capacidad de la cuenca para evacuar el agua de lluvia, lo que se relaciona con procesos de infiltración, escorrentía superficial y susceptibilidad a crecidas.

Ecuación 2-2. Densidad de drenaje.

$$Dd = \frac{Lt}{A}$$

Donde Dd es la densidad de drenaje (km/km²), A el área de la cuenca (km²) y Lt la longitud total de los cauces dentro de la cuenca (km). (Horton, 1945)

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEO PARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

2.2.1.4. Índice de alargamiento

Evalúa cuán parecida es la forma de la cuenca a un círculo perfecto. Este índice es importante porque las cuencas más alargadas tienden a generar crecidas menos abruptas, mientras que las más circulares concentran la escorrentía en menos tiempo, aumentando el riesgo de avenidas súbitas. Se calcula mediante la fórmula:

Ecuación 2-3. Índice de alargamiento.

$$Re = \frac{\sqrt[2]{A/\pi}}{L}$$

Donde Re es el índice de alargamiento, A el área de la cuenca (km^2) y L la longitud axial de la cuenca (km). (Schumm, 1956).

2.2.1.5. Índice de compacidad

También conocido como coeficiente de Gravelius, compara la forma de la cuenca con la de una circunferencia ideal. Es importante porque indica el grado de irregularidad de la cuenca, valores cercanos a 1 reflejan formas más compactas, asociadas a tiempos de concentración cortos y mayor respuesta hidrológica. Se calcula como:

Ecuación 2-4. Índice de compacidad.

$$Kc = 0.28 * \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Donde Kc es el índice de compacidad, A el área de la cuenca (km^2) y P el perímetro de la cuenca (km) (Gravelius, 1914)..

2.2.1.6. Índice de forma

Describe la relación entre el área de la cuenca y el cuadrado de su longitud axial. Este índice es útil porque permite clasificar cuencas según su geometría, lo cual influye directamente en la magnitud y la rapidez de la escorrentía.

Ecuación 2-5. Índice de forma.

$$Rf = \frac{A}{L^2}$$

Donde Rf es el índice de forma, A el área de la cuenca (km^2) y L la longitud axial de la cuenca (km). (Horton, 1945).

2.2.1.7. Tiempos de concentración

Un parámetro que debe ser tenido en cuenta al momento de realizar una modelación hidrológica es el tiempo de concentración, este es definido como el tiempo necesario para que el agua desde los límites más extremos de la cuenca llegue hasta la salida de esta (INVIAS, 2009). En general, el tiempo de concentración se calcula por medio de ecuaciones empíricas, sin embargo, la ecuación

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEO PARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

más utilizada y la recomendada por el INVIAS (2009) es el tiempo de Kirpich el cual se define según la Ecuación 2-6.

Ecuación 2-6. Tiempo de concentración por el método de Kirpich.

$$T_c = 0.06628 \left(\frac{L}{S^{0.5}} \right)^{0.77}$$

Donde T_c es el tiempo de contracción (horas), L la longitud del cauce principal (km) y S la pendiente entre las elevaciones máxima y mínima (pendiente total) del cauce principal, en metros por metro (m/m).

Otras alternativas para determinar el tiempo de concentración son las ecuaciones de Témez y Johnstone, Giandotti, Ventura – Heras y V.T. Chow (Ecuación 2-7, Ecuación 2-8, Ecuación 2-9, Ecuación 2-10 y Ecuación 2-11, respectivamente).

Ecuación 2-7. Tiempo de concentración por el método de Témez.

$$T_c = 0.3 \left(\frac{L}{S^{0.25}} \right)^{0.76}$$

Donde, T_c es el tiempo de contracción (horas), L la longitud del cauce principal (km), S la pendiente total del cauce principal (%).

Ecuación 2-8. Tiempo de concentración por el método de Johnstone.

$$T_c = 5 \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.5}$$

Donde, T_c es el tiempo de contracción (min), L la longitud del cauce principal (km) y, S la pendiente total del cauce principal (%).

Ecuación 2-9. Tiempo de concentración por el método de Giandotti.

$$T_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{25.3\sqrt{LS}}$$

Donde, T_c es el tiempo de contracción (min), L la longitud del cauce principal (km), S la pendiente total del cauce principal (%) y A el área de la cuenca (km²).

Ecuación 2-10. Tiempo de concentración por el método de Ventura – Heras.

$$T_c = \frac{LA^{0.5}}{\sqrt{AS}}$$

Donde, T_c es el tiempo de contracción (min), L la longitud del cauce principal (km), S la pendiente total del cauce principal (%) y A el área de la cuenca (km²).

Ecuación 2-11. Tiempo de concentración por el método de V. T. Chow.

$$T_c = 0.273 \left(\frac{L}{S^{0.5}} \right)^{0.64}$$

Donde, T_c es el tiempo de contracción (min), L la longitud del cauce principal (km) y S la pendiente total del cauce principal (%).

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEO PARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

2.2.2. Curvas hipsométricas

Las curvas hipsométricas son representaciones gráficas que describen la relación entre la altitud y el área acumulada drenada dentro de una cuenca hidrográfica. Este tipo de análisis permite caracterizar el relieve de la cuenca, evaluar su grado de erosión y determinar la etapa evolutiva del paisaje, lo cual resulta fundamental para comprender su comportamiento hidrológico (Strahler, 1952).

Desde el punto de vista geomorfológico, la forma de la curva hipsométrica refleja la distribución de masas altimétricas:

- Una curva convexa indica una cuenca joven, con pendientes pronunciadas y bajo grado de erosión.
- Una curva cóncava sugiere una cuenca madura, con relieve suavizado y mayor estabilidad morfológica.
- Una curva rectilínea o intermedia puede representar una etapa de transición.

Estas curvas se construyen a partir de modelos de elevación digital (DEM), calculando el área acumulada por encima de cada cota altitudinal y normalizando los valores de altitud y superficie para obtener una función adimensional. La expresión general de la curva puede representarse como:

Ecuación 2-12. Cálculo de parámetros de la curva hipsométrica.

$$y = \left(\frac{h - h_{min}}{h_{max} - h_{min}} \right), x = \frac{a}{A}$$

Donde, y es la altitud relativa, h la altitud en cada intervalo, h_{max} y h_{min} cotas mínima y máxima de la cuenca, a el área acumulada por encima de h y A el área de la cuenca (km^2).

2.2.1. Método SCS Número de Curva (CN)

El número de curva es un parámetro adimensional que indica la respuesta de escorrentía una cuenca. Este parámetro es relacionado con el uso y tratamiento de la tierra, la condición hidrológica, el grupo hidrológico del suelo y condición de humedad del suelo antecedente al evento modelado en la cuenca de drenaje. En los siguientes numerales se presenta la teoría que debe considerarse para la estimación del CN (Kent, 1972).

2.2.1.1. Grupo hidrológico del suelo

Las propiedades del suelo influyen en gran medida en la cantidad de escorrentía. En el método SCS-Curva Número, estas propiedades están representadas por un parámetro hidrológico: la tasa mínima de infiltración obtenida para un suelo desnudo después de un humedecimiento prolongado. De este modo, se incluye la influencia tanto de la condición de la superficie del suelo (tasa de infiltración) como de su horizonte (tasa de transmisión). Este parámetro, que indica el potencial de escorrentía de un suelo, es la base cualitativa de la clasificación de todos los suelos en cuatro grupos.

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEOPARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

Los Grupos Hidrológicos de Suelos, tal como los definen en el Manual de Drenaje de Carreteras (INVIAS, 2009) son presentados en la Tabla 2-3.

Tabla 2-3. Descripción de los grupos hidrológicos.

Grupo	Descripción
A	Son suelos con un <i>potencial de escorrentía bajo</i> . Se caracterizan por tener una alta tasa de infiltración incluso cuando estén muy húmedos. Consisten en arenas o gravas profundas, bien a excesivamente drenadas. Estos suelos tienen una alta tasa de transmisión de agua.
B	Son suelos con un <i>potencial de escorrentía moderadamente bajo</i> . Se caracterizan por ser suelos con tasa de infiltración moderada cuando están muy húmedos. Suelos moderadamente profundos a profundos, moderadamente bien drenados a bien drenados, suelos con texturas moderadamente finas a moderadamente gruesas, y permeabilidad moderadamente lenta a moderadamente rápida. Son suelos con tasas de transmisión de agua moderadas.
C	Son suelos con un <i>potencial de escorrentía moderadamente alto</i> . Suelos con infiltración lenta cuando están muy húmedos. Consisten en suelos con un estrato que impide el movimiento del agua hacia abajo; suelos de texturas moderadamente finas a finas; suelos con infiltración lenta debido a sales o álcalis o suelos con niveles freáticos moderados. Esos suelos pueden ser pobremente drenados o bien a moderadamente bien drenados, con estratos de permeabilidad lenta a muy lenta a poca profundidad 50-100 cm).
D	Son suelos con un potencial alto de escorrentías. Este tipo de suelos se caracterizan por tener una infiltración muy lenta cuando se encuentran con altos niveles de humedad. Consisten en suelos arcillosos con alto potencial de expansión; suelos con nivel freático alto permanente; suelos con estrato arcilloso superficial; suelos con infiltración muy lenta debido a sales o álcalis y suelos poco profundos sobre material casi impermeable. Estos suelos tienen una tasa de transmisión de agua muy lenta.

Fuente. INVIAS (2009)

2.2.1.2. Determinación del número de curva de escorrentía

Algunos de los valores de curva número más comunes según el Grupos Hidrológicos de Suelos y cobertura vegetal son presentados en la **Tabla 2-4**. Para revisar los valores restantes de la metodología para diferentes tipos de cobertura, se refiere al lector al Manual de Drenaje de Carreteras del Instituto Nacional de Vías (INVIAS, 2009). Cuando se determina del valor del CN para una o varias cuencas con varias coberturas, se debe calcular el valor medio ponderado de CN según las zonas (áreas) que cada cobertura represente.

Tabla 2-4. Algunos valores comunes de CN según grupo hidrológico del suelo y cobertura vegetal.

Cobertura	Grupo hidrológico			
	A	B	C	D
Tierras agrícolas sin conservación	72	81	88	91
Cultivo doble	62	71	88	91
Plantación agrícola	45	53	67	72
Tierra con matorrales	36	60	73	79
Terreno sin matorrales (residuos pedregosos / afloramientos rocosos)	45	66	77	83

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEO PARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

Bosque (degradado)	45	66	77	83
Plantación forestal	25	55	70	77
Pasto	39	61	74	80
Asentamiento	57	72	81	86
Carretera / Línea ferroviaria	98	98	98	98
Corriente de río	97	97	97	97
Depósitos sin agua	96	96	96	96
Depósitos con agua	100	100	100	100

Fuente. INVIAS (2009)

Un factor importante para tener en cuenta para usar el método de Curva Numero son las condiciones antecedentes de humedad (Antecedent Moisture Conditions, AMC), las cuales se agrupan en tres condiciones básicas presentes en la Tabla 2-5.

Tabla 2-5. Condiciones antecedentes de humedad básicas empleadas en el método SCS.

AMC	Descripción
AMC I	Condiciones secas: No aplicable a proyectos de crecidas. Los suelos en la cuenca están secos, pero no hasta el punto de marchitamiento.
AMC II	Condiciones normales: Aplicable a proyectos asociado a crecidas anuales o promedios. Los suelos en la cuenca se encuentran en estado de humedad normal.
AMC III	Condiciones húmedas: Aplicable a proyectos de crecidas máximas. Los suelos en la cuenca se encuentran en estado muy húmedo, esto se presenta cuando ha llovido mucho o poco y han ocurrido bajas temperaturas durante los cinco días anteriores a la tormenta, y el suelo está casi saturado.

Fuente. Lavao (2014)

Los números de curva de las tablas que se emplean para la caracterización de las cuencas en la literatura se encuentran definidos para condiciones antecedentes de humedad normales (CN II). Se establecen las relaciones presentadas en la **Tabla 2-6** para modificar el CN para las otras condiciones precedentes.

Tabla 2-6. Cálculo de números de curva en condiciones secas y húmedas

CN condiciones secas (CN I)	CN condiciones húmedas (CN III)
$CN (I) = \frac{4.2 CN (II)}{10 - 0.058 CN (II)}$	$CN (III) = \frac{23 CN (II)}{0.13 - 0.059 CN (II)}$
Donde $CN (II)$ son los valores curva número para condiciones normales	

Fuente. Lavao (2014)

2.3. Resultados

En el presente capítulo se exponen los resultados obtenidos a partir de los distintos análisis realizados, orientados a evaluar el grado de similitud entre la cuenca del río Túa y las cuencas pivote seleccionadas.

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEO PARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

2.3.1. Análisis morfométrico de las cuencas

El análisis morfométrico constituye una herramienta fundamental para la caracterización física de las cuencas, ya que permite describir cuantitativamente su forma, estructura y organización interna. Estas propiedades influyen de manera directa en la dinámica del escurrimiento, la velocidad de concentración del flujo, la eficiencia del drenaje y la capacidad de almacenamiento temporal del agua en el sistema. Mediante el cálculo de los parámetros morfométricos, es posible evaluar el grado de similitud entre cuencas y establecer criterios para la transferencia de parámetros en procesos de modelación hidrológica. En esta sección se presenta el análisis morfométrico aplicado a las cuencas pivote y la cuenca del río Túa, con el fin de sustentar su comparabilidad y pertinencia en el marco de calibración cruzada del modelo hidrológico.

El análisis morfométrico fue desarrollado a partir del modelo de elevación digital (DEM) de Colombia, derivado del SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) con resolución espacial de 30 × 30 metros, proporcionado por el IGAC para el año 2011. La información fue tratada mediante herramientas de sistemas de información geográfica (SIG), implementando rutinas de delimitación automática de cuencas, generación de redes de drenaje y cálculo de parámetros geométricos, topográficos e hidráulicos. A continuación, se presenta una tabla con los parámetros morfométricos obtenidos para las tres cuencas pivote seleccionadas y para la cuenca del río Túa, con el objetivo de analizar su similitud y evaluar su pertinencia como base para la transferencia de parámetros en el modelo hidrológico.

Tabla 2-7. Morfometría de las cuatro cuencas de estudio

Cauce	Río Túa	Río Cusiana	Río Cabuyarito	Río Charte
Perímetro (km)	290.02	358.78	145.00	108.50
Área (km²)	1640.45	3135.03	918.80	327.70
Altitud media (m)	358.83	971.37	251.39	1079.32
Cota mínima (m)	151.60	167.17	167.34	286.00
Cota máxima (m)	2459.50	3945.37	1003.11	2888.00
Longitud de cauce (km)	137.35	197.09	121.25	38.05
Cota máxima de cauce (m)	1854.00	3677.00	513.00	2492.00
Cota mínima de cauce (m)	157.00	168.00	173.00	290.00
Longitud axial (km)	89.30	115.08	44.26	27.90
Ancho de la cuenca (km)	18.37	27.24	20.76	11.75
Longitud de drenajes (km)	750.68	1393.69	522.01	176.25
Pendiente media del cauce (m/m)	0.0124	0.0178	0.0028	0.0578
Densidad de drenajes (km/km²)	0.46	0.44	0.57	0.54
Índice de Alargamiento (-)	4.86	4.22	2.13	2.38
Índice de compacidad (-)	2.00	1.79	1.34	1.68
Índice de forma (-)	0.09	0.08	0.06	0.23
Tc Kirpich (min)	955.63	1096.41	1536.62	196.27
Tc Témez (min)	728.73	894.58	878.60	204.87
Tc Johnstone (min)	975.15	1066.17	1327.44	348.89
Tc Giandotti (min)	670.00	657.82	1232.85	206.94
Tc Ventura - Heras (min)	694.09	849.76	834.78	198.42
Tc V. T. Chow (min)	1560.00	1748.76	2315.13	418.56

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEO PARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

Fuente. Aqualogs (2025)

La Tabla 2-7 proporciona parámetros clave para caracterizar hidrológicamente las cuencas de los ríos Túa, Cusiana, Cabuyarito y El Charte. Al observar los indicadores geométricos, altitudinales e hidrodinámicos, se pueden extraer conclusiones importantes sobre la dinámica de escorrentía y la similitud entre cuencas. En términos de área de drenaje, el río Túa (1640.45 km²) ocupa una posición intermedia entre Cusiana (3135.03 km², mucho mayor) y Cabuyarito (918.80 km²), mientras que El Charte es la cuenca más pequeña (327.70 km²). El ancho de cuenca también es mayor en Cusiana, lo cual está en línea con su mayor extensión. No obstante, la longitud del cauce del Túa (137.35 km) es considerable, indicando una red de drenaje bien desarrollada, comparable a la de Cabuyarito (121.25 km), aunque esta última tiene un área menor.

En cuanto a los parámetros altitudinales, la cuenca del Túa posee una altitud media baja (358.83 m), significativamente menor que Cusiana (971.37 m) y Charte (1079.32 m), y levemente superior a Cabuyarito (251.39 m). Esta característica es consistente con una topografía más plana, también confirmada por la pendiente media del cauce (0.0124 m/m). El Cabuyarito también presenta una pendiente muy baja (0.0028 m/m), lo que refuerza la similitud morfológica entre ambas cuencas en términos de pendiente, gradiente altitudinal y capacidad de almacenamiento natural.

En los índices morfométricos, el Túa tiene el mayor índice de alargamiento (4.86) y un índice de forma muy bajo (0.09), lo que indica una cuenca alargada y con mayor tiempo de concentración natural. Cabuyarito comparte estas características, con un índice de alargamiento intermedio (2.13) y un índice de forma aún menor (0.06), lo que refuerza su potencial similitud en términos de respuesta hidrológica amortiguada. A diferencia de Cusiana y Charte, que presentan geometrías más compactas y pendientes más fuertes, con una tendencia a generar respuestas más rápidas y concentradas.

Los tiempos de concentración estimados por varios métodos también reflejan esta similitud. El Túa presenta tiempos altos en todos los métodos (por ejemplo, Tc Chow: 1560 min), comparables a los de Cabuyarito (Tc Chow: 2315 min), lo cual indica procesos de escorrentía retardados, probablemente por la baja pendiente, alta capacidad de almacenamiento y mayor longitud de flujo. En cambio, El Charte presenta tiempos de concentración mucho menores (Tc Chow: 418.56 min), coherentes con su fuerte pendiente (0.06 m/m) y altitud media elevada.

2.3.2. Curvas hipsométricas

En la Figura 2-3 se presentan las curvas hipsométricas normalizadas correspondientes a las cuencas de estudio. Para su construcción, las cotas topográficas fueron reescaladas de manera que el valor máximo adoptara el valor adimensional de 1, el mínimo el valor de 0, y las altitudes intermedias fueran transformadas de forma lineal dentro de este intervalo. Este procedimiento de normalización permite la comparación directa entre cuencas con diferentes rangos altitudinales, resaltando las características relativas de la distribución hipsométrica. Dicho proceso se empleó de manera independiente a cada una de las cuatro cuencas consideradas en el análisis.

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEOPARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

La cuenca de El Charte (curva roja) presenta una pendiente más suave y extendida en el eje horizontal, lo que sugiere que gran parte de su superficie se encuentra a altitudes intermedias o bajas. Esta forma hipsométrica refleja una cuenca madurada geomorfológicamente, con topografía suavizada y menores gradientes.

En contraste, la cuenca de Cusiana (curva verde) muestra una forma más convexa, especialmente en los primeros tramos, indicando que una porción significativa del área se encuentra en zonas elevadas. Esto denota una cuenca más escarpada, con pendientes más pronunciadas y una mayor capacidad para generar escorrentía rápida, lo cual se traduce en una respuesta más intensa ante eventos extremos.

Las curvas correspondientes a Túa (azul) y Cabuyarito (naranja) se superponen en gran parte y presentan una forma cóncava moderada. Esto sugiere una distribución altitudinal relativamente homogénea, donde gran parte del área se concentra en altitudes medias y bajas. Estas cuencas tienen características topográficas que pueden facilitar una respuesta hidrológica intermedia, con escorrentías menos abruptas que Cusiana, pero más rápidas que El Charte.

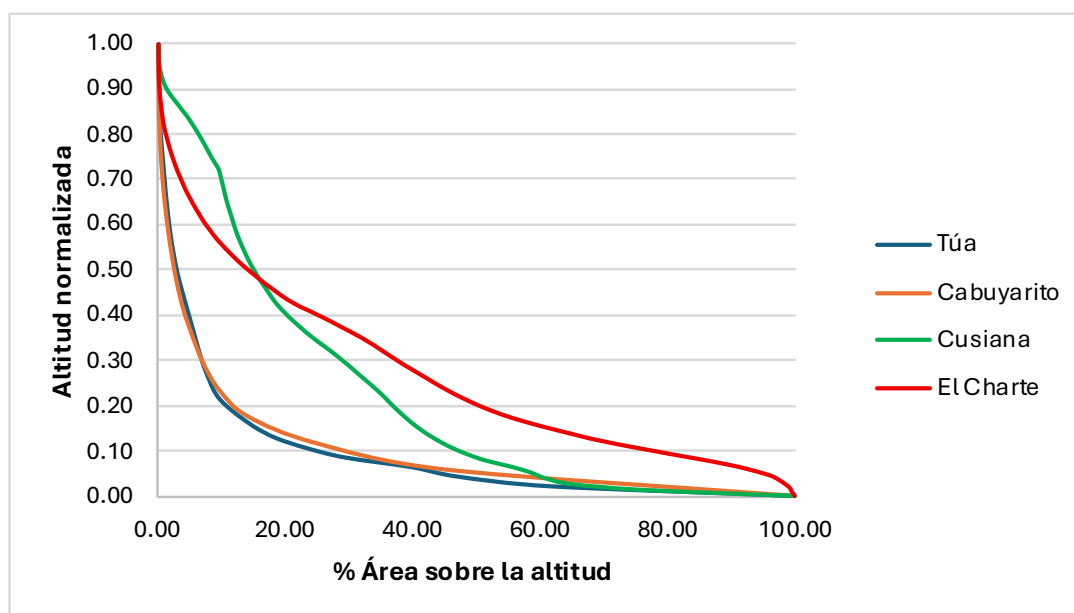


Figura 2-3. Curvas hipsométricas de las cuatro cuencas de estudio.

Fuente. Universidad de la Sabana (2025)

Con base en los parámetros morfométricos, altitudinales e hidráulicos, la cuenca del río Cabuyarito presenta la mayor similitud con la del río Túa. Ambas comparten una topografía plana, gradientes suaves, valores bajos de altitud media, índices de forma alargados y tiempos de concentración elevados, lo cual sugiere una dinámica hidrológica comparable. Esta similitud justifica el uso del Cabuyarito como cuenca apta para transferir parámetros de modelos hidrológicos calibrados hacia

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEO PARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

la cuenca del Túa, especialmente en análisis orientados a la simulación de caudales pico y procesos de encharcamiento.

2.3.3. Comportamiento por cobertura de la tierra y tipo de suelo

La identificación y análisis del tipo del suelo y la cobertura vegetal representan un componente esencial en la comprensión del comportamiento hidrológico de las cuencas. Estas variables determinan en gran medida procesos clave como la infiltración, la evapotranspiración y la generación de escorrentía. En regiones de topografía plana, como la que se presenta en el Bloque Llanos 34, las variaciones en la cobertura del suelo pueden alterar significativamente la dinámica superficial del agua. Para evaluar estos factores, se utilizó información geoespacial recopilada de fuentes oficiales (particularmente, de la plataforma *Colombia en Mapas*), siendo esta información sistematizada y categorizada mediante una metodología estructurada que facilitó la interpretación técnica de las coberturas.

Para la clasificación funcional de las coberturas del suelo se plantearon cinco categorías principales, llamadas grupos funcionales. Estas categorías se definieron de la siguiente manera:

1. Áreas urbanas o construidas: Incluye zonas urbanas, industriales, comerciales y áreas de infraestructura vial o de comunicación.
2. Zonas agrícolas: Comprende terrenos destinados al cultivo, pastoreo y otras formas de uso agropecuario.
3. Cobertura vegetal natural: Agrupa bosques, selvas y otras zonas con vegetación no intervenida por el ser humano.
4. Suelo desnudo o cobertura baja: Se refiere a terrenos sin vegetación significativa o con escasa cobertura vegetal, como áreas erosionadas o degradadas.
5. Zonas húmedas o cuerpos de agua: Incluye humedales, ríos, lagos y demás masas de agua superficiales.

Adicional, se tuvo en cuenta si algún registro no pudo ser clasificado en estas categorías debido a descripciones ambiguas o a información faltante, se etiquetó como “Otro” con el fin de no excluir información, pero tampoco introducirla en una categoría incorrecta. Las coberturas y tipos de suelo de las cuatro subcuencas se presentan en Figura 2-4.

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEO PARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

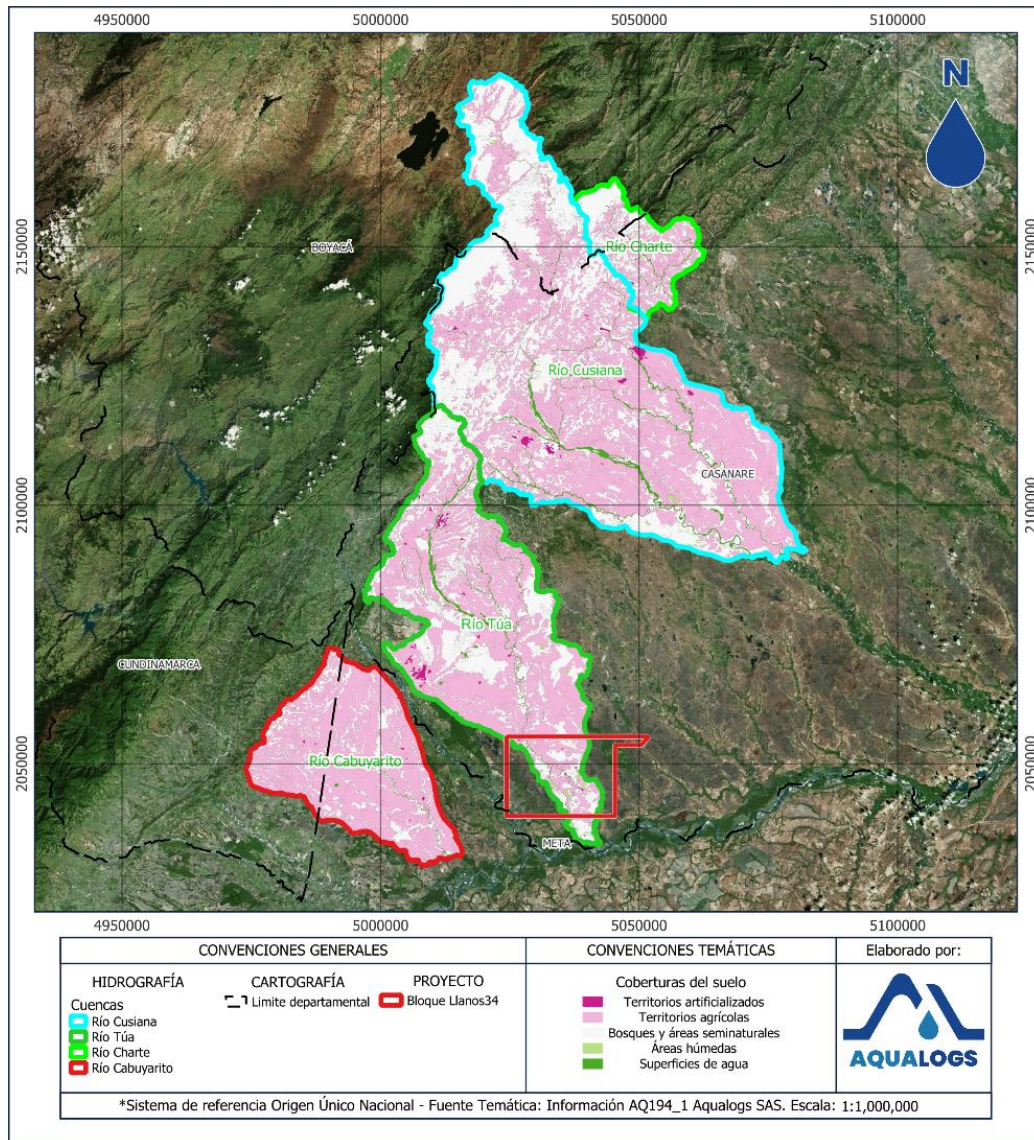
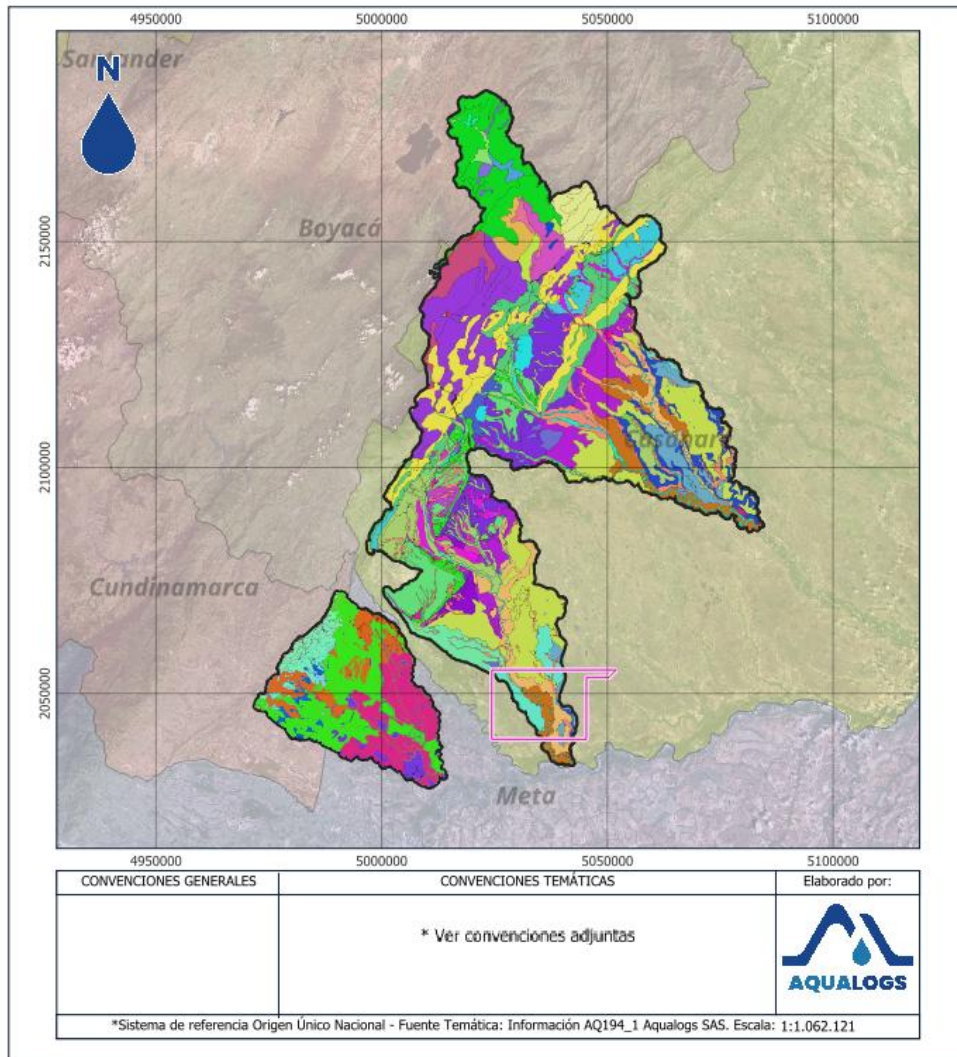


Figura 2-4. Coberturas del suelo

Fuente. Aqualogs (2025) a partir del IDEAM CorineLand Cover Nivel 1 (2024)

La caracterización de los tipos de suelo constituye un insumo fundamental para el análisis hidrológico, dado que sus propiedades físicas y texturales determinan la capacidad de infiltración, la retención de humedad y, en consecuencia, la magnitud y dinámica tanto de la escorrentía superficial como de la escorrentía subsuperficial. La información utilizada para este estudio se obtuvo del portal oficial Colombia en Mapas (<https://www.colombiaenmapas.gov.co>), el cual provee cartografía actualizada y de acceso público sobre los diferentes grupos de suelos presentes en el territorio nacional. Los tipos de suelo se muestran en la Figura 2-5.



Bloque Llanos 34 Cuencas Aluvial fino que alterna con aluvial grueso Aluvial fino y eólico limoso Arcillas y areniscas Arcillas y conglomerados Arcillolitas Arcillolitas y lodolitas Arcillolitas, lodolitas y areniscas Areniscas Areniscas y arcillolitas Areniscas y lutitas Areniscas, arcillolitas y lutitas Coluviones finos Cuerpo de agua Depósitos clásticos hidrográvenicos Depósitos clásticos hidrográvenicos Depósitos mixtos aluviales Depósitos mixtos aluviales y coluviales Depósitos superficiales clásticos hidrográvenicos Depósitos superficiales clásticos hidrográvenicos y grávenicos Depósitos superficiales de ceniza volcánica sobre rocas sedimentarias clásticas arenosas y limo arcillosas Depósitos superficiales de ceniza volcánica sobre rocas sedimentarias clásticas mixtas Depósitos superficiales piroclásticos de ceniza volcánica sobre rocas sedimentarias clásticas limo arcillosas Mantos pedregosos cubiertos por capas de materiales gruesos Materiales aluviales heterométricos con matriz gruesa Materiales arcillosos lutitas y areniscas		Tipos de suelo		Convenciones Materiales coluviales heterométricos con matriz gruesa Materiales coluvio aluviales gruesos y heterométricos en matriz media Materiales de origen coluvial heterométrico con matriz gruesa Materiales heterométricos con matriz gruesa Materiales limosos Materiales limosos y arenosos Recubrimiento eólico de limos y arenas Rocas clásticas arenosas con intercalaciones de limo arcillosas Rocas clásticas arenosas, limo arcillosas y depósitos de ceniza volcánica Rocas clásticas limo arcillosas Rocas clásticas limo arcillosas y arenosas Rocas clásticas limo arcillosas y químicas carbonatadas Rocas sedimentarias clásticas arenosas con intercalaciones de limo arcillosas Rocas sedimentarias clásticas limo arcillosas Rocas sedimentarias clásticas limo arcillosas con intercalaciones de arenosas Rocas sedimentarias clásticas limo arcillosas y depósitos superficiales clásticos grávenicos mixtos Rocas sedimentarias clásticas mixtas Sedimentos aluviales Sedimentos aluviales finos Sedimentos aluviales gruesos y medios Sedimentos aluviales heterométricos Sedimentos aluviales recientes Sedimentos aluviales recientes finos Sedimentos aluviales heterométricos en matriz gruesa Sedimentos finos aluviales que recubren depósitos de cantos y gravas medianamente alterados Sedimentos mixtos aluviales que recubren depósitos de cantos y gravas bastante alterados Zona urbana			
---	--	------------------------------	--	--	--	--	--

Figura 2-5. Tipos del suelo

Fuente. Aqualogs (2025)

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEO PARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

Sobre la base de esta información, se llevó a cabo un análisis porcentual de cada clase en el interior de las cuencas y se asociaron los valores correspondientes de tipo de suelo e hidrología del terreno (Grupo Hidrológico del Suelo, HSG), lo que permitió estimar un número de curva (Curve Number, CN) representativo para cada subcuenca. Este valor fue obtenido aplicando la metodología propuesta por el Soil Conservation Service (SCS), que vincula el tipo de cobertura, el uso del suelo y el grupo hidrológico del mismo para cuantificar la capacidad de retención de agua antes del inicio de la escorrentía.

Con lo cual, los valores resultantes fueron: Cabuyarito = 71.0, Cusiana = 75.6, El Charte = 68.7 y Túa = 71.5. Como se observa en la Figura 2-6. (Ver Anexo 1. Localización)

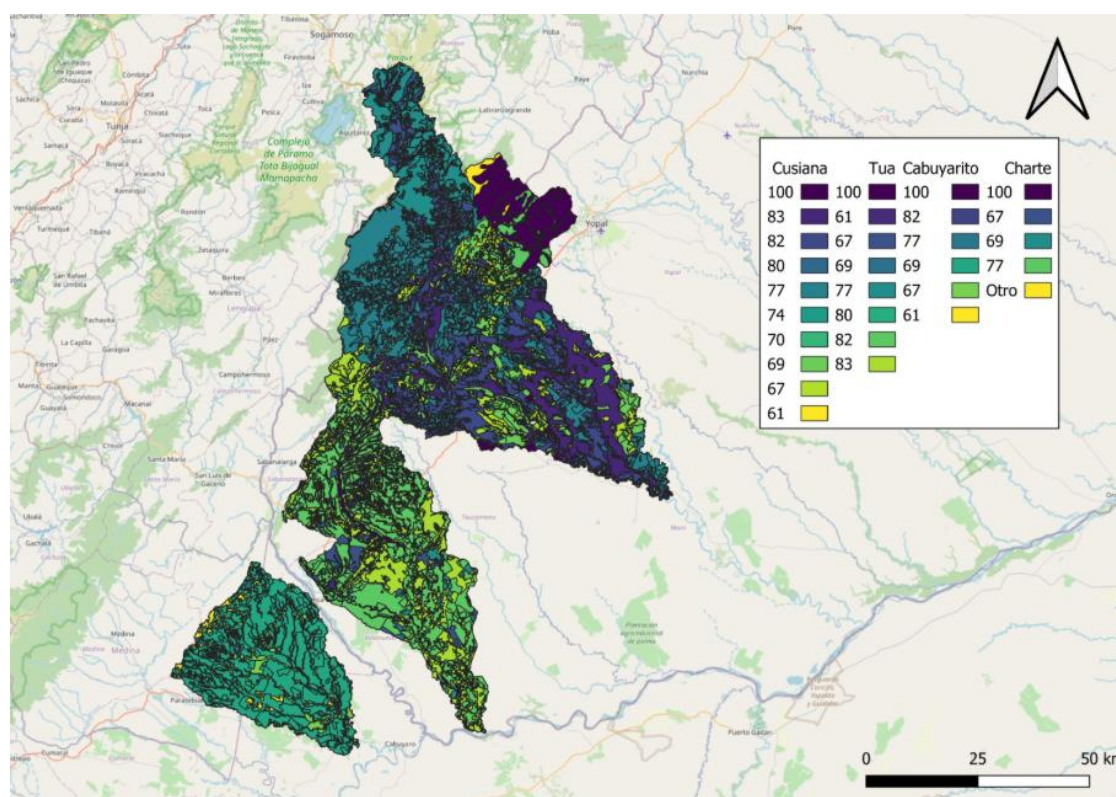


Figura 2-6. Número de curva

Fuente. Aqualogs (2025)

La comparación muestra que las cuatro cuencas presentan diferencias máximas inferiores a 7 unidades de CN (aún dentro del rango que la NRCS (Natural Resources Conservation Service de los Estados Unidos) considera hidrológicamente equiparable las cuencas de Cabuyarito y Túa, con una diferencia de 0.5 unidades. Esta proximidad sugiere que comparten condiciones de infiltración y escorrentía muy similares ($CN \approx 70$ indica un potencial de escorrentía moderado sobre suelos de tipo hidrológico B-C con coberturas predominantemente agrícolas). Por lo tanto, los resultados respaldan la extrapolación de parámetros hidrológicos, especialmente desde la cuenca Cabuyarito

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEO PARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

hacia la del río Túa, sin introducir sesgos significativos en la simulación de respuesta hidrológica a eventos de lluvia.

3. Análisis de datos climatológicos

En el presente capítulo se desarrolla el análisis climatológico correspondiente a las cuencas hidrográficas consideradas en la modelación hidrológica del estudio. Este análisis constituye un insumo técnico fundamental para la estructuración del modelo hidrológico, orientado a la estimación de caudales en los cuerpos de agua localizados dentro del área objeto de modelación. Adicionalmente, se incorpora la evaluación climatológica de las cuencas piloto descritas en el capítulo precedente.

El análisis se basa en una evaluación estadística de las series de datos meteorológicos disponibles, con el objetivo de identificar y seleccionar estaciones que cumplan con criterios de calidad de datos, consistencia interna y representatividad espacial y temporal.

3.1. Marco teórico

En los numerales siguientes se presenta el fundamento teórico de las herramientas metodológicas empleadas en el tratamiento y análisis de la información climatológica correspondiente al área de estudio. Estas herramientas comprenden el análisis de valores faltantes, la evaluación de la homogeneidad de las series temporales, la detección de valores atípicos y los métodos de imputación utilizados para el completado de datos.

3.1.1. Valores faltantes

En estadística, los datos faltantes ocurren cuando no se almacena ningún valor para la variable observada. Los datos faltantes son una ocurrencia común y pueden tener un efecto significativo en las conclusiones que se pueden extraer de los datos. Los valores faltantes pueden ocurrir debido a mantenimientos, suspensión o fallas en el instrumento de medición. Comprender las razones por las que faltan datos es importante para manejar correctamente la información restante. Si faltan valores completamente al azar, es probable que la muestra de datos siga siendo representativa de la población. En caso de vacíos sistemáticos, el análisis puede estar sesgado (Scikit-learn, s.f).

3.1.2. Correlación

A continuación, se describen los diferentes coeficientes de correlación que serán evaluados como parte del análisis de la información climatológica.

3.1.2.1. Correlación de Pearson

Es una medida de correlación lineal entre dos conjuntos de datos. Es el cociente entre la covarianza de dos variables y el producto de sus desviaciones estándar, por lo tanto, es esencialmente una

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEO PARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

medida normalizada de la covarianza de modo que el resultado siempre tiene un valor entre -1 y 1. Un valor absoluto de 1 indica una relación lineal perfecta. Una correlación cercana a 0 indica que no hay relación lineal entre las variables. El signo del coeficiente indica la dirección de la relación (directa o inversa). La Ecuación 3-1 muestra la forma de calcular esta correlación entre dos series de tiempo.

Ecuación 3-1. Cálculo de correlación de Pearson

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

Donde x es la serie de tiempo 1 mientras que la variable y es la serie de tiempo 2

3.1.2.2. Correlación de Kendall Tau

El coeficiente de correlación de rango de Kendall es una estadística utilizada para medir la asociación ordinal entre dos cantidades. Este coeficiente no asume ninguna distribución para los valores, por lo que forma parte de los métodos de correlación de rango sin distribución o correlación no paramétrica. Los valores de Kendall varían de -1 a 1. Su interpretación es similar a la del coeficiente Pearson, por ejemplo, un valor negativo indica que las variables están inversamente relacionadas. La Ecuación 3-2, muestra la forma de calcular este valor entre dos series de tiempo.

Ecuación 3-2. Calculo Kendall Tau

$$\tau = \frac{P - Q}{\sqrt{(P + Q + T) * (P + Q + U)}}$$

Donde P es el número de pares concordantes, Q es el número de pares discordantes, T el número de empates en la serie de tiempo 1 y U el número de empates en la serie de tiempo 2.

3.1.2.3. Correlación de Spearman

La correlación de orden de rango de Spearman es la versión no paramétrica de la correlación producto-momento de Pearson; mientras que la correlación de Pearson evalúa las relaciones lineales, la correlación de Spearman evalúa las relaciones monótonas (ya sean lineales o no). Si no hay valores de datos repetidos, se produce una correlación de Spearman perfecta de +1 o -1. La Ecuación 3-3 muestra la forma de calcular esta correlación entre dos series de tiempo.

Ecuación 3-3. Calculo correlación de Spearman

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n D_i^2}{n(n^2 - 1)}$$

Donde D_i es la diferencia entre el par de la variable 1, variable 2 o la diferencia entre los rangos de las variables y n es el número de pares de coordenadas.

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEO PARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

3.1.3. Prueba de homogeneidad

La prueba de homogeneidad es una herramienta estadística que permite evaluar si un conjunto de datos ha mantenido un mismo comportamiento a lo largo del tiempo o, por el contrario, ha experimentado un cambio significativo. En una serie temporal, dicho cambio suele asociarse a alteraciones en la distribución de los datos, lo cual puede estar relacionado con procesos físicos o condiciones externas (Mallakpour & Villarini, 2015).

En este trabajo se emplea la prueba de Pettitt, un método no paramétrico ampliamente utilizado para identificar un único punto de cambio en series hidrológicas y climáticas. Su lógica consiste en que, si la serie ha mantenido un comportamiento homogéneo, entonces no deberían observarse diferencias sistemáticas entre los datos tempranos y los tardíos. Si existe un cambio real, en cambio, ambos grupos deberían diferir de manera visible.

Formalmente, la prueba contrasta dos hipótesis:

- H_0 (hipótesis nula): no existe cambio en la distribución de la serie;
- H_1 (hipótesis alternativa): sí ocurre un cambio en algún instante t .

El procedimiento interno se basa en comparar todos los pares posibles de valores dentro de la serie utilizando el enfoque de dos muestras de Mann–Whitney. Primero, se evalúa para cada par (X_i, X_j) si uno es mayor, igual o menor que el otro (Ecuación 3-4). Luego, se acumulan todas estas comparaciones para distintos posibles puntos de división dentro de la serie, con lo cual se construye el estadístico $U(t, T)$ (Ecuación 3-5).

Ecuación 3-4. Prueba de dos muestras de Mann-Whitney

$$D_{ij} = \text{sgn}(X_i - X_j) = \begin{cases} -1 & (X_i - X_j) < 0 \\ 0 & (X_i - X_j) = 0 \\ +1 & (X_i - X_j) > 0 \end{cases}$$

Donde D_{ij} es la prueba de dos muestras de Mann-Whitney X_i y X_j son variables con X_i siguiendo a X_j en el tiempo.

Ecuación 3-5. Parámetro Mann-Whitney para analizar cuándo las dos muestras provienen de la misma serie

$$U_{t,T} = \sum_{i=0}^t \sum_{j=t+1}^T D_{ij}$$

Donde el parámetro estadístico $U_{t,T}$ es igual al parámetro Mann-Whitney para analizar cuándo las dos muestras X_0 a X_t y X_{t+1} a X_T provienen de la misma serie.

Al recorrer la serie punto por punto, se identifica aquel instante donde la diferencia entre ambos segmentos (antes y después) es mayor. Ese valor máximo se denomina K_T (Ecuación 3-6), y representa el cambio más marcado.

Ecuación 3-6. Punto de cambio

$$K_T = \max_1 \leq t < T | U_{t,T} |$$

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEOARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

Donde K_T es el punto de cambio máximo de las series, $U_{t,T}$ es el parámetro estadístico Pettitt y t es el tiempo donde ocurre el cambio máximo.

Posteriormente, se calcula el valor de significancia ρ (p-value) (Ecuación 3-7), que permite determinar si el cambio observado es suficientemente inusual como para considerarlo real. Si este valor es inferior al nivel de significancia, se rechaza la hipótesis nula. Bajo esta circunstancia, la serie se interpreta como no homogénea y se divide en dos subseries (una antes y otra después del punto de cambio), asumiendo que siguen distribuciones potencialmente diferentes. Las bases matemáticas completas, así como detalles adicionales como el uso de simulaciones de Monte Carlo para la estimación del valor ρ , pueden consultarse en la publicación original de Pettitt (1979), donde se discuten los fundamentos teóricos del método con mayor profundidad.

Ecuación 3-7. Cálculo del p-value

$$\rho = 2 \exp\left(\frac{-6K_T^2}{T^2 + T^3}\right)$$

Donde ρ es el valor de la prueba Pettitt, K_T es el punto de cambio máximo de la serie y T la cantidad de datos en la estación.

3.1.4. Análisis de valores atípicos

Al trabajar con información cruda proveniente de registros observacionales, es importante considerar que diversas fuentes de incertidumbre pueden afectar la calidad de las mediciones, tales como variaciones en los mecanismos de recolección, modificaciones en las metodologías de toma de datos, entre otros factores. En este sentido, resulta necesario identificar y depurar aquellos registros que puedan comprometer la representatividad de las series, con el fin de evitar un incremento en los niveles de incertidumbre asociados a los análisis posteriores.

Por lo anterior, se plantea la detección y eliminación de valores atípicos dentro de las series de tiempo analizadas. Existen múltiples metodologías para este propósito, las cuales, a partir de parámetros estadísticos asociados al conjunto de datos, permiten establecer valores límite esperados y descartar aquellos registros que se encuentren por fuera de dichos rangos.

En el presente estudio se aplican dos metodologías complementarias para la identificación de estos valores límite, seleccionadas en función de los objetivos planteados para los modelos hidrológicos: por un lado, la representación del comportamiento a largo plazo de las cuencas en relación con los flujos medios, y por otro, la caracterización de la respuesta hidrológica a corto plazo frente a eventos de tormenta.

3.1.4.1. Determinación de los valores atípicos – Análisis de tormentas

Para la determinación de los valores atípicos en una serie de precipitación se empleará el método propuesto por el Water Resources Council (Chow, 1994). Dicho procedimiento establece un criterio estadístico basado en la definición de un valor límite de aceptación, el cual se determina a partir del promedio aritmético de los valores observados, la desviación estándar de la serie y el número total

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEOPARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

de datos disponibles. De esta forma, aquellos registros que excedan los límites calculados son considerados valores atípicos, susceptibles de verificación y depuración para garantizar la consistencia y representatividad de la información utilizada en los análisis hidrológicos posteriores.

La Ecuación 3-8 corresponde a la formulación empleada para el cálculo del límite estadístico de identificación de valores atípicos en la serie analizada.

Ecuación 3-8. Umbral de valores atípico

$$Y_H = \bar{y} + Kn * S_y$$

Donde Y_h es el valor del umbral a usar, $\bar{y}$ es el valor promedio de la serie de tiempo, Kn es un valor dependiente de la longitud de la serie de tiempo propuesto para el método y S_y es la desviación estándar de la serie de tiempo. Estos valores serán los resultados de aplicar el logaritmo en base 10 a la serie de tiempo. Finalmente, para el cálculo del umbral real, valor de Y_h será recalculado para tener la conversión de los datos realizado previamente.

3.1.4.2. Determinación de los valores atípicos – Análisis a largo plazo

Para la identificación de los valores atípicos en las series utilizadas en el análisis a largo plazo, se empleó el método propuesto por Tukey (Tukey, 1977). Dicho enfoque establece la clasificación de los valores atípicos en dos categorías: atípicos cercanos (mild outliers) y atípicos lejanos (extreme outliers). En el presente estudio se adopta la versión correspondiente a los atípicos lejanos, debido a su mayor rigurosidad en la detección de valores extremos en series hidrológicas.

El método se fundamenta en estadísticos no paramétricos derivados de la distribución de los datos, particularmente en el cálculo de los percentiles y del rango intercuartílico (IQR). A partir de estos, se definen límites superiores que permiten discriminar los valores que se consideran como atípicos.

En la Ecuación 3-9 se presenta la ecuación utilizada para el cálculo del límite de identificación de valores atípicos en las series analizadas.

Ecuación 3-9. Umbral de valores atípicos

$$Lim_{sup} = P_{75} + 3.0 * IQR$$

Donde Lim_{sup} es el valor del límite superior, P_{75} es el valor del percentil 75 de la serie de tiempo e IQR es el valor del rango intercuartílico de la serie de tiempo.

3.1.5. Imputación de datos

Posterior al análisis de las series de tiempo de carácter climatológico, en el presente informe se desarrolla el proceso de imputación de información. Este procedimiento tiene como finalidad completar los vacíos presentes en las series temporales a partir de la información proveniente de observaciones cercanas, garantizando la continuidad de los registros.

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEO PARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

Es importante destacar que la imputación de datos se justifica en este estudio, debido a que los procesos asociados a la modelación hidrológica requieren series completas y consistentes para su adecuada implementación. En este contexto, se aplicaron dos enfoques de imputación: imputación espacial, basada en la información de estaciones vecinas, e imputación intertemporal, basado en los datos de la misma estación.

La imputación realizada corresponde a la interpolación de datos mediante el método de ponderación inversa de la distancia (IDW, por sus siglas en inglés) constituye una técnica de interpolación determinística ampliamente utilizada en estudios hidrológicos y climatológicos para completar series de tiempo y superficies de información espacial. El principio fundamental de este método radica en que la influencia de una estación en la estimación de un valor ausente disminuye con la distancia, de manera que los registros de estaciones más cercanas adquieren un mayor peso en el cálculo. Formalmente, el valor estimado se obtiene como un promedio ponderado de las observaciones disponibles, donde los pesos son inversamente proporcionales a la distancia (Shepard, 1968).

A continuación, se presenta la ecuación de utilizada para la imputación de datos.

Ecuación 3-10. IDW (Inverse Distance Weighting)

$$Y_n = \frac{\sum_i \frac{Y_i}{d_i}}{\sum_i \frac{1}{d_i}}$$

Donde Y_n es el valor interpolado obtenido, d_i es la distancia entre la estación i y la estación donde se realiza la interpolación e Y_i es el valor de la variable en la estación i .

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEO PARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

3.2. Variables hidrológicas

Este componente metodológico contempla la recopilación de series temporales hidroclimatológicas (precipitación) a partir de estaciones ubicadas en el área objeto de estudio y en cuencas pivote con características representativas. La calidad de estas series es evaluada mediante procedimientos de control que incluyen la cuantificación de valores faltantes, la detección de anomalías estadísticas y la aplicación de pruebas de homogeneidad. La Figura 3-1 ilustra la ruta metodológica seguida para este proceso.

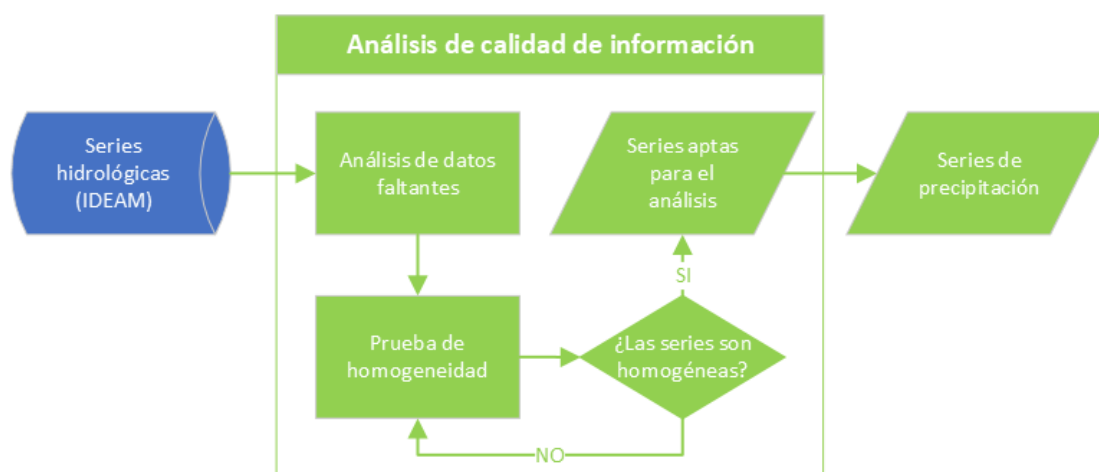


Figura 3-1. Flujo del proceso de datos.

Fuente. Aqualogs (2025)

El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) es el ente encargado de recopilar, procesar, interpretar y hacer públicos los datos hidrológicos y meteorológicos en Colombia. Esta información se encuentra disponible en el aplicativo web DHIME del IDEAM. Para el área de estudio y las cuencas pivote se descargó la información de precipitación mostrada en la Figura 3-2) y en la Tabla 3-1 se presentan las respectivas estaciones.

Tabla 3-1. Estaciones climatológicas en el área de trabajo.

Código de la estación	Nombre de la estación	Tipo	Responsable	Altitud (m.s.n.m)	Coordenadas MAGNA-SIRGA_CTM12	
					Este	Norte
35215020	AEROPUERTO YOPAL - AUT	Climatológica Principal (CP)	IDEAM	325	5067838.35	2145933.74
35195030	AGUAZUL	Climatológica Ordinaria (CO)	IDEAM	380	5050140.64	2130077.29
35025040	BAMBU EL	Agrometeorológica (AM)	IDEAM	220	4979659.98	2012893
35100020	CABUYARO	Pluviómetro (PM)	IDEAM	180	5023293.74	2030940.83
35080030	CAMP BUENAVISTA	Pluviómetro (PM)	IDEAM	1370	4990393.04	2130793.64
35085050	CAMPOHERMOSO	Climatológica Ordinaria (CO)	IDEAM	1300	4988513.29	2114305.64
35090060	CAZADERO	Pluviómetro (PM)	IDEAM	1725	5001846.02	2141799.54
35190030	CHAMEZA	Pluviográfica (PG)	IDEAM	180	5010757.48	2133077.37
35210050	CHAPARRERA LA	Pluviográfica (PG)	IDEAM	395	5085330.19	2164898.91
35190010	CINTAS LAS	Pluviográfica (PG)	IDEAM	3400	5014649.37	2178353.8

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico				 GEO PARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR		
Código: AQ194		Versión: 02		Cliente		

35195050	CORINTO	Climatológica Ordinaria (CO)	IDEAM	1550	5031314.58	2155502.09
24030760	CRUCERO EL VILLITA	Pluviómetro (PM)	IDEAM	3225	5009224.74	2180473.72
21201910	CRYOGAS EL RUBI	Pluviómetro (PM)	IDEAM	2700	4968579.66	2051568.92
35090110	DON ANTONIO	Pluviómetro (PM)	IDEAM	324	4999730.63	2083506.76
35180030	FUNDO NUEVO HUMAPO	Pluviómetro (PM)	IDEAM	155	5067659.47	2036489.45
35090070	GUAMO DE SISBACA	Pluviómetro (PM)	IDEAM	2575	5009228.84	2151008.09
35045020	HACIENDA LA CABAÑA	Climatológica Ordinaria (CO)	IDEAM	305	4960346.07	2033205.87
35187010	LA POYATA	Limnimétrica (LM)	IDEAM	148	5094002.28	2048872.83
35060140	LAS PALOMAS	Pluviómetro (PM)	IDEAM	23	4950679.96	2077903.51
35050010	MEDINA	Pluviómetro (PM)	IDEAM	480	4961189.16	2056360.21
35210040	MOLINOS D CASANARE	Pluviográfica (PG)	IDEAM	330	5077705.93	2156199.61
35210010	MORRO EL	Pluviómetro (PM)	IDEAM	656	5060210.55	2160580.21
35070170	NAZARETH	Pluviómetro (PM)	IDEAM	400	4977829.23	2081030.85
35030050	OJO DE AGUA	Pluviómetro (PM)	IDEAM	300	4950208.1	2010083.97
35080050	PAEZ	Meteorológica (ME)	IDEAM	1350	4994103.32	2121140.28
35190050	PAJARITO	Pluviómetro (PM)	IDEAM	842	5033012.04	2143974.38
35080080	PIEDRA CAMPANA	Pluviómetro (PM)	IDEAM	450	4974055.74	2095070.97
35160010	POTRERITO AUT	Pluviómetro (PM)	IDEAM	347	5005690.08	2163263.52
35180010	PRADERA LA	Pluviómetro (PM)	IDEAM	180	5037026.55	2103580.74
35010010	PUERTO LOPEZ	Pluviómetro (PM)	IDEAM	182	5007045.13	2011604.94
35020070	SALADOS LOS	Pluviómetro (PM)	IDEAM	182	4983358.18	2012892.22
35190070	SAN JOSE	Pluviómetro (PM)	IDEAM	190	5059986.82	2120674.11
35050020	SAN JUANITO	Pluviómetro (PM)	IDEAM	426	4956085.8	2046774.29
35080070	SAN LUIS DE GACENO	Pluviómetro (PM)	IDEAM	400	4981172.61	2090581.55
35070180	SANTA MARIA	Pluviográfica (PG)	IDEAM	850	4971543.52	2095114.86
35060250	SANTA ROSA DE UBALA	Pluviómetro (PM)	IDEAM	1649	4954864.79	2088051.27
35190040	TAMARINDO	Pluviómetro (PM)	IDEAM	290	5050523	2111562.99
35195020	TAURAMENA	Meteorológica (ME)	IDEAM	460	5014422.26	2113505.94
35195060	TOQUILLA - AUT	Climatológica Ordinaria (CO)	IDEAM	2950	5023143.06	2168353.23
35090050	VISTA HERMOSA	Pluviómetro (PM)	IDEAM	1200	4994490.31	2110879.61
35210020	YOPAL	Pluviómetro (PM)	IDEAM	320	5066450.67	2149198.31

Fuente. Aqualogs (2025)

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

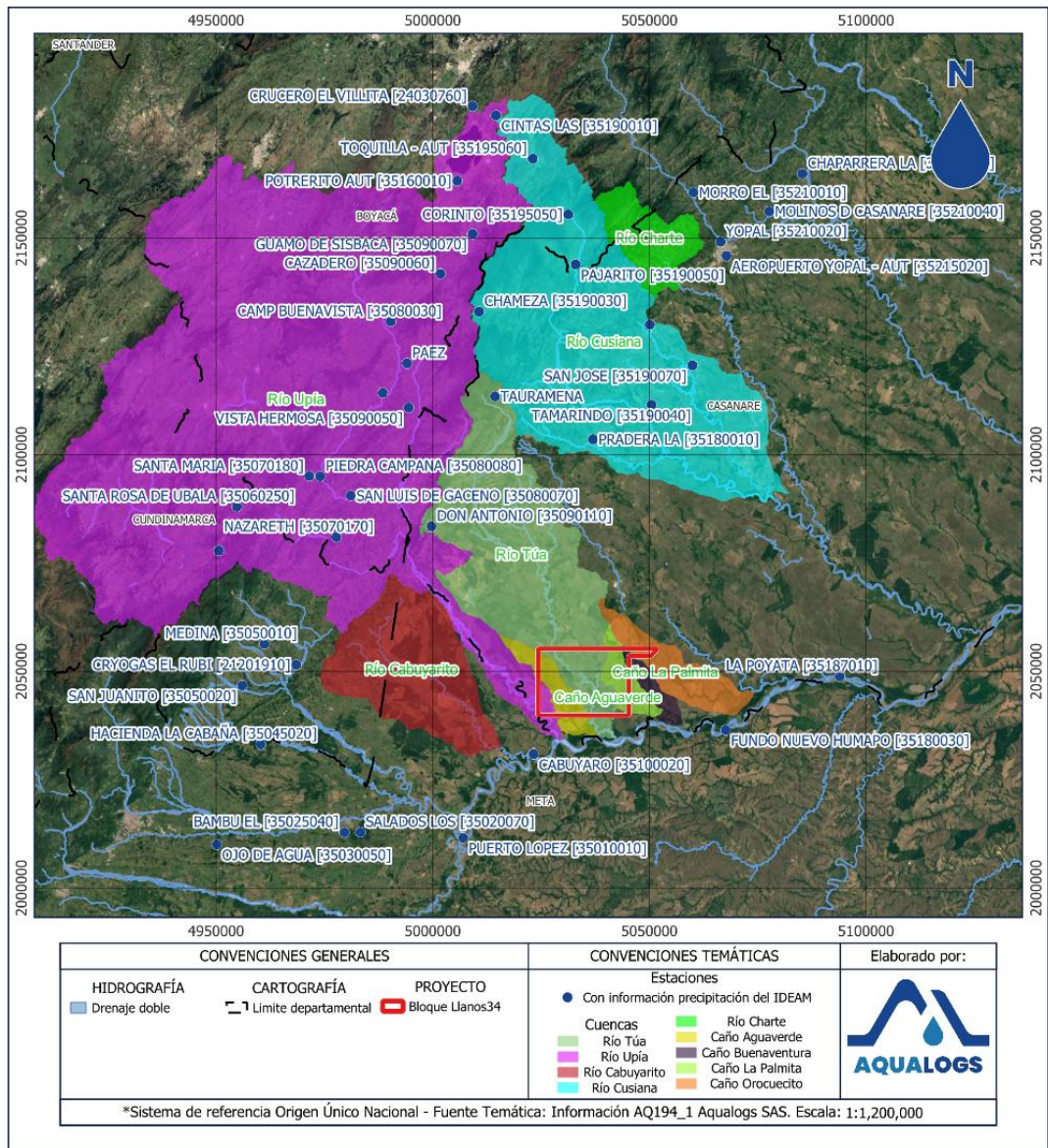


Figura 3-2. Estaciones con información precipitación del IDEAM.

Fuente. Aqualogs (2025)

Las estaciones se presentan en el Anexo 2 Climatología

3.3. Resultados

Los análisis realizados sobre la variable de clima se presentan en este numeral. El fin de esta información es la generación de tormentas de diseño que representen los eventos máximos de precipitación que pueden ocurrir en el área de estudio y que originarán los máximos caudales de escorrentía.

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEO PARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

3.3.1. Valores faltantes

La siguiente tabla presenta las estaciones de precipitación, el porcentaje de datos faltantes asociado a cada una, y las cuencas hidrográficas asociadas. En el numeral 3.3.3 se presentan las estaciones efectivamente seleccionadas.

Tabla 3-2. Análisis de datos faltantes de todas las estaciones.

ESTACIÓN	CÓDIGO	PROCENTAJE DATOS FALTANTES [%]	ÁREA DE ESTUDIO	CUENCAS PIVOTE		
			CUENCA RÍO TÚA	CUENCA RÍO CUSIANA	CUENCA RÍO CABUYARITO	CUENCA RÍO CHARTE
SAN JOSE [35190070]	35190070	38.60%	X	X		X
CAZADERO [35090060]	35090060	13.60%	X	X		
NAZARETH [35070170]	35070170	12.80%	X		X	
DON ANTONIO [35090110]	35090110	39.30%	X		X	
PUERTO LOPEZ [35010010]	35010010	3.20%	X		X	
SAN LUIS DE GACENO [35080070]	35080070	5.50%	X			
PRADERA LA [35180010]	35180010	9.20%	X	X		
BAMBU EL [35025040]	35025040	99.50%	X		X	
SALADOS LOS [35020070]	35020070	69.10%	X		X	
PIEDRA CAMPANA [35080080]	35080080	1.70%	X			
SANTA MARIA [35070180]	35070180	6.10%	X			
CAMPOHERMOSO [35085050]	35085050	19.50%	X			
LA POYATA [35187010]	35187010	16.40%	X			
TAMARINDO [35190040]	35190040	28.40%	X	X		
VISTA HERMOSA [35090050]	35090050	11.80%	X			
CHAMEZA [35190030]	35190030	3.20%	X	X		X
AGUAZUL [35195030]	35195030	16.20%	X	X		X
CAMP BUENAVISTA [35080030]	35080030	3.40%	X	X		
FUNDO NUEVO HUMAPO [35180030]	35180030	12.70%	X			
CABUYARO [35100020]	35100020	1.80%	X		X	
PAEZ [35080050]	35080050	4.30%	X			
TAURAMENA [35195020]	35195020	17.40%	X			X
POTRERITO AUT [35160010]	35160010	5.90%		X		
TOQUILLA - AUT [35195060]	35195060	3.80%		X		
PAJARITO [35190050]	35190050	42.50%		X		X

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEO PARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

ESTACIÓN	CÓDIGO	PROCENTAJE DATOS FALTANTES [%]	ÁREA DE ESTUDIO	CUENCAS PIVOTE		
			CUENCA RÍO TÚA	CUENCA RÍO CUSIANA	CUENCA RÍO CABUYARITO	CUENCA RÍO CHARTE
GUAMO DE SISBACA [35090070]	35090070	18.20%		X		X
CORINTO [35195050]	35195050	15.50%		X		X
CINTAS LAS [35190010]	35190010	5.20%		X		
CRUCERO EL VILLITA [24030760]	24030760	51.10%		X		
LAS PALOMAS [35060140]	35060140	2.80%			X	
OJO DE AGUA [35030050]	35030050	9.60%			X	
HACIENDA LA CABAÑA [35045020]	35045020	71.50%			X	
SANTA ROSA DE UBALA [35060250]	35060250	3.80%			X	
CRYOGAS EL RUBI [21201910]	21201910	91.00%			X	
SAN JUANITO [35050020]	35050020	0.80%			X	
MEDINA [35050010]	35050010	2.10%			X	
AEROPUERTO YOPAL - AUT [35215020]	35215020	10.10%				X
YOPAL [35210020]	35210020	72.20%				X
MOLINOS D CASANARE [35210040]	35210040	43.30%				X
MORRO EL [35210010]	35210010	4.10%				X
CHAPARRERA LA [35210050]	35210050	38.70%				X

Fuente. Aqualogs (2025)

Se realizaron gráficos de dispersión con la cantidad de valores faltantes anuales por estación pluviométrica de cada una de las cuencas. A partir de esta información, es posible descartar estaciones que cuenten con un gran número de valores faltantes (≥ 200) y que además tengan varios años (≥ 10) con valores perdidos o faltantes. A continuación, en las siguientes figuras se presenta este análisis de vacíos de datos para todas las estaciones. En el numeral 3.3.3 se indican las estaciones efectivamente seleccionadas. .

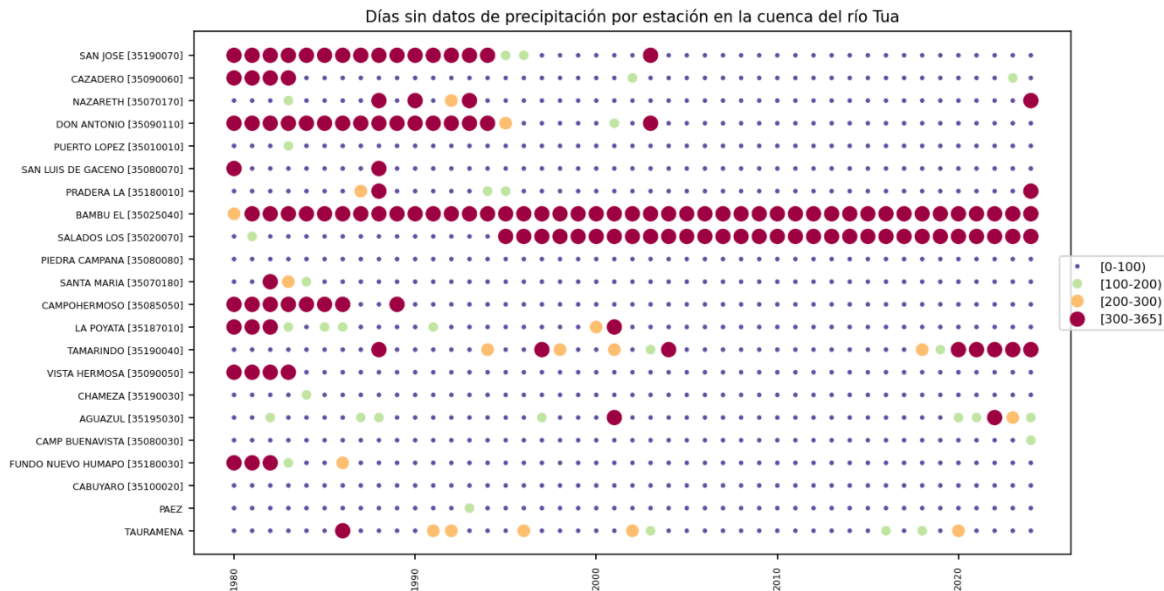


Figura 3-3. Análisis de vacíos en las estaciones en el área de estudio.

Fuente. Aqualogs (2025)

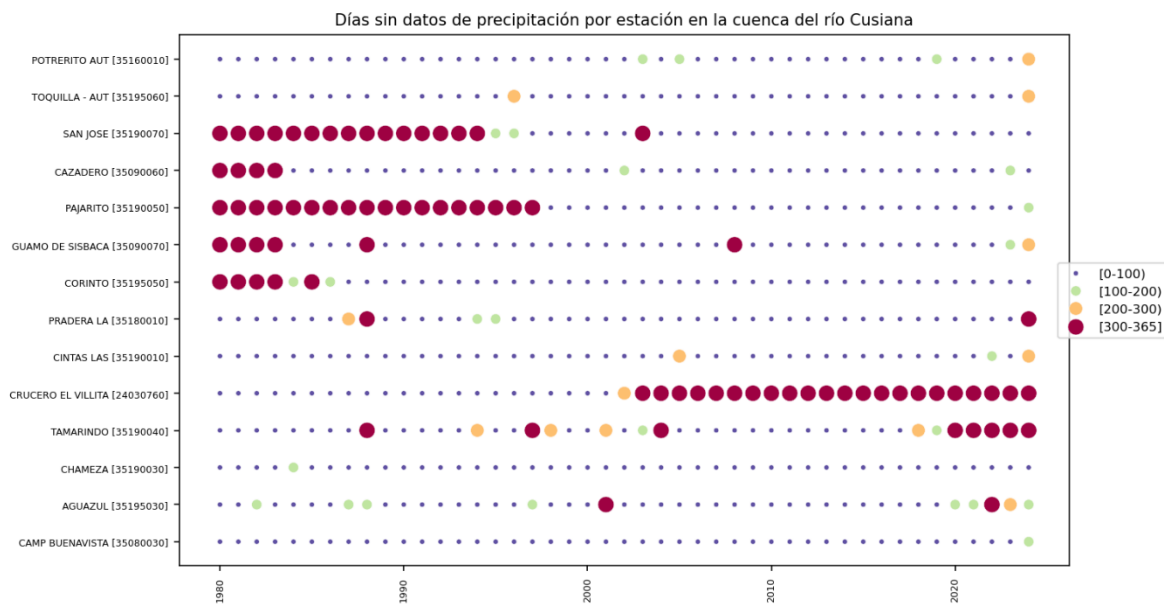


Figura 3-4. Análisis de vacíos en las estaciones en la cuenca del río Cusiana.

Fuente. Aqualogs (2025)

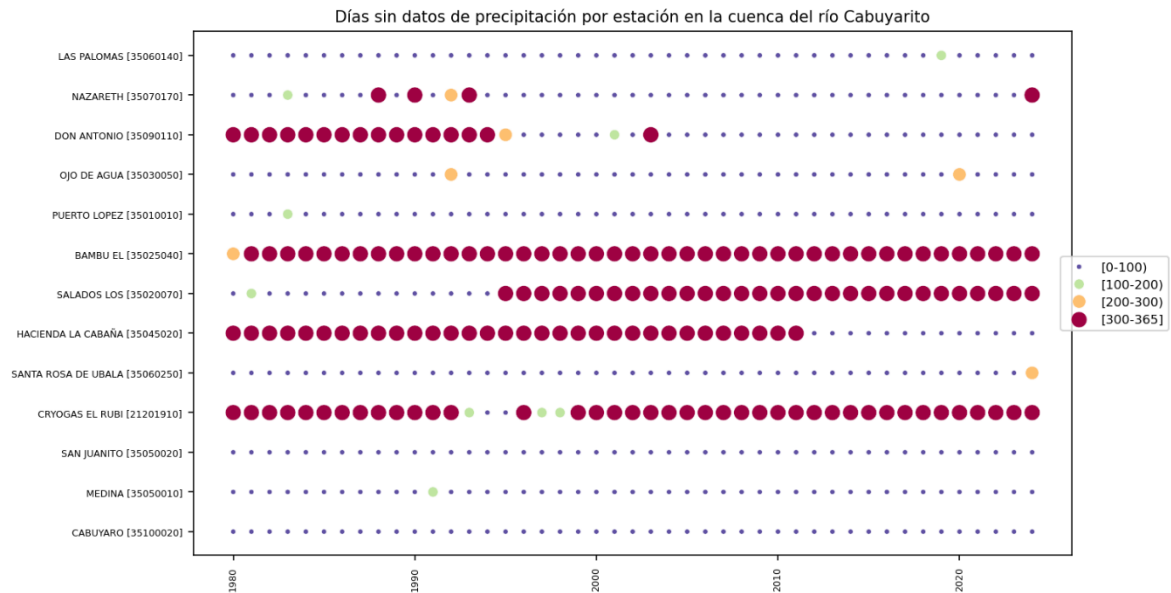


Figura 3-5 Análisis de vacíos en las estaciones en la cuenca del río Cabuyarito.

Fuente. Aqualogs (2025)

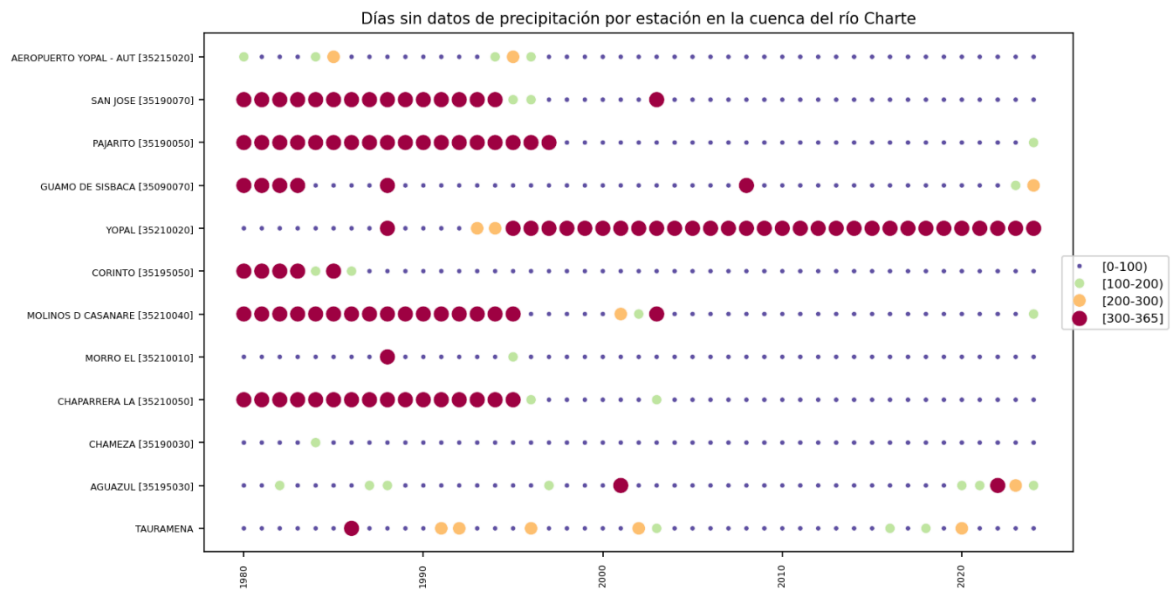
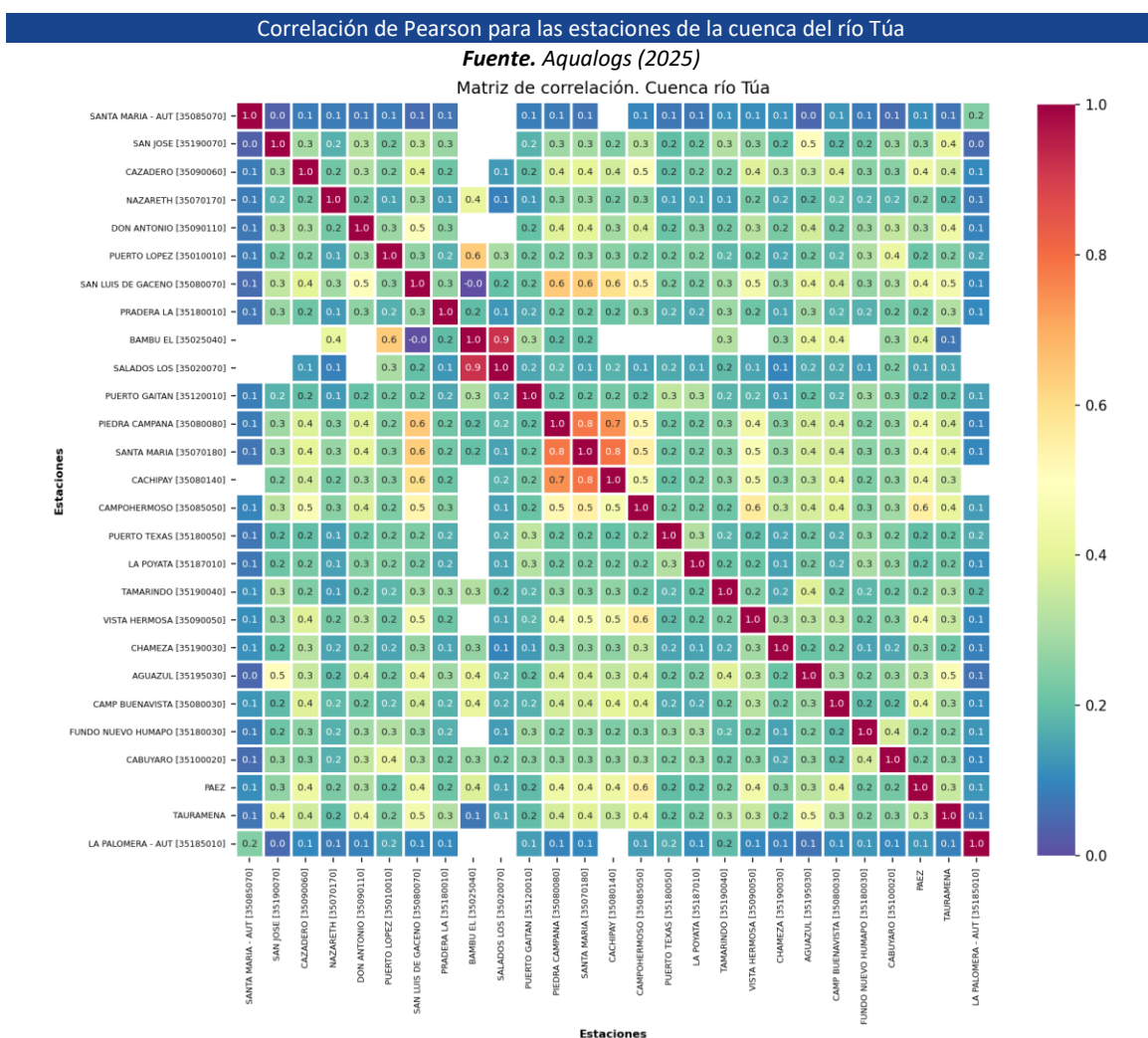


Figura 3-6. Análisis de vacíos en las estaciones en la cuenca del río Charte.

Fuente. Aqualogs (2025)

3.3.1. Correlación de las series de tiempo

El presente capítulo expone las matrices de correlación calculadas entre las estaciones hidrometeorológicas seleccionadas, tanto para el dominio general del estudio como para las cuencas de referencia. Los resultados se presentan a partir de la aplicación de los métodos de correlación de Pearson, Spearman y Kendall, cuyas formulaciones matemáticas fueron descritas previamente en el capítulo anterior.

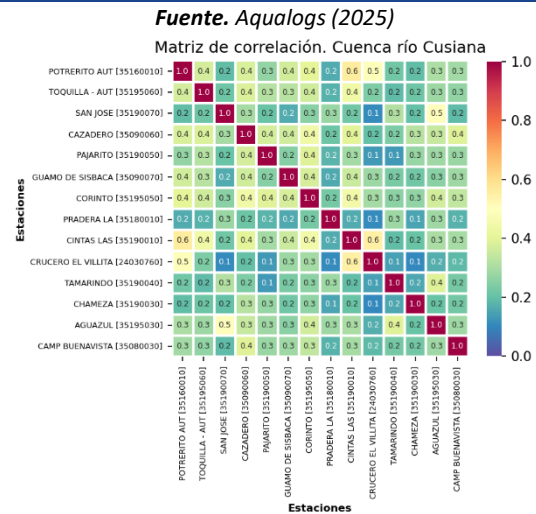
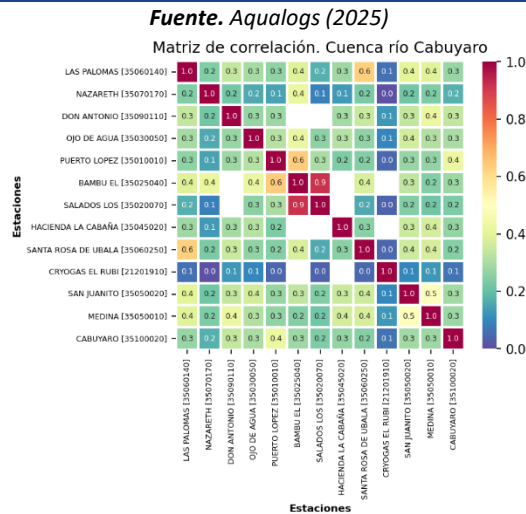


Como se aprecia en la figura anterior, la mayoría de las estaciones presentan coeficientes de correlación inferiores a 0.6, lo que evidencia una baja dependencia estadística entre las diferentes series de tiempo analizadas. No obstante, las estaciones Los Salados [35020070], Bambú El [35025040], Santa María [35070180], Piedra Campana [35080080] y Cachipay [35080140] muestran correlaciones superiores a 0.7, reflejando una alta asociación en sus registros. Este

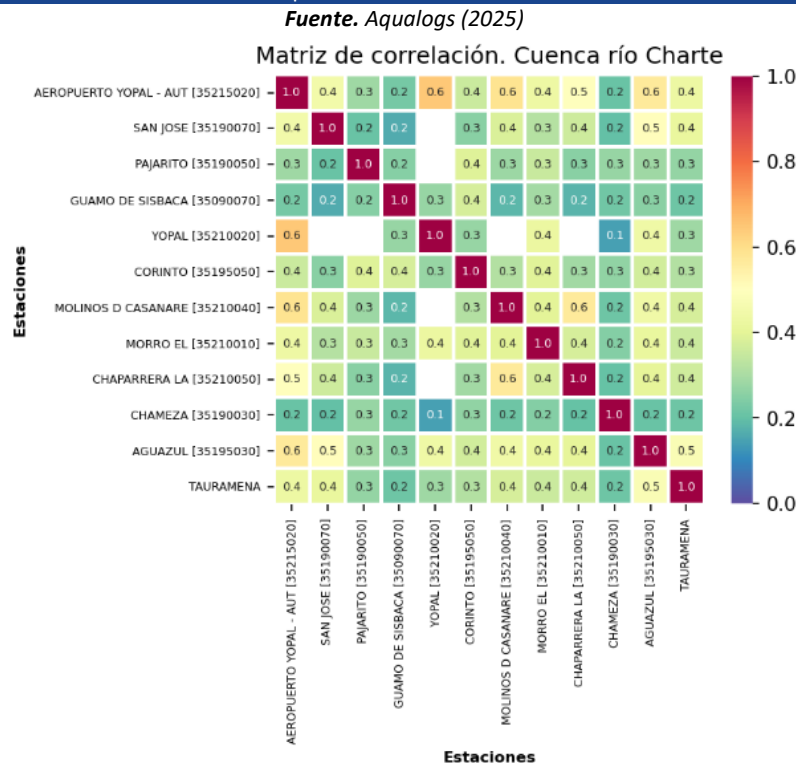
comportamiento sugiere que, en determinados cálculos, la inclusión simultánea de estas estaciones podría introducir redundancia en la información empleada para el análisis.

Correlación de Pearson para las estaciones de la cuenca del río Cabuyaro.

Correlación de Pearson para las estaciones de la cuenca del río Cusiana.



Correlación de Pearson para las estaciones de la cuenca del río Charste.



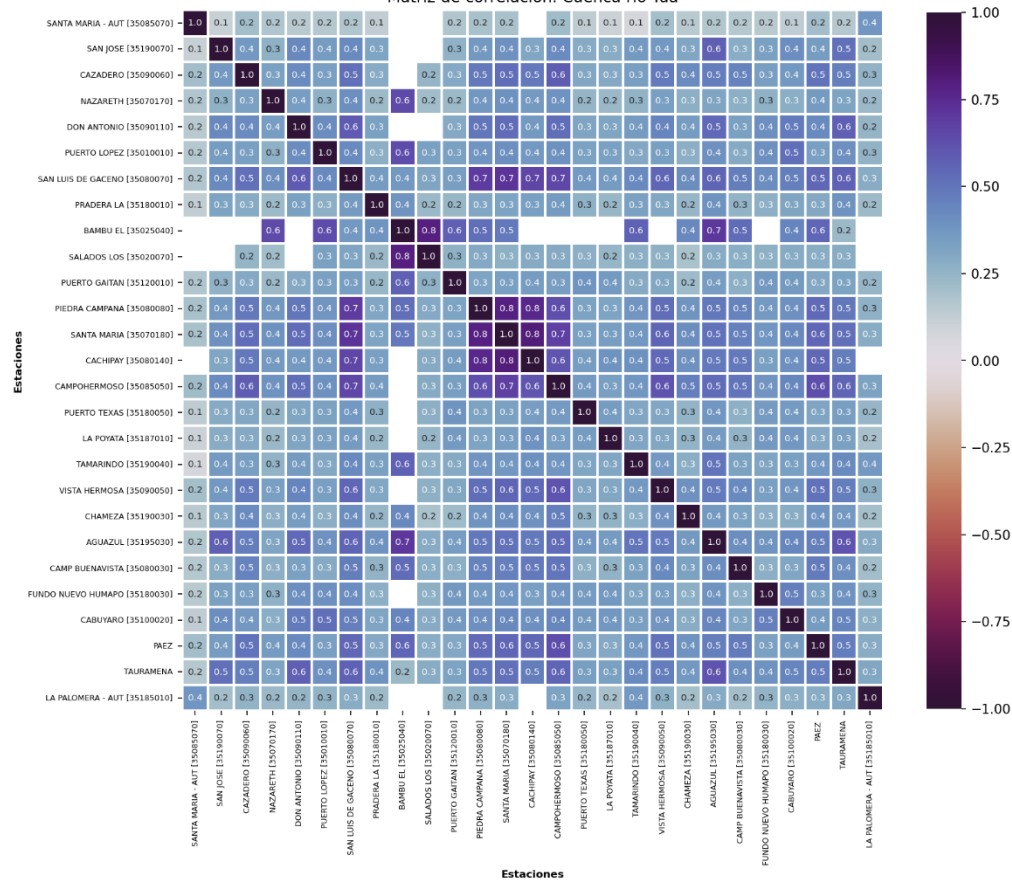
Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEO PARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

Por otro lado, para las estaciones ubicadas en cuencas con condiciones hidrológicas similares se efectuó un análisis comparativo de los coeficientes de correlación de Pearson obtenidos a partir de las series de tiempo. No obstante, únicamente se destaca la correlación significativa identificada entre la estación BAMBU EL [35025040] y la estación SALADOS LOS [35020070], correspondiente a la cuenca del río Cabuyaro.

Correlación de Spearman para las estaciones de la cuenca del río Túa

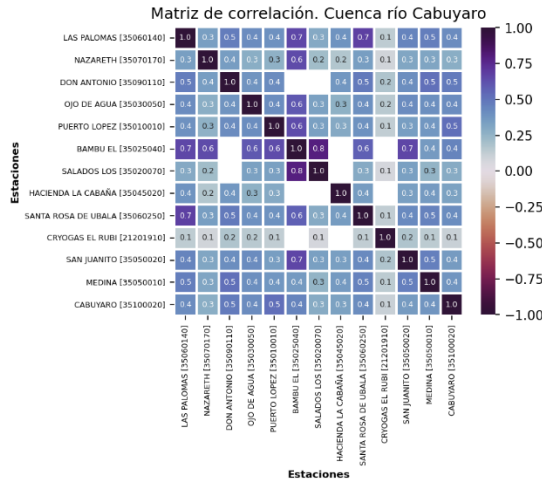
Fuente. Aqualogs (2025)

Matriz de correlación. Cuenca río Túa



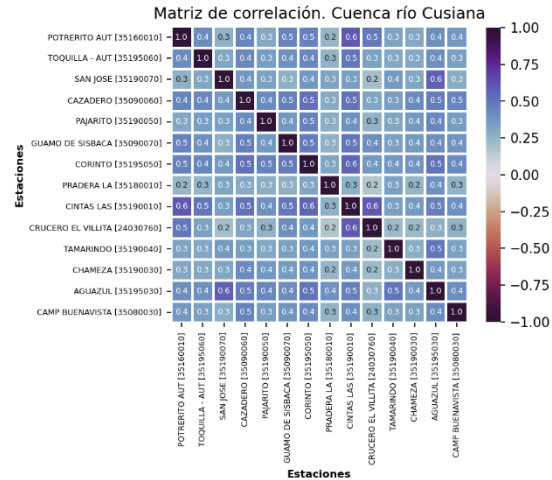
Correlación de Spearman para las estaciones de la
cuenca del río Cabuyaro.

Fuente. Aqualogs (2025)



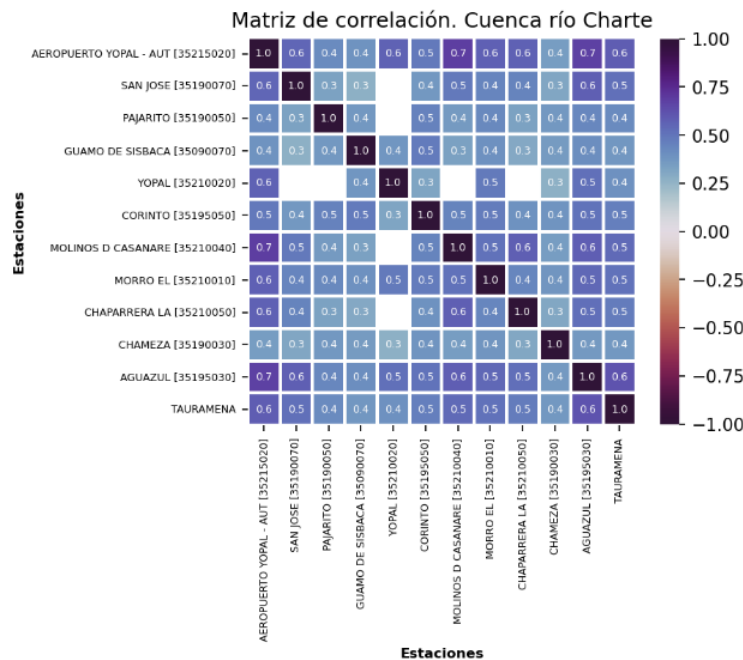
Correlación de Spearman para las estaciones de la
cuenca del río Cusiana

Fuente. Aqualogs (2025)



Correlación de Spearman para las estaciones de la cuenca del río Charle.

Fuente. Aqualogs (2025)



El análisis mediante el coeficiente de correlación de Spearman evidencia resultados consistentes con los obtenidos a partir del coeficiente de Pearson, previamente expuestos. En todos los casos se identifican correlaciones positivas, lo que indica la existencia de una relación monótona creciente entre las series de tiempo, sin presencia de correlaciones negativas. En particular, se destacan correlaciones fuertemente positivas en las estaciones Los Salados [35020070], Bambú El [35025040], Santa María [35070180], Piedra Campana [35080080] y Cachipay [35080140].

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEO PARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

3.3.2. Prueba de homogeneidad

Tal como se indicó en la metodología, se aplicó la prueba de Pettitt con el propósito de evaluar la homogeneidad de las series de precipitación consideradas en el estudio. Los resultados del análisis incluyen: la decisión de la prueba (h), el punto de cambio en la serie temporal donde se identifica la pérdida de homogeneidad (cp), el valor de significancia asociado (p), el estadístico de prueba dependiente del método (U) y los valores medios de la serie antes y después del punto de cambio (μ_1 y μ_2 , respectivamente).

Estaciones del río Túa	Original	Homogenizada					
	h	h	cp	p	U	mu1	mu2
SAN JOSE [35190070]	True	False	507	0.26915	3431.00	5.32	7.71
CAZADERO [35090060]	False	False	298	0.93285	3010.00	7.20	6.80
NAZARETH [35070170]	False	False	59	0.10975	7049.00	14.66	10.13
DON ANTONIO [35090110]	False	False	268	0.4548	2895.00	8.84	10.68
PUERTO LOPEZ [35010010]	True	False	135	0.9284	3659.00	6.39	6.91
SAN LUIS DE GACENO [35080070]	False	False	159	0.9359	3438.00	9.78	10.64
PRADERA LA [35180010]	False	False	71	0.90195	3448.00	8.51	6.45
BAMBU EL [35025040]	False	True	1	0	2.00	7.72	10.77
SALADOS LOS [35020070]	True	False	46	0.7468	828.00	12.04	6.73
PIEDRA CAMPANA [35080080]	False	False	159	0.96375	3390.00	11.29	11.98
SANTA MARIA [35070180]	False	False	136	0.9965	2547.00	12.53	13.22
CAMPOHERMOSO [35085050]	False	False	159	0.99395	2121.00	7.64	8.47
LA POYATA [35187010]	False	False	147	0.28965	5426.00	5.60	7.14
TAMARINDO [35190040]	False	False	358	0.1469	5016.00	4.77	3.32
VISTA HERMOSA [35090050]	False	False	334	0.4615	5038.00	10.10	8.78
CHAMEZA [35190030]	False	False	242	0.0794	8715.00	9.75	10.27
AGUAZUL [35195030]	False	False	244	0.90975	3087.00	7.29	7.89
CAMP BUENAVISTA [35080030]	True	False	375	0.78155	4399.00	5.82	6.58
FUNDO NUEVO HUMAPO [35180030]	False	False	196	0.16195	6618.00	6.47	7.75
CABUYARO [35100020]	True	False	94	0.21985	7322.00	8.29	6.41
PAEZ [35080050]	False	False	392	0.52905	5401	9.27	8.17
TAURAMENA [35195020]	True	False	171	0.3255	5353	8.09	9.40

Para las estaciones asociadas a la cuenca del río Túa, se identificó que las estaciones CAZADERO [35090060], NAZARETH [35070170], DON ANTONIO [35090110], SAN LUIS DE GACENO [35080070], PRADERA LA [35180010], BAMBU EL [35025040], PIEDRA CAMPANA [35080080], SANTA MARIA [35070180], CAMPOHERMOSO [35085050], LA POYATA [35187010], TAMARINDO [35190040], VISTA HERMOSA [35090050], CHAMEZA [35190030], AGUAZUL [35195030], FUNDO NUEVO HUMAPO [35180030] y PAEZ [35080050] no poseen datos homogéneos originalmente; sin embargo, posterior al proceso de homogenización la estación BAMBU EL [35025040] resultó como la única no homogeneidad en su serie de precipitación.

De igual forma, se observa que las estaciones SAN JOSE [35190070], DON ANTONIO [35090110], PUERTO LOPEZ [35010010], SAN LUIS DE GACENO [35080070], BAMBU EL [35025040], PIEDRA CAMPANA [35080080], SANTA MARIA [35070180], CAMPOHERMOSO [35085050], LA POYATA [35187010], CHAMEZA [35190030], AGUAZUL [35195030], CAMP BUENAVISTA [35080030], FUNDO NUEVO HUMAPO [35180030], TAURAMENA [35195020] evidencian una tendencia creciente a lo largo del periodo de registro, lo que sugiere una variación temporal significativa en los patrones de precipitación. Por otro lado, las estaciones CAZADERO [35090060], NAZARETH [35070170], PRADERA LA [35180010], SALADOS LOS [35020070], TAMARINDO [35190040], VISTA HERMOSA

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEO PARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

[35090050], CABUYARO [35100020] y PAEZ [35080050] evidencian una tendencia decreciente en sus registros de precipitación.

Estaciones del río Cusiana	Original	Homogenizado					
	h	h	cp	p	U	mu1	mu2
POTRERITO AUT [35160010]	False	False	298	0.6605	4702	2.31	2.23
TOQUILLA - AUT [35195060]	False	False	386	0.48885	5636	3.34	3.91
SAN JOSE [35190070]	False	False	507	0.2661	3431	5.32	7.71
CAZADERO [35090060]	False	False	298	0.9358	3010	7.20	6.80
PAJARITO [35190050]	False	False	310	0.1321	3677	10.31	8.03
GUAMO DE SISBACA [35090070]	True	False	273	0.93315	2796	3.95	3.61
CORINTO [35195050]	False	False	363	0.27	5605	8.49	9.48
PRADERA LA [35180010]	False	False	71	0.9001	3448	8.51	6.45
CINTAS LAS [35190010]	False	False	363	0.39675	5907	3.14	3.61
CRUCERO EL VILLITA [24030760]	False	False	134	0.877	1394	2.10	2.21
TAMARINDO [35190040]	True	False	358	0.14265	5016	4.77	3.32
CHAMEZA [35190030]	True	False	242	0.0752	8715	9.75	10.27
AGUAZUL [35195030]	False	False	244	0.9113	3087	7.29	7.89
CAMP BUENAVISTA [35080030]	True	False	375	0.7787	4399	5.82	6.58

Por medio del análisis de homogeneidad se identificó que las estaciones GUAMO DE SISBACA [35090070], TAMARINDO [35190040], CHAMEZA [35190030] y CAMP BUENAVISTA [35080030] presentan un carácter no homogéneo, con lo cual, se proceden a homogenizar los datos de precipitación de estas estaciones. Posterior a la homogenización de las series de precipitación de las estaciones asociadas a la cuenca del río Cusiana, las estaciones TOQUILLA - AUT [35195060], SAN JOSE [35190070], CORINTO [35195050], CINTAS LAS [35190010], CRUCERO EL VILLITA [24030760], CHAMEZA [35190030], AGUAZUL [35195030] y CAMP BUENAVISTA [35080030] presentan un comportamiento creciente en el tiempo. Mientras que las estaciones POTRERITO AUT [35160010], CAZADERO [35090060], PAJARITO [35190050], GUAMO DE SISBACA [35090070], PRADERA LA [35180010] y TAMARINDO [35190040] presentan un comportamiento decreciente.

Estaciones del río Cabuyarito	Original	Homogenizado					
	h	h	cp	p	U	mu1	mu2
LAS PALOMAS [35060140]	False	False	158	0.46965	5802	10.32	11.43
NAZARETH [35070170]	False	False	59	0.10215	7049	14.66	10.13
DON ANTONIO [35090110]	False	False	268	0.4443	2895	8.84	10.68
OJO DE AGUA [35030050]	False	False	266	0.9502	3190	7.92	8.72
PUERTO LOPEZ [35010010]	False	False	135	0.92545	3659	6.39	6.91
BAMBU EL [35025040]	True	True	1	0	2	9.01	10.77
SALADOS LOS [35020070]	False	False	46	0.74875	828	12.04	6.73
HACIENDA LA CABAÑA [35045020]	True	True	492	0.00145	2030	1.38	3.76
SANTA ROSA DE UBALA [35060250]	False	False	321	0.91325	3699	10.18	9.61
CRYOGAS EL RUBI [21201910]	False	False	210	0.0929	238	2.35	1.21
SAN JUANITO [35050020]	False	False	56	0.9144	3842	12.26	10.46
MEDINA [35050010]	False	False	267	0.07575	8800	9.82	11.22
CABUYARO [35100020]	True	False	94	0.2196	7322	8.29	6.41

A partir del análisis de homogeneidad de las estaciones localizadas en la cuenca del río Caburayo. Se observa que no son homogéneas las estaciones BAMBU EL [35025040] HACIENDA LA CABAÑA [35045020] y CABUYARO [35100020]. Por otro lado, se observa que las estaciones LAS PALOMAS [35060140], DON ANTONIO [35090110], OJO DE AGUA [35030050], PUERTO LOPEZ [35010010],

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEO PARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

BAMBU EL [35025040], HACIENDA LA CABAÑA [35045020] y MEDINA [35050010] presenta un comportamiento creciente, mientras que las estaciones NAZARETH [35070170], SALADOS LOS [35020070], SANTA ROSA DE UBALA [35060250], CRYOGAS EL RUBI [21201910], SAN JUANITO [35050020] y CABUYARO [35100020] presentan un comportamiento decreciente.

Estaciones del río Charte	Original	Homogenizado					
	h	h	cp	p	U	mu1	mu2
AEROPUERTO YOPAL - AUT [35215020]	False	False	266	0.34775	5827	6.39	7.22
SAN JOSE [35190070]	False	False	507	0.2812	3431	5.32	7.71
PAJARITO [35190050]	False	False	310	0.1268	3677	10.31	8.03
GUAMO DE SISBACA [35090070]	True	False	273	0.9378	2796	3.95	3.61
YOPAL [35210020]	False	False	57	0.1756	1132	8.95	6.77
CORINTO [35195050]	False	False	363	0.2751	5605	8.49	9.48
MOLINOS D CASANARE [35210040]	False	False	363	0.3277	2989	6.60	7.35
MORRO EL [35210010]	False	False	394	0.81025	4203	10.32	9.31
CHAPARRERA LA [35210050]	False	False	219	0.93935	1816	5.07	7.41
CHAMEZA [35190030]	True	False	242	0.07785	8715	9.75	10.27
AGUAZUL [35195030]	False	False	244	0.91355	3087	7.29	7.89
TAURAMENA [35195020]	False	False	171	0.3316	5353	8.09	9.40

Finalmente, para las estaciones asociadas a la cuenca del río Charte, se evidencian que las estaciones GUAMO DE SISBACA [35090070] y CHAMEZA [35190030] no presentan homogeneidad. Con lo cual, posterior a la homogenización de estas series, se observa que las estaciones AEROPUERTO YOPAL - AUT [35215020], SAN JOSE [35190070], CORINTO [35195050], MOLINOS D CASANARE [35210040], CHAPARRERA LA [35210050], CHAMEZA [35190030], AGUAZUL [35195030] y TAURAMENA [35195020] presentan un comportamiento creciente, mientras que las estaciones PAJARITO [35190050], GUAMO DE SISBACA [35090070], YOPAL [35210020], MORRO EL [35210010] y CABUYARO [35100020] presentan un comportamiento decreciente.

Las observaciones efectuadas sobre estas estaciones serán consideradas en capítulos posteriores, en los cuales se definen las estaciones de referencia y se lleva a cabo la construcción de las series de precipitación empleadas en el desarrollo del modelo hidrológico.

3.3.1. Datos atípicos

En el presente capítulo se presentan los resultados del proceso de evaluación y depuración de valores atípicos en las diferentes series de estudio, siguiendo las metodologías descritas en el marco teórico. Para ello, se exponen los límites superiores definidos para cada serie temporal, la cantidad de registros eliminados a partir de dichos umbrales y la comparación gráfica entre las series originales y las ajustadas, una vez removidos los valores atípicos.

Como se explicó en la metodología, se emplearon dos enfoques para el cálculo de los umbrales asociados a la identificación de valores atípicos. La metodología definida para el análisis a largo plazo se aplicó a las estaciones correspondientes a las cuencas pivote, mientras que el procedimiento de detección de valores atípicos orientado al análisis de tormentas se implementó en las estaciones localizadas en la cuenca del río Tua.

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEO PARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

Esta diferenciación metodológica obedece a los objetivos del estudio: las cuencas pivote se utilizaron para la identificación de los parámetros hidrológicos de carácter estructural y de largo plazo requeridos en el modelo, mientras que las series de precipitación de la cuenca del río Tua se emplearon para la construcción de los hietogramas necesarios en la modelación hidráulica.

En la siguiente tabla se presentan los valores atípicos identificados en cada una de las estaciones utilizadas para el análisis del área de estudio. Cabe destacar que la estación BAMBU EL [35025040] no cuenta con un valor registrado, debido a que la metodología para la determinación de datos atípicos para eventos de tormenta tiene en cuenta el volumen de datos y esta estación no posee un volumen adecuado de datos.

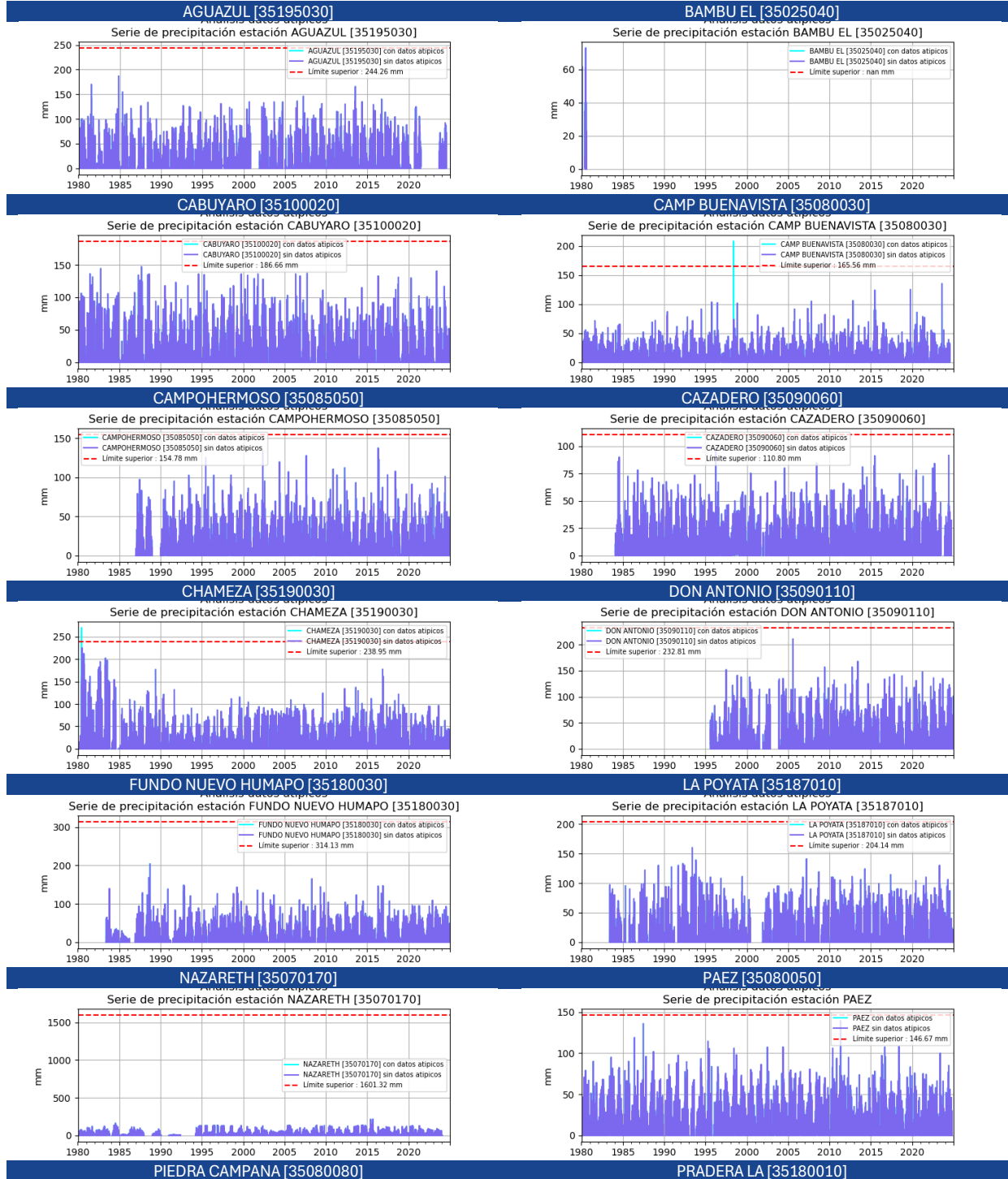
Tabla 3-3. Límite superior para la información a de las estaciones del área de estudio.

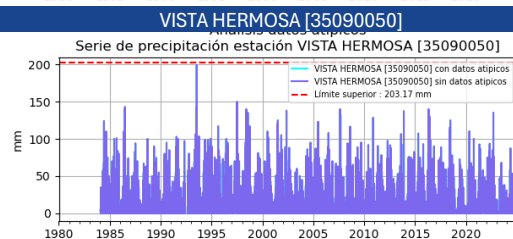
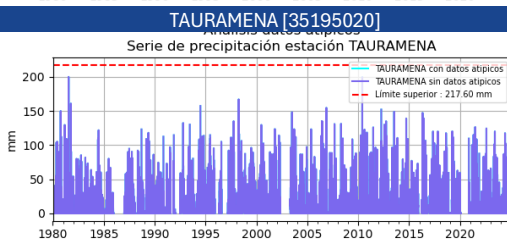
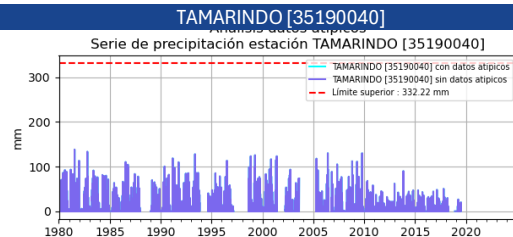
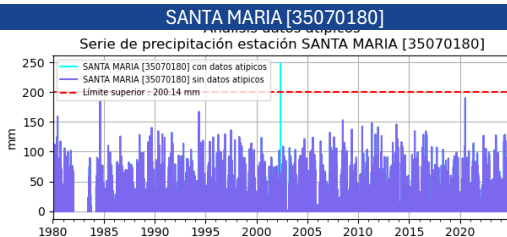
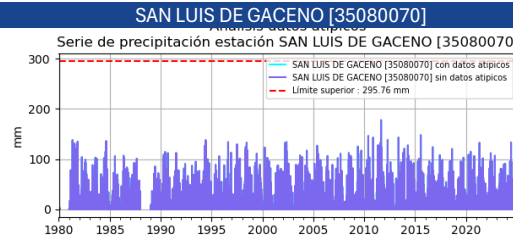
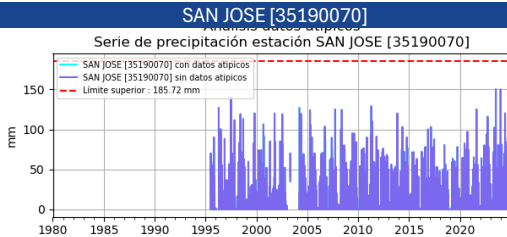
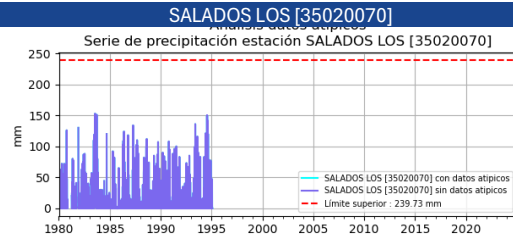
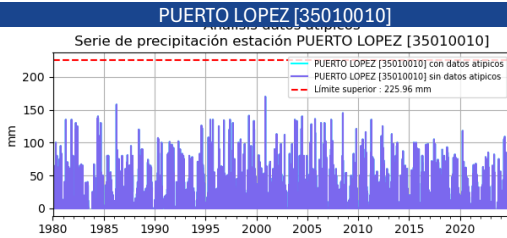
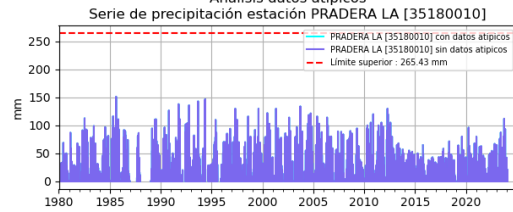
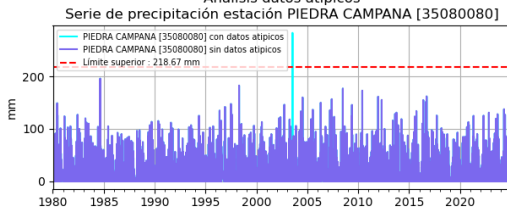
Estación	Umbral	Valores atípicos
AGUAZUL [35195030]	244.26	0
BAMBU EL [35025040]	nan	0
CABUYARO [35100020]	186.66	0
CAMP BUENAVISTA [35080030]	165.56	1
CAMPOHERMOSO [35085050]	154.78	0
CAZADERO [35090060]	110.80	0
CHAMEZA [35190030]	238.95	1
DON ANTONIO [35090110]	232.81	0
FUNDO NUEVO HUMAPO [35180030]	314.13	0
LA POYATA [35187010]	204.14	0
NAZARETH [35070170]	1601.32	0
PAEZ	146.67	0
PIEDRA CAMPANA [35080080]	218.67	1
PRADERA LA [35180010]	265.43	0
PUERTO LOPEZ [35010010]	225.96	0
SALADOS LOS [35020070]	239.73	0
SAN JOSE [35190070]	185.72	0
SAN LUIS DE GACENO [35080070]	295.76	0
SANTA MARIA [35070180]	200.14	1
TAMARINDO [35190040]	332.22	0
TAURAMENA	217.60	0
VISTA HERMOSA [35090050]	203.17	0

Fuente. Aqualogs (2025)

En las figuras generadas (Ver Tabla 3-4) se observa que, para el periodo comprendido entre 1980 y 2025, únicamente las estaciones CAMP BUENAVISTA [35080030], CHAMEZA [35190030], PIEDRA CAMPANA [35080080] y SANTA MARIA [35070180] presentan registros de valores atípicos. Este comportamiento resalta la particularidad de dichas estaciones frente al conjunto analizado, y será abordado con mayor detalle en el desarrollo del estudio.

Tabla 3-4. Datos atípicos en las estaciones del área de estudio.





Fuente. Aqualogs (2025)

Al igual que en el caso anterior, se establece un límite superior y el número de valores atípicos en las estaciones de las cuencas pivote. Es importante recordar que las metodologías empleadas para definir dichos valores varían, y se fundamentan en los criterios expuestos en el capítulo 3.1.4 del presente documento.

Tabla 3-5. Límite superior para la información a de las estaciones en las cuencas pivote.

Estación	Umbral	Valores atípicos	% identificados	Cuencas pivote		
				Cusiana	Charter	Cabuyarito
AEROPUERTO YOPAL - AUT [35215020]	100.6	66	0.4%		1	
AGUAZUL [35195030]	98.5	74	0.5%	1	1	
BAMBU EL [35025040]	inf	0	0.0%			1
CABUYARO [35100020]	116.7	32	0.2%			1
CAMP BUENAVISTA [35080030]	59.0	58	0.4%	1		

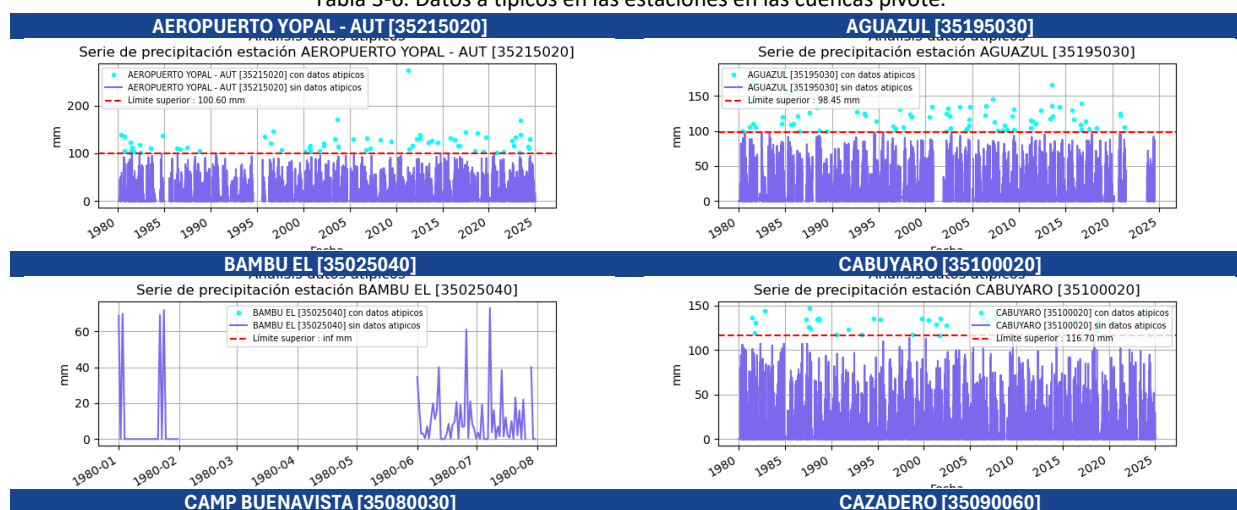
Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEO PARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

Estación	Umbral	Valores atípicos	% identificados	Cuencas pivote		
				Cusiana	Charter	Cabuyarito
CAZADERO [35090060]	64.0	37	0.3%	1		
CHAMEZA [35190030]	131.8	43	0.3%	1	1	
CHAPARRERA LA [35210050]	118.8	37	0.4%		1	
CINTAS LAS [35190010]	32.4	78	0.5%	1		
CORINTO [35195050]	75.4	38	0.3%	1	1	
CRUCERO EL VILLITA [24030760]	37.6	10	0.1%	1		
CRYOGAS EL RUBI [21201910]	34.4	2	0.1%			1
DON ANTONIO [35090110]	112.0	55	0.6%			1
GUAMO DE SISBACA [35090070]	35.2	53	0.4%	1	1	
HACIENDA LA CABAÑA [35045020]	76.7	12	0.3%			1
LAS PALOMAS [35060140]	105.0	34	0.2%			1
MEDINA [35050010]	129.0	37	0.2%			1
MOLINOS D CASANARE [35210040]	98.0	55	0.6%		1	
MORRO EL [35210010]	113.0	51	0.3%		1	
NAZARETH [35070170]	103.0	126	0.9%			1
OJO DE AGUA [35030050]	114.0	43	0.3%			1
PAJARITO [35190050]	98.7	62	0.7%	1	1	
POTRERITO AUT [35160010]	29.3	63	0.4%	1		
PRADERA LA [35180010]	106.0	31	0.2%	1		
PUERTO LOPEZ [35010010]	109.0	50	0.3%			1
SALADOS LOS [35020070]	116.0	17	0.3%			1
SAN JOSE [35190070]	104.3	23	0.2%	1	1	
SAN JUANITO [35050020]	141.0	10	0.1%			1
SANTA ROSA DE UBALA [35060250]	90.0	63	0.4%			1
TAMARINDO [35190040]	108.3	19	0.2%	1		
TAURAMENA	110.9	61	0.4%		1	
TOQUILLA - AUT [35195060]	38.4	66	0.4%	1		
YOPAL [35210020]	128.6	10	0.2%		1	

Fuente. Aqualogs (2025)

Por la índole de metodología empleada para el análisis de la estación en las cuencas pivote, todas las estaciones presentan registros de datos atípicos. Esta característica se evidencia en las figuras de la Tabla 3-6, donde se destacan los valores que exceden los umbrales establecidos para cada estación.

Tabla 3-6. Datos a típicos en las estaciones en las cuencas pivote.



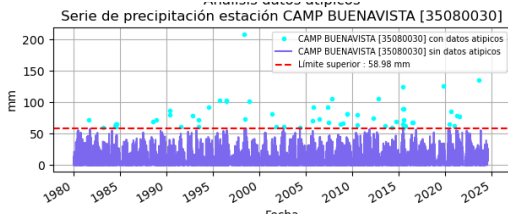
Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34
Análisis hidroclimatológico



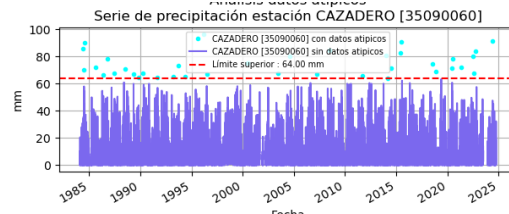
Código: AQ194

Versión: 02

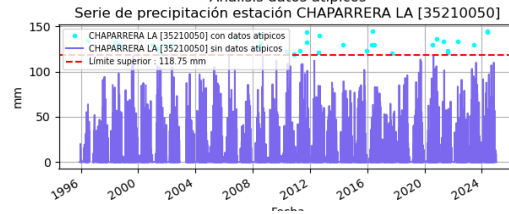
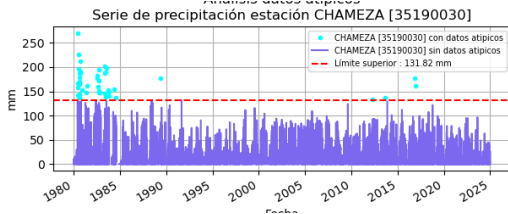
Cliente



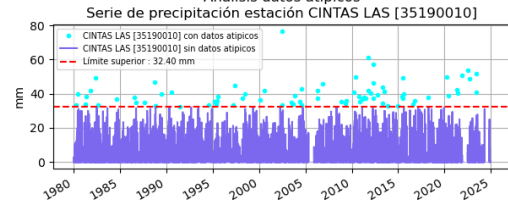
CHAMEZA [35190030]



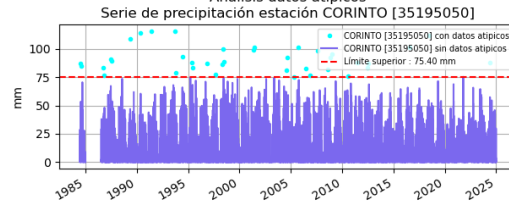
CHAPARRERA LA [35210050]



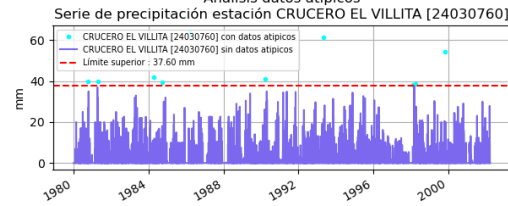
CINTAS LAS [35190010]



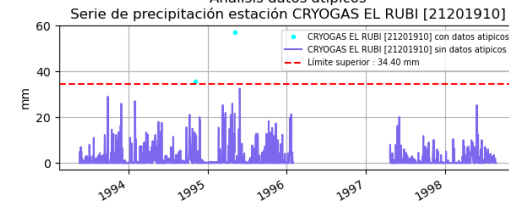
CORINTO [35195050]



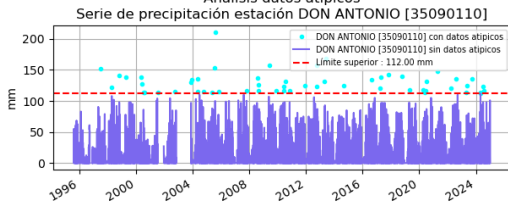
CRUCERO EL VILLITA [24030760]



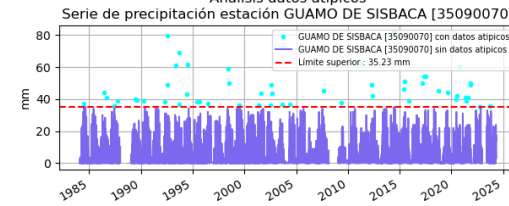
CRYOGAS EL RUBI [21201910]



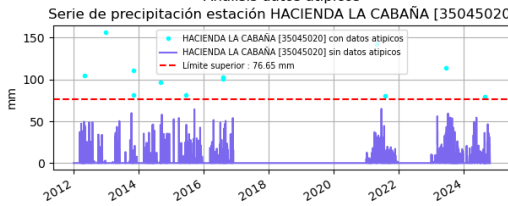
DON ANTONIO [35090110]



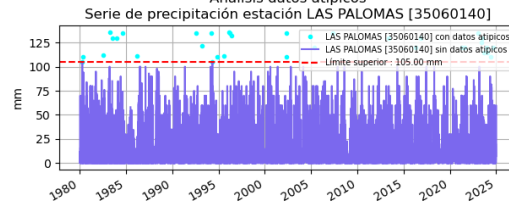
GUAMO DE SISBACA [35090070]



HACIENDA LA CABAÑA [35045020]



LAS PALOMAS [35060140]



MEDINA [35050010]

MOLINOS D CASANARE [35210040]

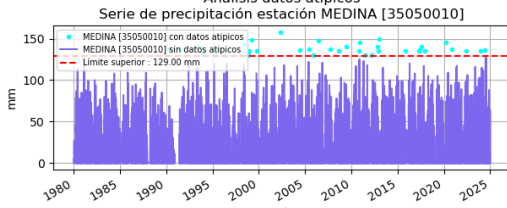
Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34
Análisis hidroclimatológico



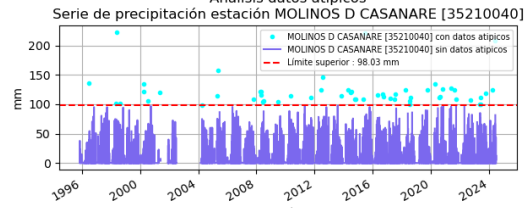
Código: AQ194

Versión: 02

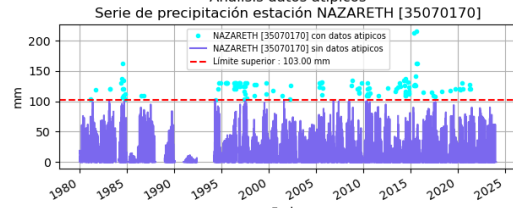
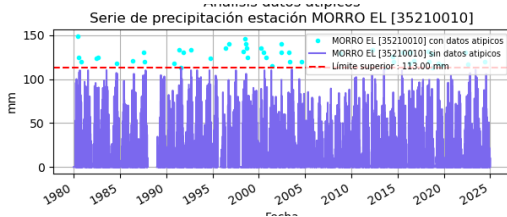
Cliente



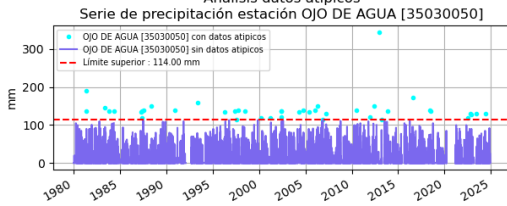
MORRO EL [35210010]



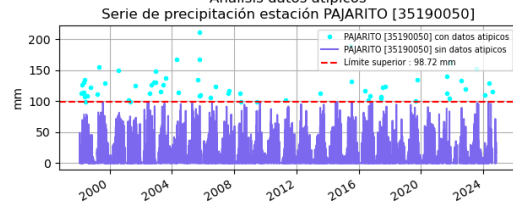
NAZARETH [35070170]



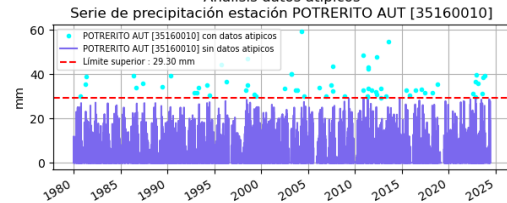
OJO DE AGUA [35030050]



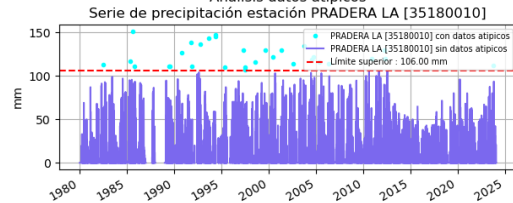
PAJARITO [35190050]



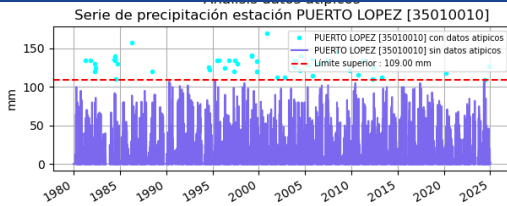
POTRERITO AUT [35160010]



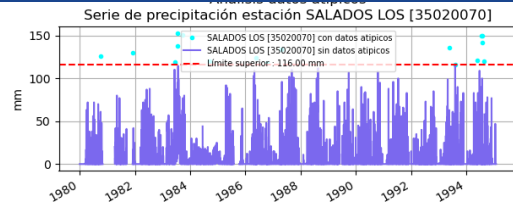
PRADERA LA [35180010]



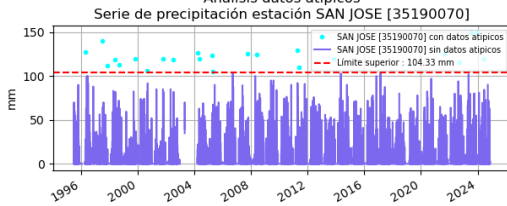
PUERTO LOPEZ [35010010]



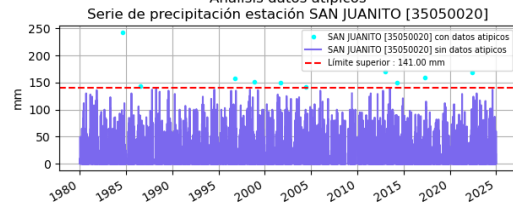
SALADOS LOS [35020070]



SAN JOSE [35190070]

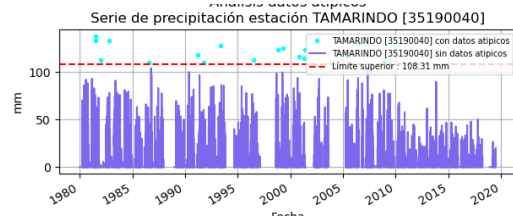
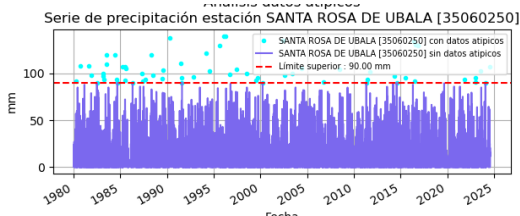


SAN JUANITO [35050020]



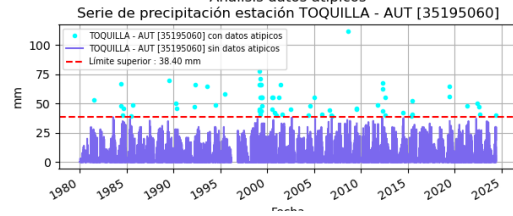
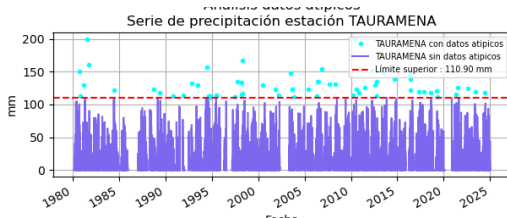
SANTA ROSA DE UBALA [35060250]

TAMARINDO [35190040]

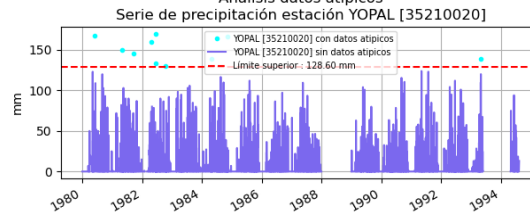


TAURAMENA [35195020]

TOQUILLA - AUT [35195060]



YOPAL [35210020]



Fuente: Aqualogs (2025)

3.3.2. Imputación de datos

En el presente capítulo se exponen los resultados asociados al proceso de imputación de datos, iniciando con la cuantificación de los registros completados para cada una de las estaciones pertenecientes a las cuencas de trabajo, tanto en la cuenca del río Túa como en las cuencas pivote. Adicionalmente, se presenta el porcentaje de información que corresponde a los datos imputados, lo cual permite dimensionar la magnitud del ajuste realizado en cada serie temporal.

Es importante señalar que el proceso de completado de datos se efectuó empleando únicamente las estaciones asociadas a cada una de las cuencas de trabajo. Asimismo, la imputación se restringió exclusivamente a aquellos días en los que se contó con información observada en al menos dos estaciones.

Tabla 3-7. Datos completados en las estaciones del área de estudio

Estación	Diferencia	Diferencia %
AGUAZUL [35195030]	269	1.92%
BAMBU EL [35025040]	12	11.76%
CABUYARO [35100020]	57	0.35%
CACHIPAY [35080140]	8683	56.36%
CAMP BUENAVISTA [35080030]	90	0.56%
CAMPOHERMOSO [35085050]	145	1.08%
CAZADERO [35090060]	82	0.57%
CHAMEZA [35190030]	116	0.72%
DON ANTONIO [35090110]	56	0.56%

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEO PARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

FUNDO NUEVO HUMAPO [35180030]	110	0.76%
LA PALOMERA - AUT [35185010]	5	0.22%
LA POYATA [35187010]	148	1.07%
NAZARETH [35070170]	61	0.42%
PAEZ	142	0.89%
PIEDRA CAMPANA [35080080]	60	0.37%
PRADERA LA [35180010]	88	0.59%
PUERTO GAITAN [35120010]	62	0.39%
PUERTO LOPEZ [35010010]	63	0.39%
PUERTO TEXAS [35180050]	188	1.50%
SALADOS LOS [35020070]	67	1.30%
SAN JOSE [35190070]	58	0.57%
SAN LUIS DE GACENO [35080070]	40	0.26%
SANTA MARIA - AUT [35085070]	5	0.17%
SANTA MARIA [35070180]	193	1.23%
TAMARINDO [35190040]	93	0.78%
TAURAMENA	402	2.88%
VISTA HERMOSA [35090050]	110	0.75%

Fuente. Aqualogs (2025)

En la Tabla 3-7 se muestra que la estación con mayor cantidad de datos imputados corresponde a la estación CACHIPAY [35080140] con un completado del 56.36%. Sin embargo, en esta estación no se ve un cambio significativo del valor promedio menor 0.2 mm. Por otro lado, la estación con mayores cambios en el valor promedio es la estación BAMBU EL [35025040] con cambio del valor promedio de 1.5 mm. Estos datos se pueden ver en la Figura 3-7

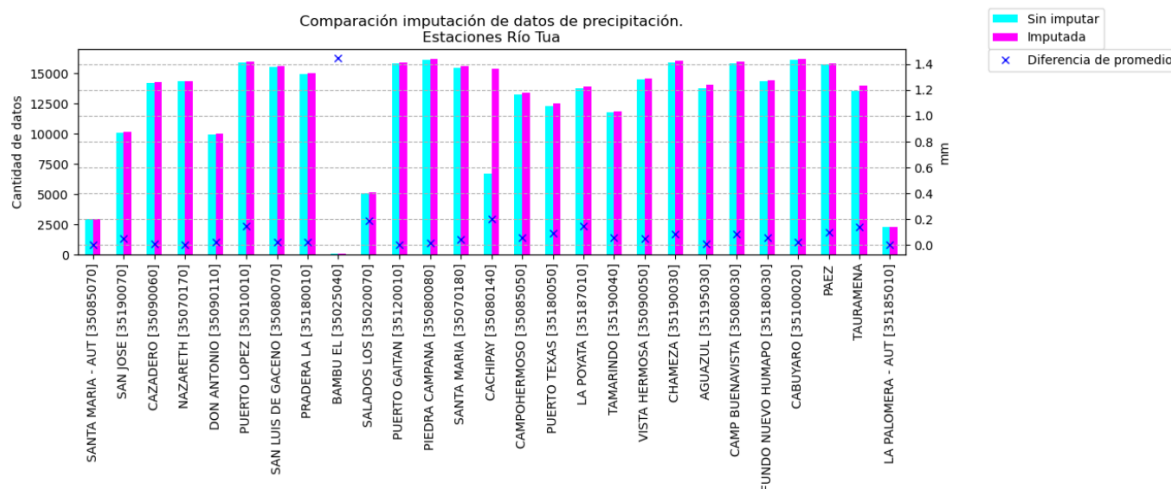


Figura 3-7. Datos completados en las estaciones del área de estudio

Fuente. Aqualogs (2025)

Por otro lado, para la cuenca Cusiana se tienen en cuenta las 14 estaciones presentadas en la Tabla 3-8. Donde la mayor cantidad de datos imputados se hizo en la estación AGUA AZUL [35195030], donde se imputaron 343 datos que corresponden al 2.44% de la serie de tiempo. Comparando los valores promedios de las series de tiempo, La mayor diferencia se ve en la estación PAJARITO [35190050] con 1.4 mm de diferencia.

Tabla 3-8. Datos completados en las estaciones de la cuenca del río Cusiana

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEO PARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

Estación	Diferencia	Diferencia %
AGUAZUL [35195030]	343	2.44%
CAMP BUENAVISTA [35080030]	147	0.92%
CAZADERO [35090060]	119	0.83%
CHAMEZA [35190030]	158	0.99%
CINTAS LAS [35190010]	127	0.81%
CORINTO [35195050]	178	1.27%
CRUCERO EL VILLITA [24030760]	36	0.45%
GUAMO DE SISBACA [35090070]	145	1.07%
PAJARITO [35190050]	143	1.50%
POTRERITO AUT [35160010]	161	1.03%
PRADERA LA [35180010]	119	0.79%
SAN JOSE [35190070]	81	0.80%
TAMARINDO [35190040]	112	0.94%
TOQUILLA - AUT [35195060]	186	1.17%

Fuente. Aqualogs (2025)

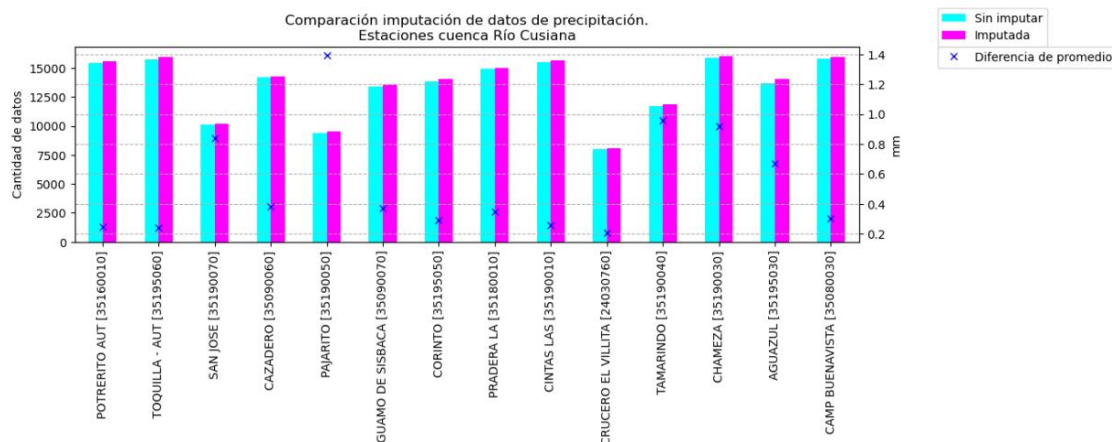


Figura 3-8. Datos completados en las estaciones de la cuenca del río Cusiana

Fuente. Aqualogs (2025)

Para la cuenca pivote del río Cabuyaro se consideraron un total de 13 estaciones, tal como se presenta en la Tabla 3-9. Dentro de estas, la estación OJO DE AGUA [35030050] registró la mayor cantidad absoluta de datos completados, con un total de 261 registros imputados. Por su parte, la estación BAMBÚ EL [35025040] presentó el mayor porcentaje relativo de información completada, alcanzando un 11,76 % del total de su serie. Por otro lado, respecto a la comparación del dato promedio, se observa que la estación que mayor cambio es la estación BAMBÚ EL [35025040] con una diferencia de 1.5 mm.

Tabla 3-9. Datos completados en las estaciones de la cuenca del río Cabuyarito

Estación	Diferencia	Diferencia %
BAMBU EL [35025040]	12	11.76%
CABUYARO [35100020]	89	0.55%
CRYOGAS EL RUBI [21201910]	12	0.81%
DON ANTONIO [35090110]	108	1.08%
HACIENDA LA CABAÑA [35045020]	17	0.36%
LAS PALOMAS [35060140]	91	0.57%
MEDINA [35050010]	109	0.67%
NAZARETH [35070170]	186	1.29%
OJO DE AGUA [35030050]	261	1.73%
PUERTO LOPEZ [35010010]	109	0.68%
SALADOS LOS [35020070]	81	1.57%

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEO PARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

SAN JUANITO [35050020]	36	0.22%
SANTA ROSA DE UBALA [35060250]	119	0.75%

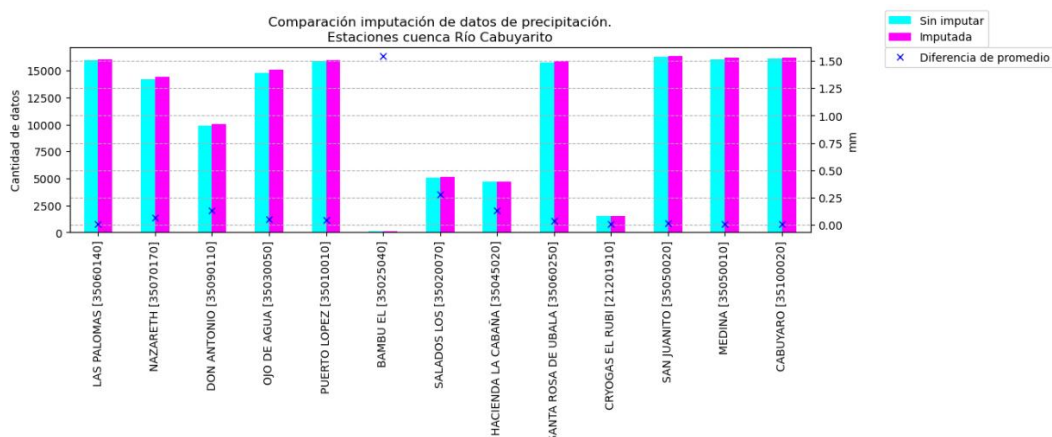


Figura 3-9. Datos completados en las estaciones de la cuenca del río Cabuyarito

Fuente. Aqualogs (2025)

Para la cuenca pivote asociada al río Charte se consideraron un total de 12 estaciones, tal como se presenta en la Tabla 3-10. Entre estas, la estación TAURAMENA registró la mayor cantidad absoluta de datos completados, con 459 registros imputados. Por otro lado, la estación MOLINOS D CASANARE [35210040] presentó el mayor porcentaje relativo de información completada, equivalente al 3.41 % de su serie.

Por otro lado, al comparar los valores promedio de las series originales y las series ajustadas mediante imputación, se evidencian variaciones relevantes en las estaciones MOLINOS D CASANARE [35210040] y CHAPARRERA LA [35210050], con una diferencia de 0.35 mm.

Tabla 3-10. Datos completados en las estaciones de la cuenca del río Charte.

Estación	Diferencia	Diferencia %
AEROPUERTO YOPAL - AUT [35215020]	333	2.21%
AGUAZUL [35195030]	342	2.44%
CHAMEZA [35190030]	158	0.99%
CHAPARRERA LA [35210050]	209	2.04%
CORINTO [35195050]	178	1.27%
GUAMO DE SISBACA [35090070]	145	1.07%
MOLINOS D CASANARE [35210040]	327	3.41%
MORRO EL [35210010]	107	0.68%
PAJARITO [35190050]	143	1.50%
SAN JOSE [35190070]	79	0.78%
TAURAMENA	459	3.28%
YOPAL [35210020]	43	0.93%

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEO PARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

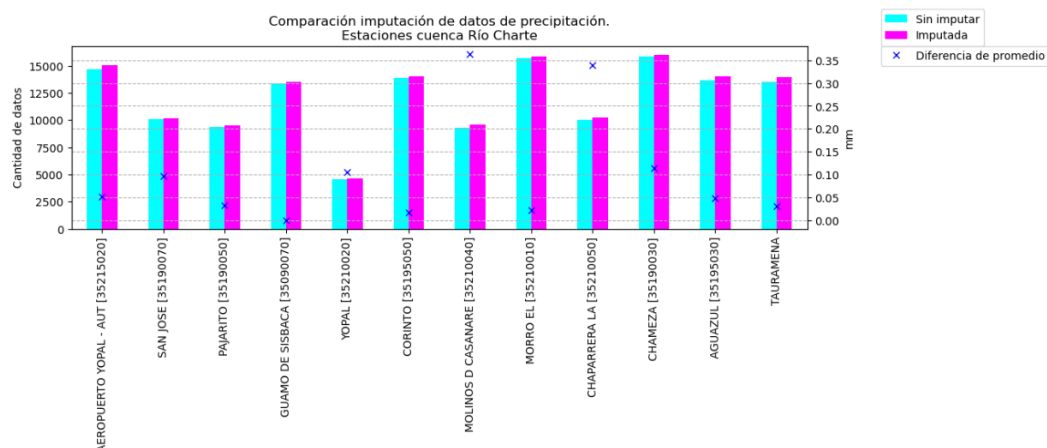


Figura 3-10. Datos completados en las estaciones de la cuenca del río Charte

Fuente. Aqualogs (2025)

3.3.3. Selección de estaciones

Con base en los resultados anteriores, se definen las siguientes estaciones como definitivas para el cálculo de caudales.

Tabla 3-11. Estaciones finales seleccionadas después del análisis hidrológico.

ESTACIÓN	CÓDIGO	ÁREA DE ESTUDIO		CUENCAS PIVOTE		CUENCA RÍO CHARTE
		CUENCA RÍO TÚA	CUENCA RÍO CUSIANA	CUENCA RÍO CABUYARITO		
SAN JOSE [35190070]	35190070	X	X			X
CAZADERO [35090060]	35090060	X	X			
PUERTO LOPEZ [35010010]	35010010	X		X		
SAN LUIS DE GACENO [35080070]	35080070	X				
PRADERA LA [35180010]	35180010	X	X			
PIEDRA CAMPANA [35080080]	35080080	X				
VISTA HERMOSA [35090050]	35090050	X				
CHAMEZA [35190030]	35190030	X	X			X
AGUAZUL [35195030]	35195030	X	X			X
CAMP BUENAVISTA [35080030]	35080030	X	X			
CABUYARO [35100020]	35100020	X		X		
PAEZ [35080050]	35080050	X				
TAURAMENA [35195020]	35195020	X				X
POTRERITO AUT [35160010]	35160010		X			
TOQUILLA - AUT [35195060]	35195060		X			
PAJARITO [35190050]	35190050		X			X
GUAMO DE SISBACA [35090070]	35090070		X			X
CINTAS LAS [35190010]	35190010		X			
LAS PALOMAS [35060140]	35060140			X		
OJO DE AGUA [35030050]	35030050			X		
HACIENDA LA CABAÑA [35045020]	35045020			X		
MEDINA [35050010]	35050010			X		
AEROPUERTO YOPAL - AUT [35215020]	35215020					X
MORRO EL [35210010]	35210010					X

Los resultados se presentan en el Anexo 2 Climatología.

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEO PARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

4. Cambio climático

A continuación, se presenta el desarrollo de la metodología para estimar los efectos del cambio climático sobre la información hidrológica (particularmente en las precipitaciones máximas). Esta última información será un insumo fundamental para la modelación hidráulica.

4.1. Marco teórico

En el presente capítulo se presentan definiciones y componentes teóricos-metodológicos que permiten definir diversos escenarios futuros de cambio climático en el balance desarrollado sobre los tajos.

4.1.1. Definición de Cambio Climático

El cambio climático implica una serie de cambios a largo plazo en los patrones climáticos de la Tierra que afectan diversos aspectos como la temperatura, la precipitación, los vientos y otros elementos climáticos. Aunque estos cambios pueden originarse en procesos naturales, desde el siglo XIX han cobrado relevancia significativa los factores antropogénicos, generados por la actividad humana, que han alterado la composición de la atmósfera, principalmente por la emisión de gases de efecto invernadero derivados de la quema de combustibles fósiles. Estos gases contribuyen al fenómeno del calentamiento global, acelerando el cambio climático.

El Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC), una entidad dedicada al estudio científico del cambio climático evalúa de manera periódica las bases científicas del fenómeno, sus impactos y riesgos, y propone estrategias de adaptación y mitigación (IPCC, 2021). Estas evaluaciones proporcionan una base objetiva para que los gobiernos y otras instituciones desarrollen políticas relacionadas con el cambio climático.

Para proyectar el cambio climático futuro, se recurre a la creación de escenarios climáticos, y en este proceso, se utilizan modelos de cambio climático, como los incluidos en el Proyecto de Inter comparación de Modelos Acoplados (CMIP). Los modelos los desarrolla la comunidad científica global y se usan para simular el comportamiento del sistema climático de la Tierra.

Dentro del CMIP, el Proyecto de Inter comparación de Modelos de Escenarios (SMIP) está vinculado al CMIP6 y proporciona proyecciones climáticas basadas en escenarios relevantes para las preocupaciones de la sociedad en relación con la mitigación del cambio climático, la adaptación y los impactos. Estas proyecciones se basan en una serie de estimativos de emisiones y escenarios de uso del suelo elaborados con modelos de evaluación integrados (IAMs), que representan diferentes vías de desarrollo de la sociedad, conocidas como Vías Socioeconómicas Compartidas (SSPs).

Los SSPs describen diferentes trayectorias posibles para el desarrollo socioeconómico mundial, considerando factores como la población, la tecnología, la economía y las políticas. Estas vías de desarrollo se utilizan junto con los forzamientos climáticos, que incluyen una serie de factores que

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEO PARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

afectan el sistema climático, como las concentraciones de gases de efecto invernadero, aerosoles y otros componentes, para generar escenarios climáticos futuros.

Los SSPs describen cinco vías de desarrollo socioeconómico, que son: SSP1 (Caminos Sostenibles), SSP2 (Caminos Medios), SSP3 (Caminos Fragmentados), SSP4 (Caminos Desigualitarios) y SSP5 (Caminos Cercanos al Riesgo) (Riahi et al., 2017). Cada SSP refleja un conjunto de condiciones socioeconómicas y tecnológicas que influyen en las emisiones de gases de efecto invernadero y, por ende, en el cambio climático futuro.

Los escenarios SSP más utilizados son los SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5, que representan diferentes combinaciones de vías de desarrollo socioeconómico y forzamientos climáticos futuros (O'Neill et al., 2017). Estos escenarios permiten explorar una amplia gama de posibles futuros climáticos y evaluar estrategias de mitigación y adaptación.

Si bien puede parecer tangencial al tema principal, es relevante mencionar que en el pasado los escenarios de cambio climático eran conocidos como RCP (Representative Concentration Pathway). En este contexto, la **Figura 4-1** presenta la comparativa de CO₂ total hasta 2100 mediante los escenarios más frecuentemente empleados en la anterior metodología (IPCC AR5 - RCP) y los más recientes (IPCC AR6 - SSP), ofreciendo una perspectiva técnica de su evolución.

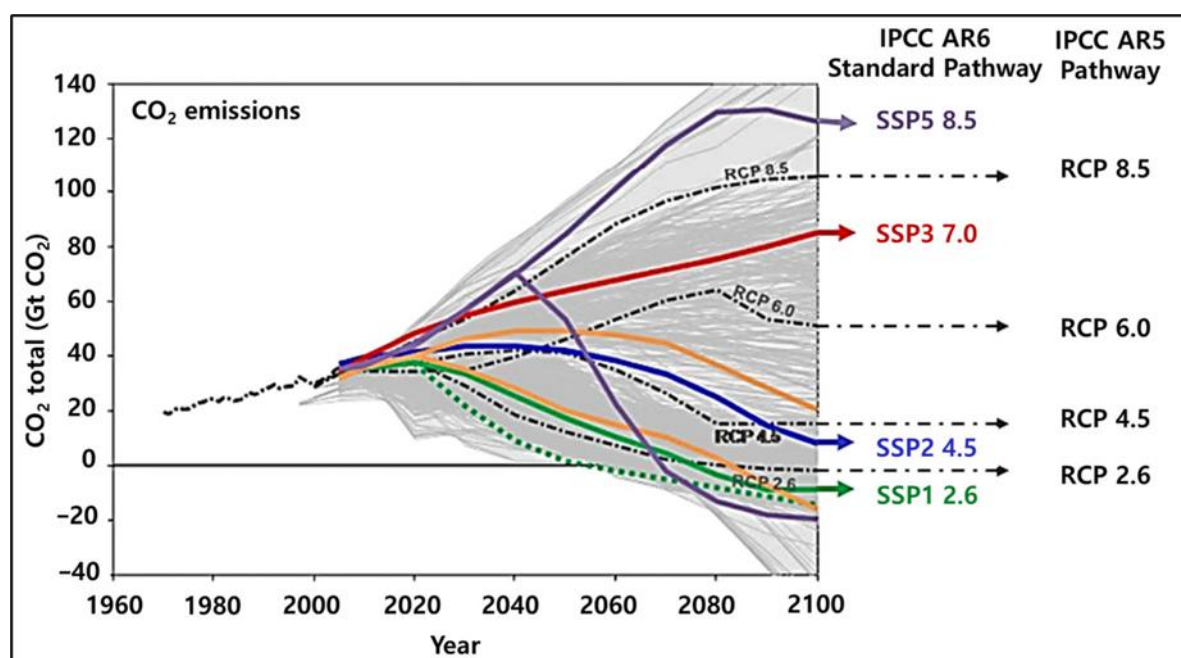


Figura 4-1. Concentración de CO₂ en la atmósfera y su relación con los escenarios RCP y SSP

Fuente: (An et al., 2022)

Dado que este documento se centra en los escenarios de cambio climático más actualizados (SSP), a continuación, se ofrece un resumen de los principales SSPs utilizados en los siguientes apartados.

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEO PARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

- En el SSP1-2.6 las emisiones globales de CO₂ se reducen drásticamente, pero no tan rápido, alcanzando el cero después de 2050. Hay cambios socioeconómicos hacia la sostenibilidad y las temperaturas se estabilizan en torno a 1.8 grados más altas a finales de siglo.
- El SSP2-4.5 se trata de un escenario "intermedio". Las emisiones de CO₂ rondan los niveles actuales antes de empezar a descender a mediados de siglo, pero no llegan al cero neto hasta 2100. Los factores socioeconómicos siguen sus tendencias históricas, sin cambios notables. El progreso hacia la sostenibilidad es lento, y el desarrollo y la renta crecen de forma desigual. En este escenario, las temperaturas aumentan 2.7 grados a finales de siglo.
- En el SSP3-7.0, las emisiones y las temperaturas aumentan de forma constante y las emisiones de CO₂ se duplican aproximadamente respecto de los niveles actuales para 2100. Los países se vuelven más competitivos entre sí, orientándose hacia la seguridad nacional y asegurando su propio suministro de alimentos. A finales de siglo, la temperatura media ha aumentado 3.6 grados.
- El escenario SSP5-8.5 se caracteriza porque los niveles actuales de emisiones de CO₂ se duplican aproximadamente en 2050. La economía mundial crece rápidamente, pero se alimenta de la explotación de los combustibles fósiles y de estilos de vida que consumen mucha energía. Para el año 2100, la temperatura media mundial ha subido 4.4 grados.

En este punto resulta relevante mostrar que uno de los principales indicadores de cambios en el clima corresponde a la temperatura. Para el presente ejercicio, la principal variable de interés es la precipitación, puesto que en un evento particular de tormenta la evaporación (dependiente de la temperatura) no será tan relevante en volumen como lo realmente precipitado.

4.1.2. Modelos de cambio climático

El objetivo de este capítulo es proporcionar una descripción concreta de los modelos de cambio climático que se emplean en el presente documento. La selección de estos modelos se fundamenta en tres criterios fundamentales: (1) Es imperativo que todos los modelos seleccionados incorporen el mismo escenario de cambio climático, específicamente los escenarios SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5. (2) Se requiere que la resolución temporal de los resultados generados por estos modelos sea uniforme, en este caso, se ha establecido una resolución diaria para garantizar la coherencia en los análisis. (3) Es crucial que los modelos seleccionados hayan sido validados previamente para el contexto de Colombia. Esta validación implica que estudios realizados por autores externos confirmen que el sesgo de los modelos para Colombia es menor en comparación con otros modelos, lo que asegura una mayor precisión y fiabilidad en las proyecciones climáticas para esta región (Arias et al., 2021).

En los siguientes numerales se presentan los modelos empleados, haciendo énfasis en que su selección se basó en criterios objetivos de rendimiento y ajuste.

4.1.2.1. CNRM-CM6

El CNRM-CM6 ha experimentado mejoras significativas en su capacidad para representar con mayor precisión los fenómenos climáticos a escalas regionales y locales. Una de las mejoras más destacadas

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEO PARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

radica en su enfoque en la representación del ciclo del carbono. Este modelo ha logrado una mejor representación de los procesos relacionados con el ciclo del carbono, lo que abarca la interacción entre la atmósfera, los océanos y la biosfera. Gracias a estas mejoras, el CNRM-CM6 puede ofrecer proyecciones más detalladas y realistas sobre cómo los cambios en el ciclo del carbono pueden afectar el clima global (Ruiz García et al., 2022).

Además, el CNRM-CM6 se ha ajustado para mejorar su sensibilidad climática. Esto significa que el modelo proporciona una respuesta más realista a los cambios provenientes de los forzamientos externos, como las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero. Estos ajustes permiten una simulación más precisa de cómo el cambio climático puede influir en diversos aspectos del clima, lo que aumenta la confiabilidad de las proyecciones climáticas generadas por este modelo.

4.1.2.2. INM-CM5-0

El modelo INM-CM5-0 se destaca por su representación detallada de los aerosoles atmosféricos y sus interacciones con las nubes y la radiación. Esta característica permite una simulación más precisa de los efectos climáticos de los aerosoles, que desempeñan un papel crucial en la modulación del clima. Al capturar de manera más precisa la compleja interacción entre los aerosoles y otros componentes del sistema climático, el INM-CM5-0 proporciona proyecciones climáticas más confiables y detalladas.

4.1.2.3. MPI-ESM1-2

El MPI-ESM1-2 se distingue por su representación detallada de la circulación oceánica global, incluyendo las corrientes oceánicas profundas. Esta característica facilita la simulación de fenómenos climáticos importantes, como El Niño y La Niña, impulsados por los patrones de circulación oceánica. Al capturar con precisión estos procesos oceánicos clave, el MPI-ESM1-2 puede proporcionar proyecciones más precisas y detalladas de la variabilidad climática, lo que contribuye a una mejor comprensión de los cambios climáticos futuros (Gutjahr et al., 2019).

4.1.3. Reducción de escala (*downscaling*)

El *downscaling* es una técnica utilizada para obtener proyecciones climáticas a una escala más detallada y localizada que las proporcionadas por los modelos climáticos globales. Estos modelos globales tienen una resolución espacial baja y no pueden capturar variaciones climáticas locales o regionales con suficiente detalle. El *downscaling* se utiliza para refinar estas proyecciones globales, utilizando modelos climáticos regionales o técnicas estadísticas para proporcionar información climática a escalas más pequeñas, como regiones específicas, países o incluso ciudades. Es de gran utilidad para evaluar los impactos del cambio climático a nivel local.

El *downscaling* se puede clasificar en dos categorías: el dinámico y el estadístico. En el dinámico se utilizan modelos climáticos regionales (RCMs, por sus siglas en inglés) para refinar las proyecciones climáticas obtenidas de los modelos globales. Los RCMs son similares a los modelos globales, pero tienen una resolución espacial más alta, lo que les permite representar características climáticas

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEO PARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

regionales con mayor detalle. Estos se alimentan con datos de entrada proporcionados por los modelos globales y, a través de la simulación de procesos atmosféricos a escalas más pequeñas, producen proyecciones climáticas más detalladas para áreas específicas. Sin embargo, su principal desventaja radica en su alto costo computacional.

Por otro lado, en el enfoque del *downscaling* estadístico, se proporcionan proyecciones climáticas a una escala local o regional a partir de datos climáticos generados por modelos climáticos globales (GCMs). En lugar de simular directamente procesos físicos en la atmósfera, como lo hacen los modelos climáticos regionales en el *downscaling* dinámico, el *downscaling* estadístico se basa en relaciones estadísticas entre las variables climáticas a gran escala (obtenidas de los GCMs) y las variables locales observadas.

En conclusión, el *downscaling* estadístico consiste en derivar relaciones empíricas que convierten las magnitudes a gran escala del GCM en variables a una escala mucho más fina, permitiendo así un análisis más detallado del posible impacto del cambio climático y teniendo un menor consumo computacional. Para el presente proyecto se usa esta metodología.

4.1.3.1. Métodos de downscaling

El presente capítulo detalla diferentes métodos estadísticos utilizados en el presente documento para realizar un *downscaling* estadístico. En general, se usan diversos métodos para alimentar los modelos de cada tajo con diferentes series de tiempo y evitar la selección de un único método, pues, como se observa, cada método tiene sus pros y contras. Cabe anotar que en los siguientes numerales se presentan los análisis realizados sobre precipitación y temperatura, con el fin de contextualizar mejor el método; sin embargo, se implementa específicamente sobre los valores de precipitación diaria y mensual.

4.1.3.1.1. Linear Scaling (LIN)

El método LS utiliza un factor de corrección constante, calculado a partir de la diferencia entre las simulaciones originales del modelo climático regional y los datos observados, para cada mes del año (Luo et al., 2018). Este método es especialmente efectivo para ajustar los factores climáticos cuando se consideran los promedios mensuales. En el caso de la precipitación, se realiza un ajuste multiplicativo, mientras que para la temperatura se utiliza un término aditivo como se puede observar en la **Ecuación 4-1** y **Ecuación 4-2**.

Ecuación 4-1 Precipitación - LS

$$P_{hst,m,d}^{cor} = P_{hst,m,d} * \left[\frac{\mu(P_{obs,m})}{\mu(P_{hst,m})} \right]$$

Donde $P_{hst,m,d}^{cor}$ representa la precipitación corregida en un día d del mes m y μ se refiere al valor promedio.

Ecuación 4-2 Temperatura - LS

$$T_{hst,m,d}^{cor} = T_{hst,m,d} + [\mu(T_{obs,m}) - \mu(T_{hst,m})]$$

Donde $T_{hst,m,d}^{cor}$ representa la temperatura corregida en un día d del mes m y μ se refiere al valor promedio.

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEOPARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

4.1.3.1.2. Empirical Quantile Mapping (QM)

El método QM puede aplicarse a cualquier tipo de variable climática. Este se fundamenta en funciones de distribución acumulativa empírica (ECDF) que son construidas diariamente punto a punto (Luo et al., 2018). Su principal ventaja radica en que puede producir ECDF posibles tanto para días secos como húmedos a diferencia de otros enfoques basados en el mapeo de distribución que se centran en la precipitación y que solo estiman las ECDF para días de lluvia. La frecuencia de ocurrencia de la precipitación junto con las desviaciones estándar puede corregirse simultáneamente en el enfoque EQM. La corrección de la precipitación y la temperatura se puede obtener con las ecuaciones **Ecuación 4-3** y **Ecuación 4-4**, respectivamente.

Ecuación 4-3 Precipitación - EQM

$$P_{hst,m,d}^{cor} = ecdf_{obs,m}^{-1}(ecdf_{hst,m}(P_{hst,m,d}))$$

Donde $P_{hst,m,d}^{cor}$ representa la precipitación corregida en un día d del mes m y μ se refiere al valor promedio.

Ecuación 4-4. Temperatura – EQM

$$T_{hst,m,d}^{cor} = ecdf_{obs,m}^{-1}(ecdf_{hst,m}(T_{hst,m,d}))$$

Donde $T_{hst,m,d}^{cor}$ representa la temperatura corregida en un día d del mes m y μ se refiere al valor promedio.

4.1.3.1.3. Quantile mapping con adaptación de frecuencia (QM2)

El método de Quantile Mapping utiliza distribuciones climatológicas, lo que permite realizar ajustes diarios (t) en cada celda de la cuadrícula (i) por separado. La corrección se realiza mediante una función de corrección que implica el uso de ECDF tanto para las observaciones como para los modelos. La diferencia entre estas distribuciones para un día particular del año (*doy -day of year*) en el período de calibración (*cal*) se utiliza para ajustar la serie temporal original.

La función de corrección (**Ecuación 4-5**), CF, representa la diferencia entre la ECDF inversa observada y modelada para el día del año respectivo en el periodo de calibración, en una probabilidad P determinada por la relación entre la salida del modelo climático sin procesar y la ECDF correspondiente en el periodo de calibración. Para la calibración de QM, se utiliza una ventana móvil de 31 días centrada en el día del año (*doy*) en cuestión, lo que permite construir una ECDF para cada día del año.

Ecuación 4-5 Función de corrección QMFA

$$CF_{t,i} = ecdf_{doy,i}^{obs,cal^{-1}}(P_{t,i}) - ecdf_{doy,i}^{mod,cal^{-1}}(P_{t,i})$$

Donde CF se refiere a la diferencia entre las observaciones *obs* y los datos modelados a la inversa *ecdf* ($ecdf^{-1}$) para el día correspondiente (*doy*) en la calibración del periodo (*cal*) de acuerdo con la probabilidad P.

Además, aunque la tendencia general es que los modelos climáticos subestimen los días secos, este método presenta una adaptación de frecuencia para abordar el problema que surge cuando el número de días secos en el resultado del modelo es superior al de las observaciones (Themeßl et al., 2012). La adaptación de frecuencia aborda este problema corrigiendo selectivamente los casos

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEO PARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

en los que el modelo sobreestima la frecuencia de días secos. Para esto, el método corrige aleatoriamente una fracción de estos casos basándose en una comparación entre la salida del modelo y los datos observacionales. Específicamente, corrige los casos de días secos interpolando linealmente entre cero precipitaciones y la cantidad de precipitación observada para el día seco correspondiente. Esta corrección elimina efectivamente el sesgo húmedo introducido por el modelo.

4.1.3.1.4. Detrended quantile mapping (DQM)

Para trabajar con ECDF, es fundamental considerar que esta función se define dentro del rango histórico de los datos modelados. Por lo tanto, al proyectar un valor que cae fuera de este rango, se requiere algún tipo de extrapolación para estimar su distribución. Una estrategia para evitar la extrapolación frecuente es ajustar explícitamente los valores proyectados teniendo en cuenta los cambios esperados. Por ejemplo, una técnica consiste en eliminar inicialmente la tendencia modelada en la media a largo plazo antes de realizar el mapeo de cuantiles (Cannon et al., 2015). Este proceso desplaza la distribución futura para que tienda a estar dentro del rango de la distribución histórica. Después, tras el mapeo de cuantiles, se puede reintroducir la tendencia eliminada.

En el caso de una variable de razón, como la precipitación, donde la tendencia es significativa, es posible eliminar y luego reintroducir la tendencia, escalando y reescalando los valores proyectados para mantener la coherencia con la tendencia histórica. Esta práctica ayuda a garantizar que las proyecciones se ajusten mejor al comportamiento histórico de la variable en cuestión.

Es así como el método DQM se distingue del mapeo de cuantiles tradicional (QM) al incorporar información adicional sobre la media proyectada del modelo climático para el período futuro. Esta mejora relativa proporciona una mayor concordancia con las tendencias generales del modelo climático subyacente. Es importante considerar que esta concordancia puede no extenderse uniformemente a todos los cuantiles de la distribución, especialmente aquellos de los extremos climáticos. DQM se define con la **Ecuación 4-6**:

Ecuación 4-6 Detrended quantile mapping

$$\hat{x}_{m,p}(t) = F_{o,h}^{-1}\left\{F_{m,h}\left[\frac{\bar{x}_{m,h}x_{m,p}(t)}{\bar{x}_{m,p}(t)}\right]\right\}\frac{x_{m,p}(t)}{\bar{x}_{m,p}}$$

Donde $\bar{x}_{m,p}$ y $\bar{x}_{m,p}(t)$ corresponden a las estimaciones de la media modelizada a largo plazo durante el periodo histórico y en el momento t del periodo proyectado.

4.1.3.1.5. Scaled distribution mapping (PSDM)

A diferencia de otros métodos, el SDM no asume la estacionalidad de los datos (Switanek et al., 2017). En lugar de ello, escala la distribución observada mediante los cambios proyectados del modelo en magnitud, frecuencia de días de lluvia (para la precipitación) y probabilidad de eventos. Estos cambios de escala varían según el período de corrección de sesgo. El SDM se implementa de manera distinta para la precipitación y la temperatura. En el caso de la precipitación, la distribución

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEO PARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

se escala por un valor multiplicativo o relativo, mientras que para la temperatura se utiliza un valor absoluto. Además, solo se utilizan los valores de precipitación positiva que exceden un umbral especificado para construir las distribuciones, mientras que para la temperatura se utilizan todos los valores. Los datos de temperatura se desestacionalizan primero, luego se corrige el sesgo y finalmente se vuelven a incorporar las tendencias, evitando así que la varianza se vea inflada por las tendencias temporales.

En el caso de la precipitación se establece un umbral mínimo y se separan los días con precipitación de los días sin ella. Luego, se ajustan los parámetros de la distribución más adecuada (e.g. gamma) a los valores positivos de precipitación observada y modelada utilizando máxima verosimilitud. Posteriormente, se calculan las funciones de densidad de probabilidad (PDF) y las funciones de distribución acumulada (CDF) correspondientes a los eventos de precipitación en las series temporales. A continuación, se calcula la escala entre la distribución modelada futura y la distribución histórica modelada en todos los valores de la CDF correspondientes a los eventos de precipitación de la serie temporal modelada futura en **Ecuación 4-7**. Luego, se calculan los intervalos de recurrencia para las tres series de precipitación, y se ajustan los intervalos de recurrencia del modelo futuro mediante los cambios proyectados en la extremidad de los eventos modelados. Finalmente, los valores corregidos de sesgo se colocan de nuevo en la serie temporal modelada en las ubicaciones temporales correctas. Este método permite ajustar los datos modelados de precipitación para que se asemejen más a los datos observados.

Ecuación 4-7 Precipitación - SDM

$$SF_R = \frac{ICDF_{MODF}(CDF_{MODF})}{ICDF_{MODH}(CDF_{MODF})}$$

Donde SF_R corresponde a un conjunto de valores de escala relativos (la longitud es igual al número de días de lluvia en el modelo futuro sin ajustar), $ICDF_{MODF}$ y $ICDF_{MODH}$ son las funciones de distribución acumulativa inversa (ICDF), o las funciones de punto porcentual, para las distribuciones ajustadas del modelo futuro e histórico, respectivamente, mientras que $ICDF_{MODF}$ son los valores CDF estimados para el modelo futuro bruto correspondientes a la distribución ajustada.

En cuanto a la temperatura el proceso de corrección de sesgo comienza eliminando la tendencia de las series temporales observadas y modeladas para capturar con mayor precisión la variabilidad natural. Luego, se ajusta una distribución de probabilidad normal a las series temporales sin tendencia, utilizando la media y la desviación estándar. Con estas distribuciones ajustadas, se calculan los valores correspondientes de la función de distribución acumulada (CDF) para los eventos de temperatura en las tres series temporales. Posteriormente, se calcula la escala entre la distribución modelada en el futuro y la distribución histórica modelada en cada probabilidad de los eventos futuros, considerando las desviaciones estándar de las distribuciones observadas y modeladas históricamente. Los valores de temperatura corregidos se determinan con intervalos de recurrencia escalados y valores de distribución acumulada modificados, y se reinsertan en la serie temporal modelada en el futuro, incorporando nuevamente la tendencia original de dicha serie.

Ecuación 4-8 Temperatura - SDM

$$SF_A = [ICDF_{MODF}(CDF_{MODF}) - ICDF_{MODH}(CDF_{MODF})] * \frac{\sigma_{OBS}}{\sigma_{MODH}}$$

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEO PARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

Donde SF_A es una matriz de factores de escala absolutos, $ICDF_{MODF}$ y $ICDF_{MODH}$ son los ICDF para las distribuciones del modelo futuro e histórico ajustadas, CDF_{MODF} es una matriz con los valores CDF estimados para el modelo futuro sin ajustar correspondiente a la distribución ajustada, y σ_{OBS} y σ_{MODH} son las desviaciones estándar de las distribuciones de las observaciones y del modelo histórico sin ajustar.

4.2. Resultados

4.2.1. Reducción de escala

El objetivo de este capítulo es presentar y evaluar los resultados de los métodos de reducción de escala aplicados a la precipitación, utilizando como métrica de calidad el estadístico de Kolmogórov-Smirnov (KS). El ajuste de downscaling se realizó para el período 1995–2015, lo cual responde a dos motivos: los modelos climáticos del CMIP6 cuentan con proyecciones únicamente hasta 2015, y en la cuenca del río Túa las mediciones observacionales disponibles y confiables. tanto a nivel temporal como espacial, comienzan en 1995. El estadístico KS permite cuantificar la diferencia máxima entre las funciones de distribución acumulada empíricas de dos muestras; en este caso, entre los datos observados y los generados por cada modelo y técnica de downscaling. Un valor de KS cercano a 0 indica que ambas distribuciones son similares, mientras que valores más altos (por ejemplo, superiores a 0.2–0.3) reflejan discrepancias notorias en la representación de la distribución.

La Figura 4-2 resume estos resultados mediante diagramas de caja. En el panel izquierdo se muestra el desempeño de todos los métodos evaluados: LIN (ajuste lineal), QM (Quantile Mapping), DQM (Detrended Quantile Mapping), QM2 (Quantile Mapping con adaptador de frecuencia), PSDM (Scaled Distribution Mapping) y RAW (los datos crudos de los modelos). Los boxplots agrupan la información de todas las estaciones ubicadas en la cuenca del río Túa, y se diferencian por color los tres modelos climáticos utilizados: CNR (verde), INM (naranja) y MPI (azul).

Los resultados muestran que los datos crudos (RAW) presentan, de manera consistente, valores elevados del estadístico KS, lo que refleja un bajo grado de representatividad de la distribución observada. El método LIN (ajuste lineal) tampoco evidencia mejoras sustanciales frente a los modelos sin corrección. En contraste, los métodos basados en cuantiles (QM, DQM y QM2) presentan un ajuste significativamente mejor, reduciendo las discrepancias y aproximando de manera más adecuada las distribuciones observadas. El método PSDM también ofrece un desempeño aceptable, aunque con mayor dispersión en los resultados respecto a las variantes de Quantile Mapping.

En el panel derecho de la Figura 4-2 se presentan únicamente aquellos casos en los que, además, se cumple la condición de significancia estadística (p -valor < 0.05). Este filtrado asegura que las diferencias observadas en el estadístico KS no son atribuibles al azar, otorgando mayor robustez a la validación. Tras aplicar este criterio, se observa que los métodos de corrección basados en cuantiles mantienen un desempeño consistente, confirmando su mayor capacidad para reproducir adecuadamente la distribución de las precipitaciones observadas.

El análisis evidencia que la aplicación de técnicas de reducción permitió mejorar la representación estadística de la precipitación en la región de estudio. Entre los métodos evaluados, Quantile

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEO PARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

Mapping (QM, DQM y QM2) se destacan por su solidez y consistencia, mientras que los modelos sin corrección (RAW) y el ajuste lineal (LIN) resultan insuficientes para capturar adecuadamente la distribución de los datos observacionales.

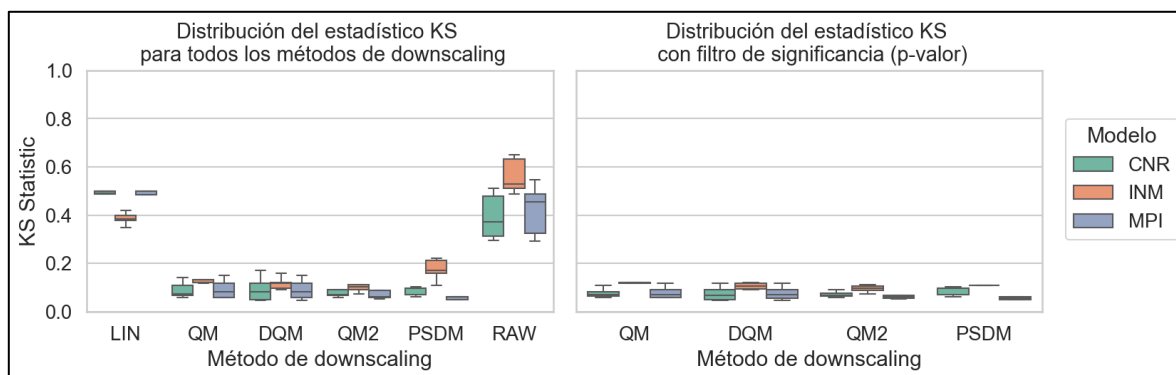


Figura 4-2. Distribución de estadístico KS para todos los modelos de circulación general y métodos de downscaling.

Fuente. Aqualogs (2025)

El siguiente paso en la evaluación de los métodos de reducción de escala consiste en analizar su desempeño mediante el índice de acuerdo (*Index of Agreement*, IOA). Esta métrica, ampliamente utilizada en la validación de modelos climáticos e hidrológicos, cuantifica la similitud entre las series observadas y simuladas, con valores que oscilan entre 0 (sin acuerdo) y 1 (ajuste perfecto). El IOA permite evaluar de manera integral tanto la correspondencia en magnitud como la capacidad del modelo para reproducir la variabilidad temporal.

La Figura 4-3 sintetiza estos resultados a través de diagramas de caja. En el panel izquierdo se presentan los valores de IOA obtenidos para todos los métodos de reducción de escala considerados (LIN, QM, DQM, QM2, PSDM y RAW), diferenciando los tres modelos climáticos utilizados: CNR (verde), INM (naranja) y MPI (azul). En el panel derecho se muestran únicamente aquellos casos que superaron el filtro de significancia estadística ($p < 0.05$) según la prueba de Kolmogórov-Smirnov, es decir, las series consideradas representativas y confiables para la comparación. De este modo, mientras el panel izquierdo ofrece una visión global del desempeño de los métodos, el panel derecho depura los resultados resaltando únicamente las simulaciones estadísticamente robustas.

Los resultados globales (panel izquierdo) indican que los datos crudos (RAW) y el ajuste lineal (LIN) presentan un bajo grado de acuerdo con las observaciones, lo que evidencia sus limitaciones para reproducir de manera adecuada la variabilidad de la precipitación. En contraste, los métodos basados en cuantiles (QM, DQM y QM2) alcanzan valores de IOA cercanos a 0.8–0.9, reflejando una mejora sustancial en la capacidad de los modelos para reproducir las series observadas. El método PSDM, aunque muestra un desempeño aceptable, presenta mayor dispersión en sus resultados.

Finalmente, tras aplicar el filtro de significancia estadística (panel derecho), se observa una depuración de las series y una mejora en la consistencia de los resultados. Esto confirma que las técnicas de corrección basadas en cuantiles no solo ofrecen un ajuste superior, sino que también mantienen un desempeño robusto bajo criterios de significancia, consolidándose como las

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEOPARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

metodologías más adecuadas para representar la distribución de la precipitación en la cuenca del río Túa y para aplicaciones en estudios de cambio climático.

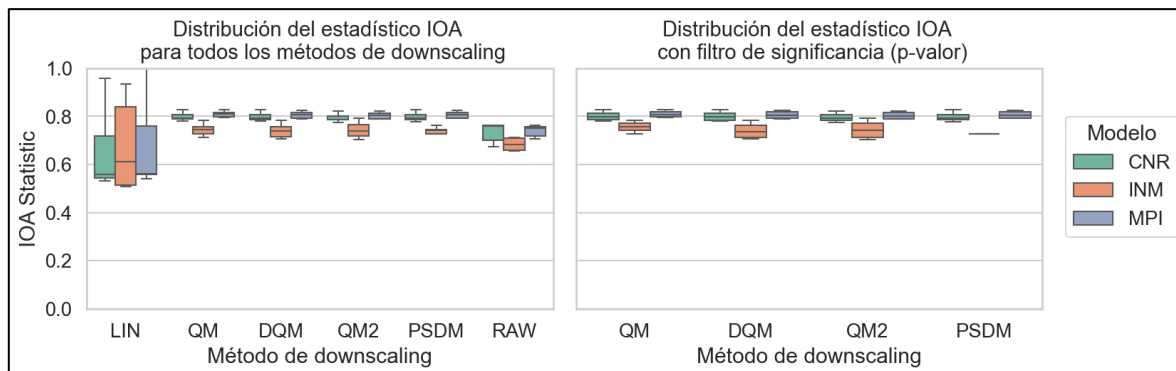


Figura 4-3. Distribución de estadístico IOA para todos los modelos de circulación general y métodos de downscaling.

Fuente. Aqualogs (2025)

4.2.2. Efecto del cambio climático sobre la precipitación

La Figura 4-4 presenta tres perspectivas complementarias para evaluar cómo los escenarios futuros de cambio climático podrían afectar la precipitación en la cuenca del río Túa: (A) climatología mensual, (B) curva de excedencia y (C) serie anual de precipitación. La figura se construyó utilizando únicamente las series de precipitación que superaron satisfactoriamente la prueba de Kolmogórov-Smirnov, las cuales, como también se mostró mediante el IOA, presentan un buen ajuste frente a las observaciones.

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEO PARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

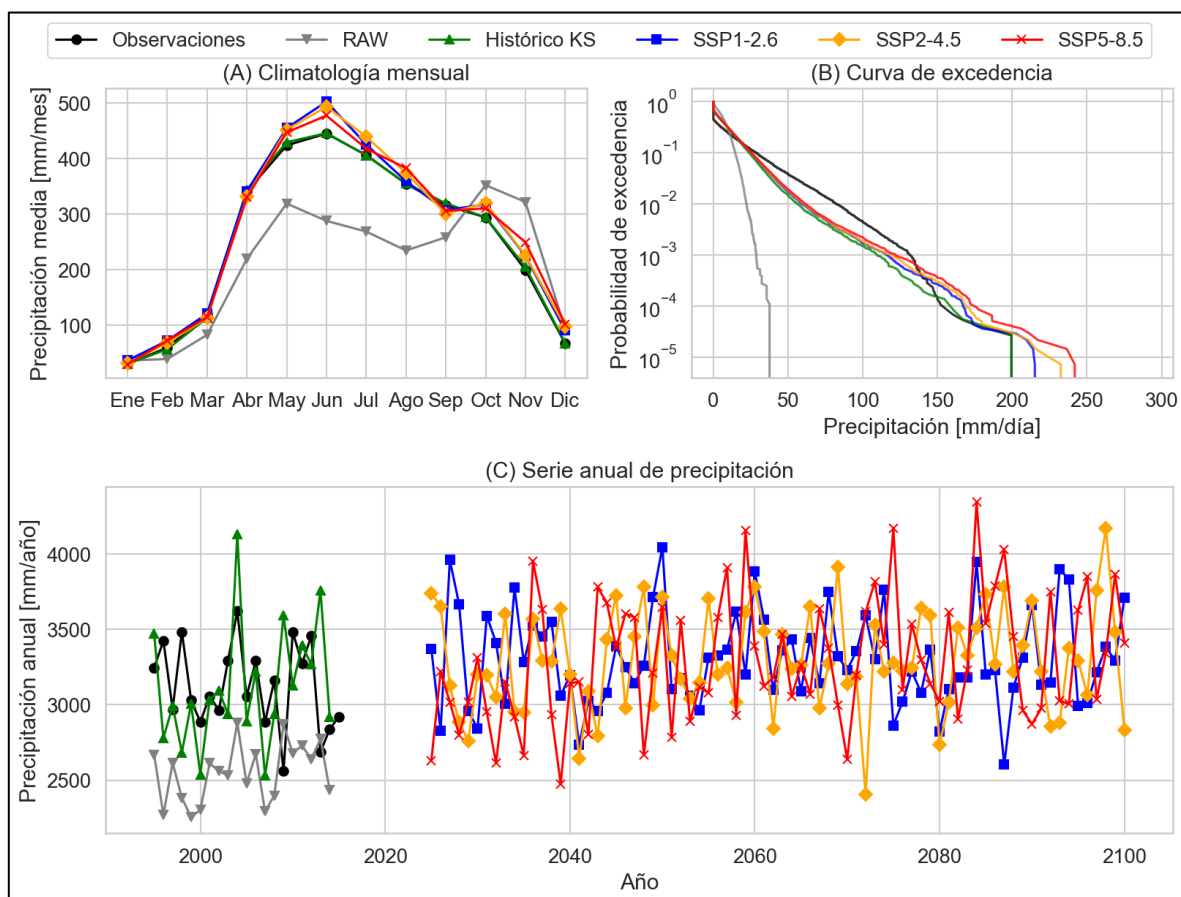


Figura 4-4. Evaluación de escenarios futuros de precipitación en la cuenca del río Túa mediante técnicas de reducción de escala. Panel A: climatología mensual; Panel B: curvas de excedencia; Panel C: serie anual. Se muestran los datos históricos crudos de los modelos (RAW), los modelos históricos corregidos (Histórico KS), las observaciones y los escenarios futuros corregidos SSP1-2.6, SSP2-4.5 y SSP5-8.5.

Fuente. Aqualogs (2025)

La climatología mensual (Panel A), muestra que las series derivadas de los métodos de reducción de escala, incluyendo los escenarios SSP1-2.6, SSP2-4.5 y SSP5-8.5, presentan un patrón estacional consistente con las observaciones históricas, con máximos en los meses de mayo-junio y mínimos en diciembre-enero. Sin embargo, los datos crudos (RAW) subestiman sistemáticamente la precipitación durante los meses de mayor intensidad, mientras que los métodos corregidos (Histórico KS y los escenarios SSP) logran una correspondencia más cercana con las observaciones, reflejando la eficacia de la reducción de escala en capturar, tanto la magnitud como la estacionalidad de la precipitación.

Las curvas de excedencia (Panel B) permiten evaluar la probabilidad de ocurrencia de precipitaciones extremas. Se observa que los escenarios futuros muestran un desplazamiento hacia valores mayores en los percentiles superiores de precipitación, particularmente en SSP2-4.5 y SSP5-8.5, lo que sugiere un aumento en la frecuencia o intensidad de eventos extremos. Los datos RAW presentan desviaciones significativas respecto a las observaciones, subestimando la probabilidad de

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

excedencia para eventos intensos, mientras que los métodos corregidos logran reproducir mejor la distribución observada. Esto refuerza la importancia de aplicar técnicas de downscaling antes de realizar proyecciones de cambio climático.

La serie anual (Panel C) indica una tendencia general hacia un aumento de la precipitación. Además, se aprecia una mayor variabilidad interanual en los escenarios futuros comparados con las observaciones históricas. Las técnicas de corrección aplicadas (Histórico KS) permiten una mejor alineación con los valores observados y facilitan la identificación de cambios proyectados de manera más confiable que los datos RAW.

En conjunto, los resultados de la Figura 4-4 indican que el cambio climático podría conducir a un aumento de la precipitación media anual y de la frecuencia de eventos extremos en la cuenca del río Túa, especialmente bajo los escenarios de mayor emisión (SSP2-4.5 y SSP5-8.5). Las técnicas de reducción de escala, incluyendo la corrección basada en cuantiles, son esenciales para obtener proyecciones robustas y confiables, ya que mejoran la correspondencia con los patrones históricos y permiten evaluar adecuadamente los impactos potenciales sobre la hidrología regional.

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEO PARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

5. Estudio hidrológico

5.1. Marco teórico

5.1.1. Escorrentía superficial – Modelo conceptual

La escorrentía superficial (también denominada *sheetflow* u *overland Flow*) se define como el flujo de agua de lluvia que no logra infiltrarse en el suelo y se desplaza por la superficie del terreno cuando se excede la capacidad de infiltración (Guo et al., 2019). En terrenos de baja pendiente (generalmente con gradientes inferiores a 1 %) el flujo superficial presenta velocidades reducidas y profundidades homogéneas, lo que favorece la formación de encharcamientos persistentes incluso en ausencia de obstáculos artificiales (Appels et al., 2016; Montgomery & Dietrich, 1995). La baja energía cinética asociada a este tipo de flujo extiende los tiempos de concentración de la cuenca y alarga la duración de los eventos de inundación, conformando hidrogramas con picos atenuados y retardados (Appels et al., 2017).

Si bien las obras lineales -como vías de acceso, y puntuales como diques y plataformas petroleras- pueden influir localmente la conectividad del flujo al crear barreras o zonas de acumulación aguas arriba (Kastridis, 2020), en cuencas de pendiente casi nula estos efectos suelen ser secundarios frente a la dominancia del control topográfico natural sobre la generación de escorrentía (Appels et al., 2016). La microtopografía natural -depresiones y pequeños surcos- actúa como almacén temporal de agua, aumentando el almacenamiento superficial efectivo y modulando la forma del hidrograma, sin intervención humana. Estudios en llanuras demuestran que, aún sin infraestructura, la combinación de gradiente muy suave y heterogeneidad del terreno superficial es suficiente para generar inundaciones recurrentes tras episodios de precipitación prolongada (Wohl et al., 2025).

En consecuencia, la caracterización de la escorrentía en zonas planas requiere modelos que integren la distribución espacial de la pendiente y la microtopografía, así como los procesos de infiltración y almacenamiento superficial, para diferenciar procesos inherentes a la geomorfología de aquellos inducidos por obras civiles. Esto sienta las bases para evaluar de forma precisa si los fenómenos de inundación observados corresponden principalmente a la topografía natural o si, por el contrario, las infraestructuras han alterado de manera significativa el régimen hidrológico de la zona.

5.1.2. TOP MODEL – Modelo numérico

Los modelos hidrológicos conceptuales representan el comportamiento lluvia-escorrentía mediante esquemas simplificados de reservorios que reproducen los procesos de acumulación, pérdida e intercambio de agua sin requerir discretizaciones espaciales finas ni modelación explícita del flujo superficial y subsuperficial en cada celda del terreno. Estos modelos logran una adecuada representación del hidrograma de crecienta con un número reducido de parámetros, lo que facilita la calibración y la transferencia a cuencas no instrumentadas (Devia et al., 2015).

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEO PARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

TOPMODEL (TOPography based hydrological MODEL) es una referencia clásica dentro de los modelos conceptuales semidistribuidos, desarrollado por (BEVEN & KIRKBY, 1979) para vincular la respuesta hidrológica a la topografía de la cuenca. Su base de cálculo es el Índice Topográfico (TWI), descrito como:

Ecuación 5-1 Índice topográfico

$$TWI = \ln\left(\frac{a}{\tan\beta}\right)$$

Donde a es el área de captación acumulada y β es la pendiente local, permitiendo estimar la proporción de la cuenca que contribuye a la escorrentía subsuperficial bajo diferentes condiciones de humedad del suelo.

La estructura del TOPMODEL se basa en tres componentes principales:

- Balance de agua en el suelo, que calcula el déficit de humedad y las pérdidas por evapotranspiración potencial;
- Generación de escorrentía, donde el flujo saturado en cada celda se obtiene a partir de la función exponencial del déficit de agua del suelo, y
- Enrutamiento distribuido, que semidistribuye los aportes al cauce principal considerando la topografía y la conectividad del terreno.

La implementación del TOPMODEL requiere como insumos principales un Modelo Digital de Elevación (DEM) para calcular el TWI, series temporales de precipitación y evapotranspiración potencial, así como parámetros de transmisividad inicial del suelo, entre otros.

En cuencas de pendiente muy suave, la variabilidad espacial del TWI puede ser menor, pero un DEM de alta resolución conserva zonas de microcuencas diferenciales que permiten discriminar áreas saturables (Sørensen & Seibert, 2007). Además, múltiples validaciones en contextos tropicales han demostrado que, pese a su simplicidad, TOPMODEL reproduce razonablemente el hidrograma de creciente cuando se dispone de datos de entrada de calidad y se emplea un esquema de enrutamiento potencial simple (Gil & Tobón, 2016).

Finalmente, TOPMODEL facilita la transferencia de parámetros a zonas no instrumentadas mediante relaciones basadas en el TWI y otras variables morfométricas, lo que es particularmente valioso para estudios de línea base en áreas con datos limitados (Devia et al., 2015).

5.1.3. Criterios de desempeño del modelo – Calibración y validación

La calibración y validación del modelo hidrológico son etapas fundamentales para asegurar que las simulaciones reproduzcan de forma fiable los hidrogramas observados y para cuantificar la incertidumbre inherente al proceso de modelado. Durante la calibración, se ajustan los parámetros del modelo para maximizar índices de desempeño como el coeficiente de eficiencia de Nash–

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEO PARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

Sutcliffe (NSE) y minimizar el error cuadrático medio (RMSE). Posteriormente, la validación emplea datos independientes o técnicas de división de muestras (como split-sample o cross-validation) para evaluar la robustez de los parámetros calibrados y estimar la incertidumbre de las predicciones mediante enfoques como GLUE o Monte Carlo.

La calibración busca minimizar la discrepancia entre el caudal simulado y el observado, ajustando iterativamente los parámetros del modelo hidrológico. Este proceso puede llevarse a cabo mediante algoritmos heurísticos, como el Shuffled Complex Evolution (SCE-UA), o métodos de optimización formal, como PEST, que exploran eficientemente el espacio de variación de los parámetros.

Las métricas más utilizadas son varias, entre las cuales se incluyen: i) Coeficiente de eficiencia de Nash–Sutcliffe (NSE), el cual mide la habilidad del modelo para reproducir la varianza de la serie observada. Un valor de $NSE = 1$ indica un ajuste perfecto, mientras que valores $NSE \leq 0$ sugieren que el modelo es menos efectivo que la media observada; ii) Error cuadrático medio (RMSE), el cual cuantifica el error medio de las simulaciones en las mismas unidades del caudal, permitiendo una valoración intuitiva del sesgo y la dispersión de los errores, y iii) Eficiencia de Kling–Gupta (KGE), el cual combina sesgo, correlación y variabilidad en un único indicador, ofreciendo una alternativa más equilibrada frente al NSE. Las ecuaciones de cada modelo se presentan como:

Ecuación 5-2 Coeficiente de eficiencia de Nash–Sutcliffe (NSE).

$$NSE = 1 - \frac{\sum (Y_{obs} - Y_{mod})^2}{\sum (Y_{obs} - \bar{Y}_{obs})^2}$$

Ecuación 5-3 Error cuadrático medio (RMSE).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (Y_{obs} - Y_{mod})^2}$$

Ecuación 5-4 Eficiencia de Kling–Gupta.

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + \left(\frac{\sigma_{mod}}{\sigma_{obs}} - 1\right)^2 + \left(\frac{\mu_{mod}}{\mu_{obs}} - 1\right)^2}$$

Donde Y_{obs} es el dato observado de la serie; Y_{mod} el dato modelado de la serie; $\bar{Y}_{obs}$ el promedio de los datos observados de la serie; n el número de datos de la serie; r el coeficiente de correlación de Pearson; σ_{mod} la desviación estándar de los valores modelados; σ_{obs} la desviación estándar de los datos observados; μ_{obs} el promedio de los datos observados y μ_{mod} el promedio de los datos modelados.

TOPMODEL, en su implementación en el entorno R, requiere un conjunto de parámetros hidrológicos que controlan el almacenamiento, el flujo subsuperficial, la escorrentía superficial y el desplazamiento del agua en la cuenca. Estos parámetros, físicamente interpretables, permiten

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEO PARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

representar el comportamiento hidrológico de la cuenca a partir de su topografía, propiedades del suelo y régimen hidrometeorológico. En este estudio, se adoptaron los siguientes parámetros:

- **qs0:** flujo base inicial por unidad de área. Representa el flujo subsuperficial previo al inicio de la simulación, asociado a las condiciones húmedas iniciales del sistema.
- **InTe:** logaritmo natural de la transmisividad del suelo en saturación. Controla la magnitud del flujo lateral subsuperficial y se relaciona con la textura del suelo y la profundidad efectiva del perfil saturado.
- **m:** parámetro que controla la tasa de disminución de la transmisividad con incremento del déficit de almacenamiento. Describe la forma en que la transmisividad del suelo decae exponencialmente con la profundidad.
- **Sr0:** almacenamiento inicial en la zona radicular. Controla el estado de humedad inicial del suelo y su capacidad de generar escorrentía por saturación.
- **Srmax:** almacenamiento máximo en la zona radicular. Representa la capacidad de retención del suelo antes de que se inicie el flujo superficial o subsuperficial.
- **td:** tiempo de retraso en la zona no saturada por unidad de déficit de humedad. Define el retardo entre el inicio de la lluvia y la llegada del flujo a la zona saturada activa, modulando el ascenso del nivel freático.
- **vch:** velocidad del flujo de escorrentía superficial fuera de la cuenca, generalmente asociado al tiempo de concentración del sistema de drenaje.
- **vr:** velocidad del flujo superficial en la cuenca. Controla el desplazamiento de la escorrentía desde los puntos de generación hasta la salida de la cuenca.
- **k0:** conductividad hidráulica superficial. Representa el potencial de infiltración inicial del suelo y regula la magnitud de escorrentía directa frente a un evento de lluvia.
- **CD:** coeficiente de capilaridad. Modula el efecto de succión capilar en la recarga del perfil del suelo y en la redistribución vertical del agua.
- **dt:** intervalo de tiempo de cálculo del modelo. Define la resolución temporal de las simulaciones y debe ser coherente con la frecuencia de los datos de entrada (precipitación y caudal).

La calibración de estos parámetros se realiza optimizando métricas de desempeño como el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) y el error cuadrático medio (RMSE), evaluando la concordancia entre caudales simulados y observados. Algunos estudios comparativos han mostrado que, con una calibración adecuada, el TOPMODEL puede alcanzar $NSE > 0.7$ en cuencas de variadas pendientes, incluyendo aquellas con gradientes moderados a bajos (Jeziorska & Niedzielski, 2018).

5.1.4. Tránsito de caudales

El tránsito de caudales mediante el método de Muskingum - Cunge es una técnica de modelación hidrológica de tipo concentrado y lineal que permite simular la propagación de una onda de crecida a lo largo de un tramo de río o canal. El procedimiento se basa en una relación de almacenamiento que combina componentes prismáticos (asociados al caudal de salida) y wedge o de onda (asociados a la diferencia entre los caudales de entrada y salida). Para la aplicación del método es necesario

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEOPARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

contar con series de caudal medidas en la entrada y en la salida del tramo, lo que permite estimar los parámetros característicos del modelo: el coeficiente de almacenamiento **K** (tiempo de retardo del flujo) y el parámetro de ponderación **X** (que define la importancia relativa entre los caudales de entrada y salida en el almacenamiento). (Chow, 1959).

Este método propone que el caudal en la salida depende del caudal en la entrada en ese momento y tanto el caudal en la entrada como el caudal en la salida en un paso de tiempo previo. Como se muestra en la Ecuación 5-5 Muskingum - Cunge.

Ecuación 5-5 Muskingum - Cunge.

$$O_i = C0 * I_i + C1 * I_{i-1} + C2 * O_{i-1}$$

Donde O_i es el caudal en la salida en un momento i , I_i es el caudal en la entrada en un momento i , I_{i-1} es el caudal en la entrada en un momento $i-1$ y O_{i-1} es el caudal en la salida en un momento $i-1$. Los parámetros $C0$, $C1$ y $C2$ son parámetros asociados a las suposiciones del volumen de agua y se calculan a partir de las siguientes ecuaciones.

Ecuación 5-6 Parámetros de la ecuación de Muskingum - Cunge.

$$C0 = \frac{-KX + 0.5 * \Delta t}{K - KX + 0.5\Delta t}$$

$$C1 = \frac{KX + 0.5 * \Delta t}{K - KX + 0.5\Delta t}$$

$$C2 = \frac{K - KX - 0.5 * \Delta t}{K - KX + 0.5\Delta t}$$

Donde, k es una constante de almacenamiento del volumen de agua en función del tiempo y x es un factor que muestra la influencia del caudal a los niveles. (Cunge, 1969) propone una aproximación de estos parámetros dadas las condiciones del canal, donde:

Ecuación 5-7 Parámetros espaciales propuestos por Cunge.

$$K = \frac{\Delta x}{c}$$

$$X = \frac{1}{2} * \left(1 - \frac{Q}{B * S_0 * c * \Delta x} \right)$$

Siendo c la celeridad correspondiente a Q y B , B el ancho de la superficie del agua, Δx la longitud de un tramo, Q el caudal y S_0 es la pendiente del río. (Cunge, 1969)

Suponiendo que, en el tránsito a un punto intermedio partiendo únicamente de los datos disponibles en las estaciones de límite, la única variable que cambia es Δx . Se asume que el desfase temporal entre dichos puntos se explica exclusivamente por la diferencia en longitud del tramo. Siguiendo:

$$\Delta x_{intermedio} = n * \Delta x_{total}$$

Obteniendo

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEO PARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

$$K_{intermedio} = \frac{1}{n} * K_{total}$$

$$X_{intermedio} = \frac{1}{n} * \left(\frac{1}{2} * (n - 1) + X_{total} \right)$$

Siendo estas ecuaciones las utilizadas para realizar el cálculo del caudal asociado al río Upía.

5.2. Modelación hidrológica

5.2.1. TOPMODEL

La implementación del modelo hidrológico TOPMODEL requiere como insumo principal una caracterización espacial detallada de la cuenca, a partir de la cual se derivan tanto la estructura topográfica como las condiciones de suelo y cobertura. En este capítulo, se muestra la preparación de los insumos del modelo mediante el procesamiento de un modelo digital de elevación y el cálculo del índice topográfico (TWI), las series hidrológicas empleadas y los parámetros iniciales para la modelación.

5.2.1.1. Cálculo del Índice Topográfico de Humedad (TWI)

Para el cálculo del TWI se utilizó un DEM del tipo SRTM con resolución espacial de 30 × 30 metros, el cual fue procesado en el software QGIS. Como parte del preprocesamiento, se realizó una corrección de sumideros mediante el algoritmo de (Wang & Liu, 2006), implementado en el módulo de SAGA GIS, con el fin de garantizar la conectividad topológica del flujo superficial y permitir un adecuado cálculo de la dirección de flujo. Esta corrección es fundamental para evitar discontinuidades en la red de drenaje simulada y para que el cálculo posterior del índice topográfico sea representativo.

Una vez corregido el modelo de elevación, se calculó el Índice Topográfico de Humedad (TWI), el cual representa la tendencia de cada celda del terreno a acumular humedad en función de la pendiente local y la acumulación de área aportante. El índice se calculó utilizando el módulo “Topographic Wetness Index” de SAGA GIS, empleando la dirección de flujo tipo D8 para la derivación del mapa de pendientes y la acumulación de flujo. La acumulación específica de área se estimó mediante herramientas del sistema GRASS GIS, garantizando compatibilidad y resolución homogénea con el modelo de elevación base.

El TWI se generó inicialmente como un ráster continuo y posteriormente se zonificó en clases discretas, con el fin de facilitar la parametrización del modelo y la asignación de variables hidrológicas a unidades homogéneas de respuesta topográfica. Las clases identificadas para cada subcuenca son las siguientes:

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEO PARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

Tabla 5-1. Parámetros iniciales empleados para el Topmodel.

Cabuyarito		Cusiana		El Charte		Túa	
Clase	Frecuencia	Clase	Frecuencia	Clase	Frecuencia	Clase	Frecuencia
12.3	5.8E-03	23.4	4.6E-06	14.6	3.2E-05	12.7	4.5E-04
11.5	1.9E-01	21.8	1.2E-04	13.7	4.1E-05	11.9	4.0E-02
10.8	9.9E-02	20.2	2.7E-04	12.7	2.2E-04	11.1	1.4E-01
10.1	9.1E-03	18.6	1.9E-03	11.8	4.3E-03	10.3	7.6E-02
9.3	2.0E-03	17	6.8E-03	10.8	1.2E-02	9.5	1.3E-02
8.6	1.2E-02	15.4	6.7E-03	9.8	2.5E-02	8.7	2.8E-02
7.9	6.6E-02	13.8	2.8E-02	8.9	4.9E-02	7.9	6.9E-02
7.1	1.2E-01	12.2	2.5E-02	7.9	9.4E-02	7.1	1.4E-01
6.4	2.0E-01	10.6	1.0E-01	6.9	1.6E-01	6.3	1.9E-01
5.7	2.0E-01	9	1.6E-01	6.0	2.4E-01	5.5	2.0E-01
5.0	8.4E-02	7.4	1.0E-01	5.0	2.7E-01	4.8	8.3E-02
4.2	1.3E-02	5.8	3.5E-01	4.1	1.3E-01	4.0	2.1E-02
3.5	2.0E-03	4.2	1.6E-01	3.1	9.8E-03	3.2	4.7E-03
2.8	8.1E-05	2.6	5.1E-02	2.1	3.7E-04	2.4	6.1E-04
2.0	1.8E-05	1	1.8E-04	1.2	3.8E-05	1.6	5.1E-05

5.2.1.2. Series climatológicas empleadas

El insumo meteorológico principal para la implementación de TOPMODEL corresponde a las series diarias de precipitación y evapotranspiración, las cuales fueron procesadas y consolidadas para representar adecuadamente la condición de entrada hídrica a escala de cuenca.

Dado que existen múltiples estaciones de lluvia dentro de la cuenca, se implementó una estrategia de consolidación basada en el análisis del coeficiente de correlación de Pearson entre cada serie de precipitación y la serie de caudal observada. Este análisis permite cuantificar la coherencia hidrológica entre la lluvia registrada en cada punto y la respuesta hidrológica integrada de la cuenca. En lugar de seleccionar una sola estación o aplicar un promedio aritmético, se construyó una serie de lluvia ponderada, en la que cada estación contribuye proporcionalmente al valor de su correlación con el caudal. La expresión general utilizada para calcular la precipitación ponderada diaria fue:

Ecuación 5-8 Cálculo de la precipitación ponderada diaria.

$$P_t = \frac{\sum_{i=1}^n (r_i P_{i,t})}{\sum_{i=1}^n r_i} \quad [11]$$

donde P_t es la precipitación diaria ponderada para la cuenca en el día t ; $P_{i,t}$ la precipitación registrada en la estación i el día t ; r_i el coeficiente de correlación de Pearson entre la serie de lluvia de la estación i y el caudal observado en la estación limnimétrica y n el número de estaciones utilizadas.

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEO PARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

Además, se tomaron los datos de caudal medio diario registrados en los puntos de cierre de las cuencas de Cabuyarito, Cusiana y El Charte. Dichas estaciones son: PUENTE CABUYARITO [35107010], MANI [35197180] y EL CHARTE [35197040], respectivamente.

5.2.1.3. Parámetros del modelo

Dado que no se dispone de mediciones locales detalladas para todos los parámetros, los valores iniciales fueron tomados de estudios hidrológicos previos realizados en cuencas andinas de Colombia, Ecuador y Venezuela (Gil & Tobón, 2016; Yeguez et al., 2019), con características físicas y climáticas comparables. Estos estudios ofrecen rangos de referencia confiables para cuencas tropicales.

La asignación inicial de parámetros fue homogénea para todas las subcuencas, y su ajuste se realizó posteriormente mediante procedimientos de calibración automática. Esta estrategia asegura consistencia metodológica y permite identificar, en etapas posteriores, las sensibilidades específicas de cada parámetro respecto a la respuesta hidrológica simulada. Los parámetros iniciales utilizados se presentan en la siguiente tabla (cabe resaltar que el tiempo dependerá de la escala de datos disponible, que a nivel diario es de 24 horas):

Tabla 5-2. Parámetros iniciales empleados para el Topmodel.

Parámetro	Unidad	Valor
qs0	m	5.9×10^{-5}
lnTe	m ² /h	2.58
m	-	0.02
Sr0	m	0.05
Srmax	m	0.17
td	h/m	8.13
vch	m/h	1000
vr	m/h	206.6
k0	m/h	0.98
CD	-	3.9
dt	h	24

5.2.1.4. Modelación en cuencas hidrológicamente similares

Se seleccionaron periodos continuos de al menos dos años con registros diarios completos en la estación Puente Cabuyarito, con el fin de asegurar la integridad hidrológica de los balances simulados. Esta ventana temporal permite representar adecuadamente las fases de humectación y secado de la cuenca, el llenado progresivo de los almacenes subsuperficiales y la generación de escurrimiento por saturación acumulada, todos ellos procesos esenciales para la calibración de los parámetros de almacenamiento y transmisividad del modelo.

Los caudales diarios también permiten verificar la correcta replicación de la estacionalidad en la generación de escurrimiento, así como la capacidad del modelo para reproducir los picos de caudal asociados a eventos de lluvia significativos sin requerir una resolución temporal fina. En este sentido, se analizaron las fluctuaciones estacionales, las tendencias de ascenso y recesión de caudal,

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEO PARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

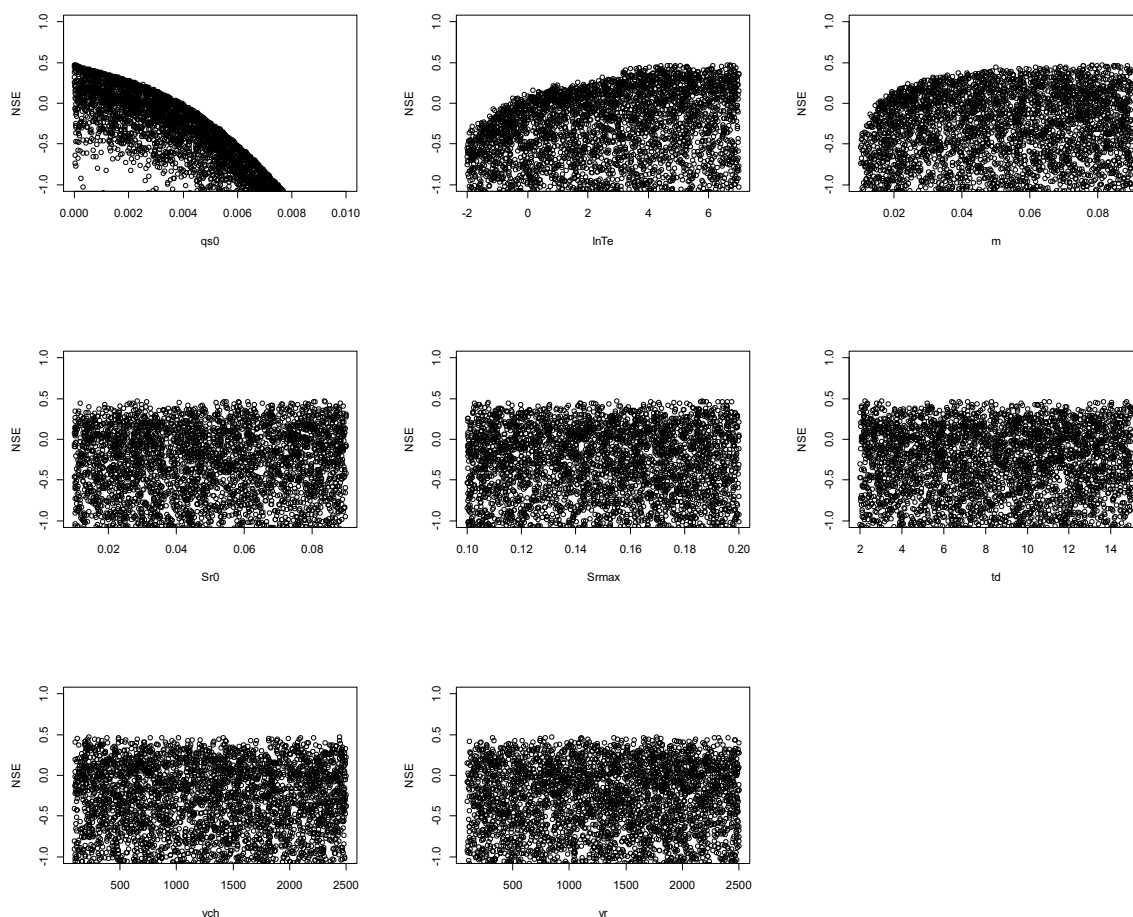
y la magnitud de los caudales medios y máximos, a fin de identificar patrones consistentes con la respuesta física esperada de la cuenca.

En cada cuenca, la serie diaria se usó como referencia para evaluar el desempeño del modelo calibrado en términos las medidas de desempeño presentadas en el capítulo 5.2.1.3 Parámetros del modelo , y del ajuste visual del hidrograma simulado frente a los registros observados. Esto permitió depurar combinaciones de parámetros poco realistas y validar el comportamiento del modelo en condiciones hidrometeorológicas variadas, incluyendo tanto periodos húmedos como secos.

Tabla 5-3. Fechas de las series de tiempo para cuencas hidrológicamente similares.

Cuenca	Fecha inicial	Fecha final
Cabuyarito	28 de marzo de 2019	20 de mayo de 2022

Se realizó un análisis de sensibilidad mediante doty plots, para identificar las diferencias en el grado de influencia de cada parámetro sobre el desempeño del modelo TOPMODEL, medido con el coeficiente NSE. A continuación, se presenta el resultado.



Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEO PARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

Los parámetros qs_0 (flujo base inicial), $\ln Te$ (logaritmo de la transmisividad efectiva) y m (parámetro de control de distribución del almacenamiento con el TWI) mostraron una alta sensibilidad, evidenciada por la aparición de zonas bien definidas con valores altos de NSE en rangos específicos. En particular, qs_0 presentó una relación inversa clara, donde valores superiores a 0.004 condujeron sistemáticamente a un deterioro en el ajuste del modelo, lo cual confirma su rol crítico en el control del sesgo positivo sobre el caudal base. Por su parte, $\ln Te$ mostró una tendencia creciente, con mejores desempeños concentrados en valores por encima de 4.0, coherente con la necesidad de representar una mayor capacidad de drenaje lateral en terrenos de pendiente baja. El parámetro m , si bien menos pronunciado, también demostró que valores intermedios (0.05–0.09) permiten una mejor representación de la variabilidad espacial en la saturación del suelo.

En contraste, los parámetros Sr_0 , Sr_{max} , td , vch , vr , k_0 y CD exhibieron una baja sensibilidad individual, reflejada en una dispersión homogénea de los valores de NSE a lo largo de sus respectivos rangos de prueba. Esta respuesta sugiere que estos parámetros no tienen un efecto dominante sobre el ajuste hidrológico en la escala diaria considerada, o que su influencia se encuentra condicionada por interacciones no lineales con otros parámetros.

En consecuencia, el proceso de calibración priorizó la optimización dirigida de qs_0 , $\ln Te$ y m , mientras que los parámetros de baja sensibilidad pueden mantenerse dentro de rangos razonables definidos a partir de la literatura o ajustarse mediante métodos menos intensivos computacionalmente.

El conjunto de parámetros óptimo para la subcuenca hidrológicamente similar es:

Tabla 5-4. Parámetros óptimos resultantes para cuencas pivote sujetas a calibración diaria.

Parámetro	Unidad	Cabuyarito
qs_0	m	6.3×10^{-4}
$\ln Te$	m^2/h	2.80
m	-	0.018
Sr_0	m	0.064
Sr_{max}	m	0.200
td	h/m	8.00
vch	m/h	317.0
vr	m/h	200.0
k_0	m/h	6.31
CD	-	4.35
dt	h	24

A partir de los parámetros de la cuenca del Cabuyarito, se observa que el incremento de qs_0 (6.3×10^{-4} m), combinado con un $\ln Te$ de solo $2.80 \text{ m}^2/h$ y un m bajo (0.018), sugiere un sistema en el que el flujo base inicial y el almacenamiento confinado dominan la descarga; la baja variabilidad espacial de saturación hace que la cuenca actúe como un reservorio con respuesta más lenta. El valor relativamente elevado de Sr_{max} (0.20 m) confirma que se requiere una mayor capacidad de almacenamiento para atenuar las crecidas, mientras que el retardo hidráulico más largo ($td = 8 \text{ h/m}$) y el contraste entre velocidades de canal ($vch \approx 317 \text{ m h}^{-1}$) y tributario ($vr \approx 200 \text{ m h}^{-1}$) generan hidrogramas con picos menos abruptos y colas alargadas. En la Figura 5-1 se observa un ajuste

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEO PARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

aceptable en los caudales base y en la fase de ascenso, pero con cierta subestimación del pico máximo, lo que confirma que la dinámica está gobernada por grandes volúmenes de agua almacenados y una liberación gradual, típica de llanuras aluviales extensas. Se presenta los resultados de la calibración para la cuenca de Cabuyarito, incluyendo las curvas de caudal observado y simulado, la precipitación diaria y las métricas obtenidas.

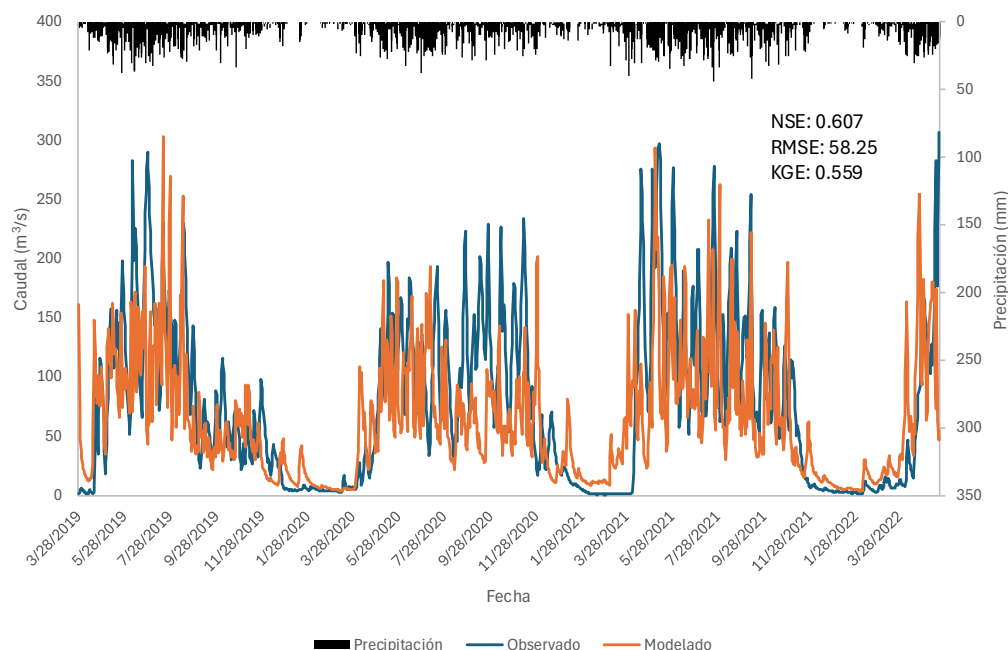


Figura 5-1. Resultados de calibración para la cuenca Cabuyarito.

Fuente. Aqualogs (2025)

De manera similar, se calibraron los parámetros del modelo para eventos a escala horaria; sin embargo, solo se encontraron disponibles datos de caudal con esta resolución, en la estación de Maní (correspondiente a la cuenca de Cusiana). Infortunadamente, no se logró la recolección y procesamiento de precipitación a escala horaria en ninguna de las estaciones presentes en el área de estudio. Sin embargo, y como parte de la estimación y cuantificación de la incertidumbre asociada a la respuesta del modelo, se realizó un análisis de sensibilidad de los parámetros ante la respuesta a esta escala temporal. El procedimiento consistió en seleccionar un evento de creciente en el río Cusiana, a la altura de la estación Maní [35197180], e intentar representar el mismo con el valor de precipitación total diaria de los días precedentes.

En este caso, se tomó el evento registrado desde el 26 de diciembre de 2019 a las 00:00, hasta el 30 de diciembre de 2019 a las 23:00. Se revisaron los datos de precipitación entre las estaciones seleccionadas, y se obtuvo un valor total diario de 24.8 mm, 3.5 mm y 0.0 mm para los días 25, 26 y 27 de diciembre de ese año. El acumulado diario se distribuyó de forma uniforme.

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEO PARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

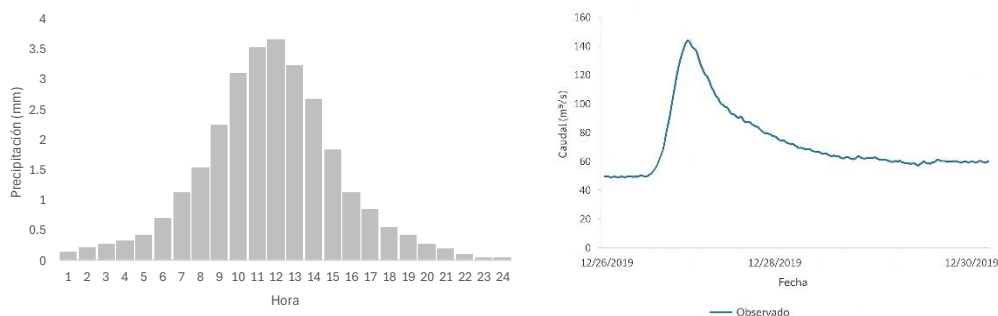


Figura 5-2. Series de calibración horaria.

Fuente. Aqualogs (2025)

A partir de la serie de precipitación utilizada como insumo y de la serie de caudal generada a nivel horario, se llevó a cabo un análisis de sensibilidad paramétrica del modelo hidrológico. Este procedimiento permitió evaluar la influencia de los parámetros en el comportamiento del modelo y su capacidad de representar adecuadamente la respuesta hidrológica de la cuenca. Los resultados obtenidos se presentan a continuación.

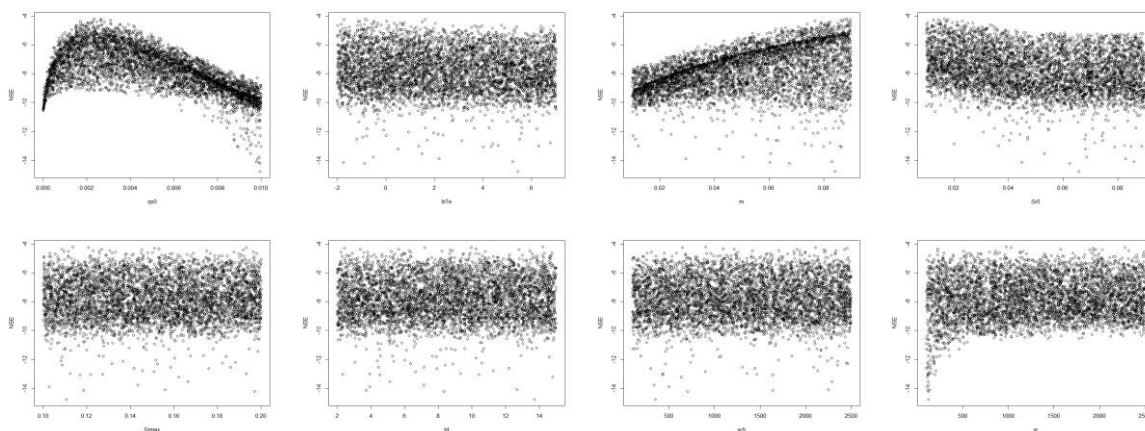


Figura 5-3. Análisis de sensibilidad de parámetros horarios.

Fuente. Aqualogs (2025)

El conjunto “óptimo” de parámetros para esta condición particular, junto con la mejor respuesta del modelo, se muestra a continuación.

Tabla 5-5. Parámetros óptimos resultantes para cuencas pivote sujetas a calibración subdiaria.

Parámetro	Unidad	Valor
qs0	m	5.9×10^{-3}
lnTe	m ² /h	-1.79
m	-	0.295
Sr0	m	0.0114
Srmax	m	0.315
td	h/m	12.41
vch	m/h	1652.2
vr	m/h	1678.7
k0	m/h	7.22

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEO PARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

CD	-	2.49
dt	h	1.0

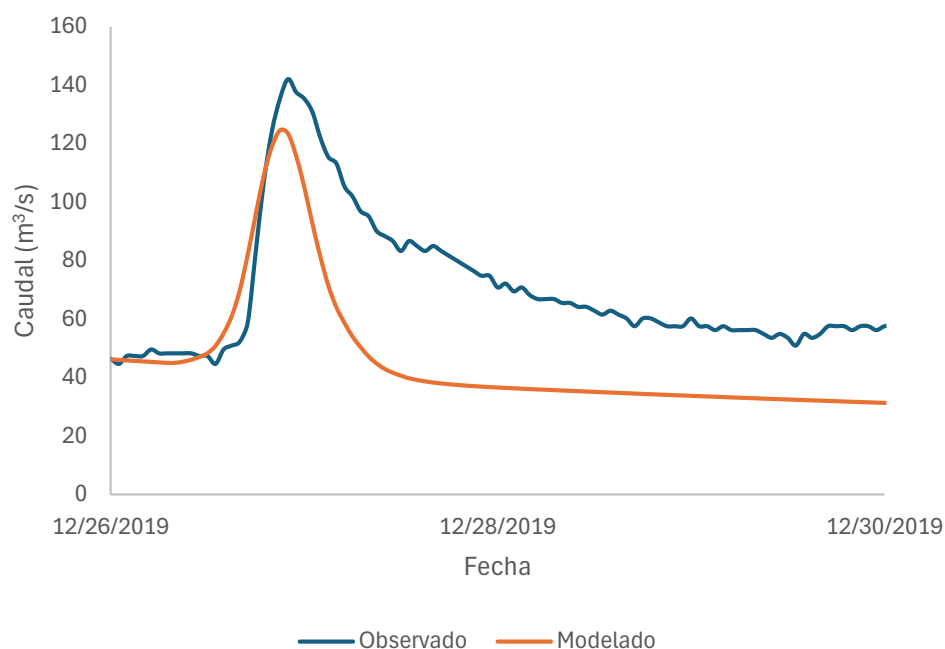


Figura 5-4. Resultados de calibración a nivel horario.

Fuente. Aqualogs (2025)

Las divergencias entre los conjuntos de parámetros (i.e. diario y horario) son consecuencia directa de la escala temporal de la información utilizada para la calibración y de los procesos hidrológicos que dominan en cada horizonte. Al pasar a la escala horaria el modelo debe capturar la cinemática de la lluvia-escorrentía: el caudal máximo, la hora exacta del pico y la recesión inmediata. Esto exige un S_{rmax} mucho mayor (0.315 m) que permita acumular la lluvia intra-diaria y liberar gran parte en pocas horas; simultáneamente, el déficit inicial (S_{r0}) se eleva un orden de magnitud para evitar que el sistema arranque saturado y genere picos. El incremento drástico de m (0.30) amplifica la activación de las áreas de alto TWI a medida que se aproxima la saturación, mientras que la fuerte reducción de $lnTe$ a valores negativos compensa la salida lateral excesiva durante las primeras horas y evita que el caudal base domine el hidrograma subdiario. La mayor velocidad en el cauce principal ($v_{ch} \approx 1650 \text{ m h}^{-1}$) junto con el retardo hidráulico extendido ($td \approx 12 \text{ h m}^{-1}$) reproduce la llegada casi instantánea de la escorrentía superficial seguida de una recesión más prolongada.

La coherencia entre ambos juegos de parámetros se aprecia en que los controles de masa a largo plazo permanecen compatibles: q_{s0} horario, aunque mayor, sigue del mismo orden de magnitud que el flujo base medio diario; y la suma de almacenamiento superficial (S_{rmax}) y profundidad de encharcamiento generada en los eventos horaria produce, integrado a 24 h, volúmenes de agua equivalentes a los reproducidos por la calibración diaria. Por ello la calibración diaria es útil como

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEO PARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

punto de partida y ancla de estabilidad: garantiza que el modelo conserve el balance hídrico y la recesión estacional correctos. La calibración horaria, a su vez, afina los parámetros asociados a la respuesta rápida sin perder el trasfondo de almacenamiento impuesto por la escala diaria. En aplicaciones prácticas (e.g. estimar caudales pico para periodos de retorno o evaluar el riesgo de desbordamiento) se recomienda emplear la calibración diaria para balance anual y baseflow, y superponer la calibración horaria cuando se requiera la forma precisa del hidrograma de crecida, explicitando que ambos ajustes son consistentes porque representan, en diferentes escalas, los mismos procesos hidrológicos, pero con pesos relativos distintos.

5.2.1.5. Modelación en cuencas río Túa

La modelación hidráulica constituye un proceso en el cual, a partir de diferentes insumos aplicados sobre un dominio previamente definido, se generan resultados que permiten representar la dinámica del flujo en condiciones específicas. Estos resultados se consolidan como insumos fundamentales para el modelo hidráulico descrito en el Tomo 4 del presente estudio (04_Análisis Hidráulico). En este capítulo se presentan los dominios de simulación, así como los hietogramas empleados, considerando escenarios con y sin la influencia del cambio climático.

5.2.1.5.1. Subdominios

Los subdominios se definen como áreas en las cuales, debido a su proximidad geográfica y similitud espacial, se asume que tanto la precipitación como los parámetros hidrológicos no presentan variaciones significativas entre ellas. Para el presente estudio se consideraron como subdominios las siguientes unidades: cuenca Aguaverde, cuenca Las Camelias, cuenca Clavelino, cuenca Huesero, cuenca Piñalito y la cuenca del río Túa. Estos subdominios se presentan en la Figura 5-5. y en la carpeta A2_Climatología.

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEO PARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

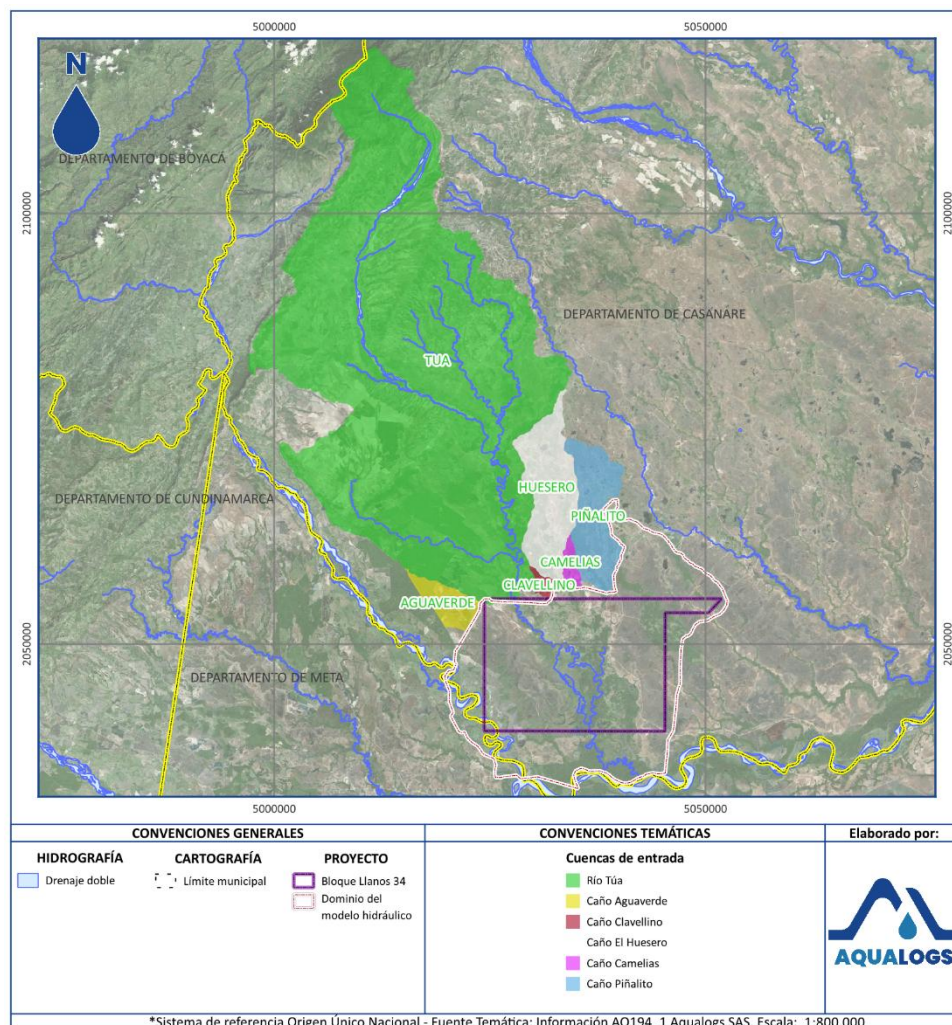


Figura 5-5. Subdominios sistema Túa.

Fuente. Aqualogs (2025)

5.2.1.5.2. Análisis de las series de tiempo

El análisis de frecuencia de eventos extremos tiene como propósito estimar las precipitaciones máximas esperadas para diferentes periodos de retorno, las cuales son requeridas como insumo para la construcción de hietogramas de diseño y la simulación de eventos críticos en modelos hidrológicos e hidráulicos. Este análisis se basa en la teoría de probabilidades aplicada a máximos anuales o eventos que superan ciertos umbrales, bajo el supuesto de que las precipitaciones máximas anuales pueden ser modeladas como variables aleatorias independientes e idénticamente distribuidas.

Previo al ajuste de distribuciones de probabilidad, se realizó una revisión tanto gráfica como estadística de las series de máximos anuales de precipitación media diaria para cada estación. Esta

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEO PARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

etapa fue fundamental para identificar posibles inconsistencias, comportamientos atípicos o patrones no representativos que pudieran afectar la validez del análisis de frecuencia. La Figura 5-6 presenta la evolución temporal de la precipitación máxima anual registrada en cada estación evaluada. Cabe aclarar que, dado que la estimación de caudales para distintos periodos de retorno se aplica exclusivamente en la zona de estudio, en esta sección se consideran únicamente las estaciones correspondientes a la cuenca del río Túa, por ser esta la directamente implicada en el análisis y en área objeto de modelación

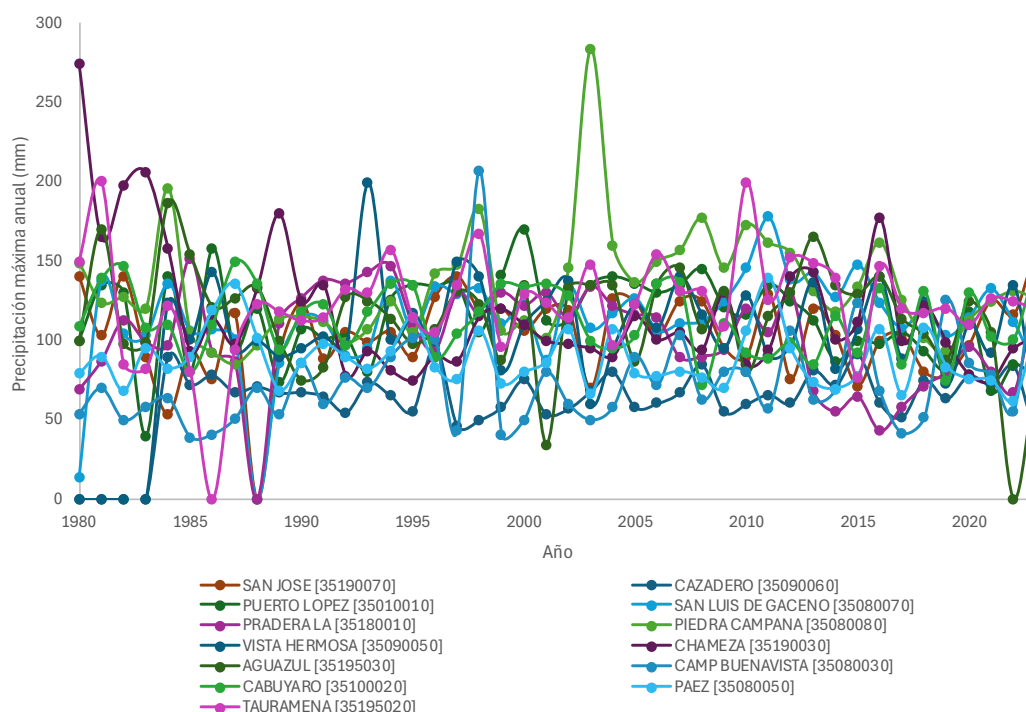


Figura 5-6. Precipitaciones máximas diarias para las estaciones de la cuenca Túa.

Fuente. Aqualogs (2025)

Los datos se revisaron mediante un box-plot (Figura 5-7), con el fin de identificar valores atípicos, los cuales se removieron de la serie. Los datos restantes se emplearon en la construcción de los hietogramas de diseño para distintos periodos de retorno.

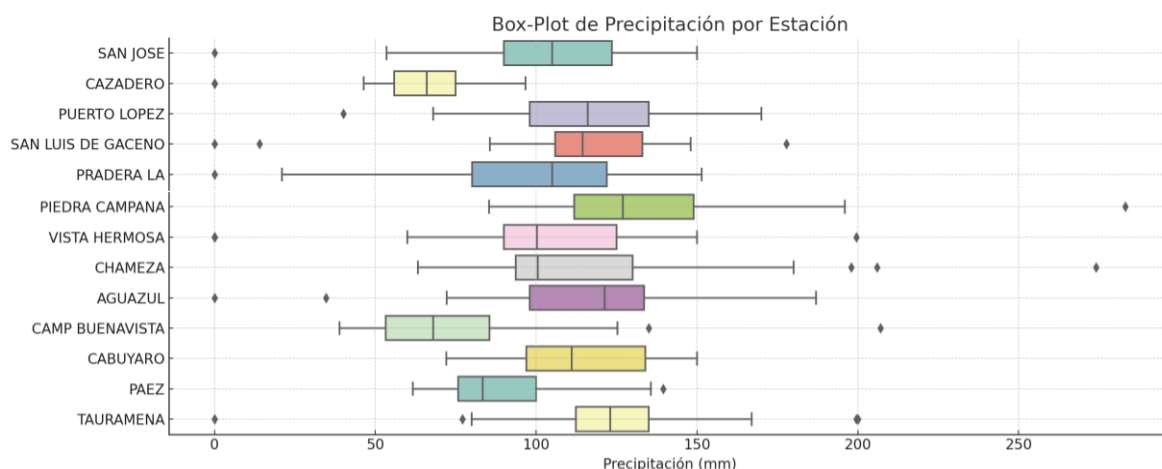


Figura 5-7. Box-plots de los datos máximos anuales por estación para la cuenca del río Túa.

Fuente. Aqualogs (2025)

Para la estimación de un hietograma característico representativo de la cuenca, se empleó el método de polígonos de Thiessen, el cual permite ponderar la contribución de cada estación pluviométrica según su área de influencia dentro del perímetro de la cuenca. Esta técnica consiste en trazar polígonos perpendiculares a los segmentos que conectan estaciones adyacentes, de forma que cada estación quede asociada a una región cuya área define su peso relativo. A partir de ello, se calcula la precipitación media a través de una combinación ponderada de los registros de precipitación máxima observados en cada estación. Se trazan los polígonos de la cuenca del río Túa y se obtienen las siguientes áreas de ponderación para cada estación:

Tabla 5-6. Proporción de área de influencia de cada estación pluviométrica en la cuenca del río Túa.

Estación	Área de influencia (km ²)
CABUYARO	46.12
PRADERA LA	223.85
SAN LUIS DE GACENO	234.10
TAURAMENA	365.46
VISTA HERMOSA	386.07

La serie se ajustó a diferentes distribuciones de probabilidad comúnmente empleadas en hidrología para eventos extremos (i.e. Gumbel, Log-Normal, Pearson tipo III y Generalizada de valores extremos – GEV, entre otros). En este punto se emplea el software de libre acceso Hydrognomon, el cual muestra los siguientes resultados:

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEO PARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

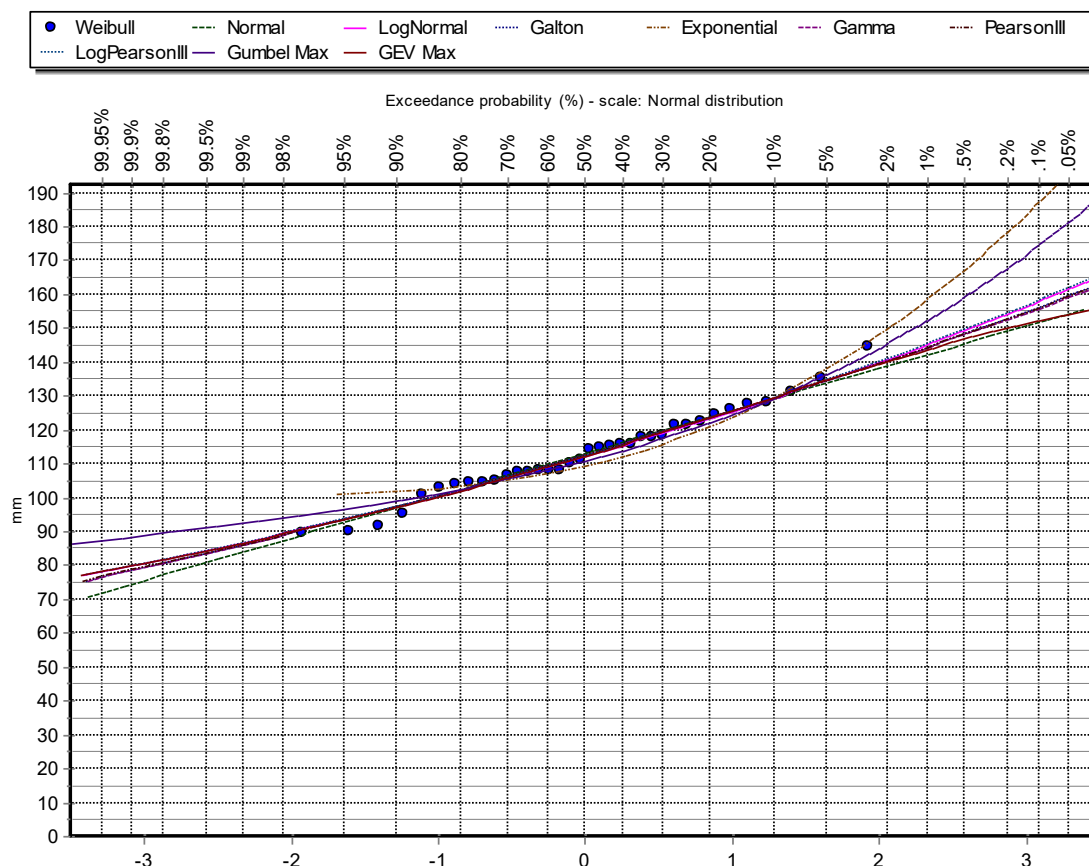


Figura 5-8. Ajuste de precipitaciones máximas a diferentes funciones de probabilidad.

Fuente. Aqualogs (2025)

Igualmente, con el fin de identificar la distribución de probabilidad más adecuada para representar las precipitaciones máximas diarias anuales, se aplicó la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov–Smirnov (K–S). Esta prueba permite contrastar si una muestra proviene de una distribución teórica específica, comparando su función de distribución acumulada empírica (EDF) con la función de distribución acumulada teórica (CDF). En este análisis se reportan los siguientes elementos para cada distribución evaluada:

- $\alpha = 1\%, 5\%, 10\%$: Corresponden a niveles de significancia convencionales (α) utilizados para decidir si se acepta o rechaza la hipótesis nula. Si el valor de la estadística de prueba excede el valor crítico correspondiente, se rechaza la hipótesis de que los datos siguen dicha distribución al nivel indicado.
- Attained α (p-valor): Representa el nivel de significancia alcanzado por la prueba, es decir, la probabilidad de obtener una diferencia entre las distribuciones (empírica y teórica) igual

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEOARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

o mayor a la observada, bajo el supuesto de que la distribución es correcta. Si este valor es menor que el nivel de α (por ejemplo, 0.05), se concluye que el ajuste no es adecuado.

- DMax: Es la estadística de prueba, que representa la diferencia máxima absoluta entre la EDF y la CDF teórica. A mayor D , mayor es la discrepancia entre los datos observados y el modelo teórico.

La hipótesis nula de la prueba K-S es que "los datos provienen de la distribución evaluada". Por tanto: Si el p-valor $> \alpha$ (por ejemplo, 5%), no se rechaza la hipótesis nula y se considera que la distribución proporciona un ajuste aceptable; si el p-valor $\leq \alpha$, se rechaza la hipótesis y la distribución se considera inadecuada para modelar los datos.

Esta prueba se aplicó para las distribuciones presentadas en la Figura 5-8. Los resultados permiten establecer qué distribuciones pueden considerarse representativas para el análisis de frecuencia, y cuáles deben ser descartadas por presentar discrepancias significativas con los datos observados. Los resultados de esta prueba se presentan a continuación:

Tabla 5-7. Resultado de la prueba K-S para la serie de máximos utilizada.

Kolmogorov-Smirnov test for: All data	$\alpha=1\%$	$\alpha=5\%$	$\alpha=10\%$	Attained α	Dmax
Normal	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	93.61%	0.08468
LogNormal	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	99.16%	0.06778
Galton	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	98.31%	0.0724
Exponential	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	38.10%	0.14676
Gamma	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	98.16%	0.07304
Pearson III	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	98.39%	0.07206
Log Pearson III	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	99.18%	0.06762
Gumbel	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	90.87%	0.08924
GEV	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	99.38%	0.06601

Con base en estos resultados, la distribución Log Pearson III se identificó como la más adecuada para modelar las series de máximas anuales en la cuenca del río Túa, puesto que es la que presenta un menor valor de Dmax. Sin embargo, gráficamente se puede evidenciar que la distribución Gumbel ajusta mejor los valores más altos de lluvia, por lo cual se puede decir que esta distribución permitirá extrapolar mejor los datos para periodos de retorno altos (i.e. 50 y 100 años). Finalmente, con esta información se obtuvieron las lluvias para periodos de retorno de 2.33, 5, 10, 20, 50 y 100 años. Los resultados son los siguientes:

Tabla 5-8. Precipitaciones máximas para diferentes periodos de retorno en la cuenca del río Túa.

Periodo de retorno (año)	Precipitación (mm)	
	Log Pearson III	Gumbel
2.33	114.48	112.92
5	123.23	121.92

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEO PARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

Periodo de retorno (año)	Precipitación (mm)	
	Log Pearson III	Gumbel
10	129.41	129.25
20	134.74	136.28
50	141.00	145.39
100	145.34	152.21

5.2.1.5.3. Hietogramas de modelación

Una vez estimadas las precipitaciones máximas diarias asociadas a diferentes periodos de retorno mediante el ajuste de distribuciones de probabilidad, se procedió a la construcción de hietogramas sintéticos representativos de eventos críticos. Estos hietogramas constituyen un insumo clave para modelos de simulación hidrológica, en tanto permiten distribuir temporalmente la lluvia y evaluar con mayor realismo las respuestas del sistema ante tormentas de diseño.

Cabe precisar que los registros disponibles en este estudio corresponden exclusivamente a precipitación total diaria, es decir, a una única medición acumulada por cada día. Esta característica introduce limitaciones importantes, ya que impide conocer la evolución intradiaria de los eventos, tales como el momento del pico, la duración efectiva de la tormenta o la variabilidad horaria de la intensidad. En consecuencia, no es posible construir hietogramas observados ni aplicar perfiles empíricos derivados de datos pluviográficos reales, como curvas tipo Huff o análisis percentilizados. Por tanto, la única alternativa metodológica disponible es asumir una distribución temporal teórica que permita desagregar el volumen diario estimado en intervalos subdiarios compatibles con los requerimientos de modelación.

Para este estudio se adoptó como criterio de diseño una duración total del evento de 3 horas (180 minutos), dividida en intervalos discretos de 10 minutos, lo que resulta en 18 pasos de cálculo. Esta ventana temporal está alineada con las recomendaciones del INVIAS para el análisis de eventos críticos en cuencas y responde al principio conservador de asumir que toda la lluvia diaria asociada a un determinado periodo de retorno puede concentrarse en un corto intervalo. De esta manera, se maximizan las intensidades instantáneas y, en consecuencia, las tasas de generación de escorrentía.

El total de lluvia distribuido en cada hietograma corresponde al valor de precipitación diaria máxima estimado para cada Tr. A fin de representar de forma realista la distribución temporal de dicha lluvia, se seleccionó una función de densidad tipo Gumbel para máximos, cuyo perfil asimétrico permite emular eventos de rápida acumulación y lenta disipación, típicos de tormentas convectivas en regiones tropicales andinas. Esta función fue ajustada a partir de una curva de distribución acumulada representativa, derivada de análisis regionales en Colombia, lo que garantiza coherencia hidrológica y consistencia con las condiciones climáticas locales.

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEO PARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

La implementación numérica del hietograma consistió en evaluar la función de distribución acumulada (CDF) de Gumbel sobre los 18 intervalos temporales, para luego calcular la lluvia incremental en cada uno como diferencia entre dos valores sucesivos de la CDF, escalada al volumen total estimado. Las intensidades se obtuvieron dividiendo la lluvia de cada intervalo por su duración (10 minutos). Este procedimiento garantiza que la suma total de lluvia distribuida coincida exactamente con el valor diario de entrada y que la forma del hietograma refleje el comportamiento acumulativo deseado.

Es importante resaltar que la generación de hietogramas a partir de datos diarios está sujeta a varias restricciones metodológicas. En primer lugar, la ausencia de registros subdiarios implica que cualquier forma asumida para la distribución temporal es, por definición, hipotética. En segundo lugar, la elección de la función de distribución impacta directamente en la intensidad máxima estimada, lo cual a su vez afecta los caudales resultantes. En tercer lugar, el supuesto de que toda la lluvia diaria ocurre en una ventana de 3 horas representa una condición de diseño conservadora que, si bien es útil en fases preliminares, puede sobreestimar los efectos reales en eventos naturales.

Los hietogramas resultantes para cada distribución seleccionada se muestran en las siguientes figuras. Cada color representa el valor para un periodo de retorno:

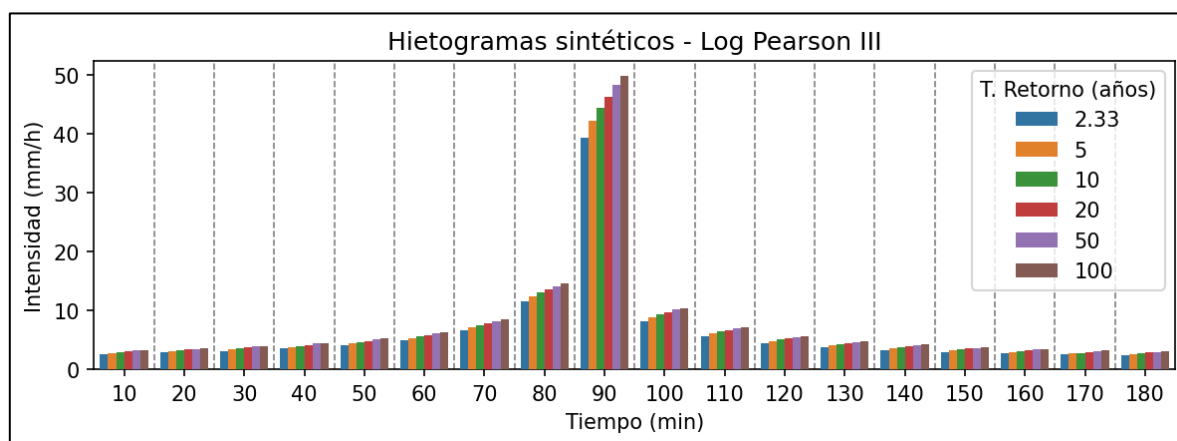


Figura 5-9. Hietograma generado para la cuenca del río Túa (Log Pearson III).

Fuente. Aqualogs (2025)

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEO PARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

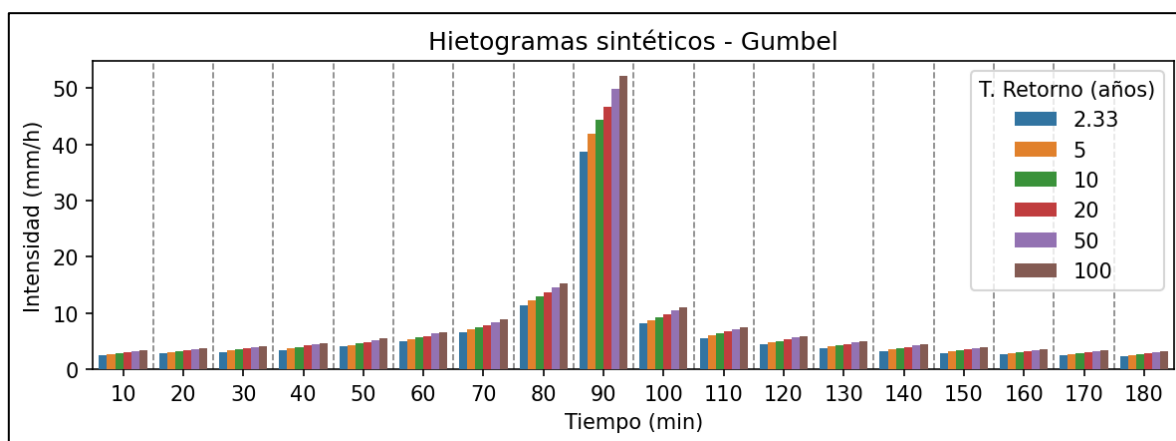


Figura 5-10. Hietograma generado para la cuenca del río Túa (Gumbel).

Fuente. Aqualogs (2025)

5.2.1.5.4. Hidrogramas de modelación con cambio climático

Para la incorporación del cambio climático en la construcción de los hietogramas sintéticos se aplicaron en primer lugar técnicas de downscaling climático, que permitieron obtener proyecciones de precipitación a escala local coherentes con la variabilidad de la zona de estudio (capítulo 4.2.1 y capítulo 4.2.2). Estas series corregidas se acoplaron con la información observacional. A partir de esta serie consolidada se procedió al cálculo de nuevas precipitaciones de diseño para diferentes periodos de retorno, ajustando funciones de probabilidad a los máximos diarios, de forma similar al procedimiento descrito previamente para el caso histórico. Con ello se obtuvieron valores de lluvia extrema corregidos bajo escenarios de cambio climático, los cuales redefinen los tiempos de retorno efectivos de la región.

La construcción de los hietogramas sintéticos se realizó de manera análoga al procedimiento detallado en el capítulo 5.2.1.5.3 con las series observadas, aplicando el método de bloques alternos para distribuir temporalmente la precipitación de diseño. De esta forma, los hietogramas resultantes no solo reflejan la magnitud de la lluvia ajustada por cambio climático, sino que además mantienen una estructura temporal consistente para su aplicación en modelos hidrológicos.

Los resultados de la Figura 5-11 y Figura 5-12 muestran que la magnitud de la precipitación de diseño tiende a incrementarse en la mayoría de los periodos de retorno, aunque con variaciones entre escenarios. Por ejemplo, para un tiempo de retorno de 2.33 años se obtuvo en promedio un aumento del 1% respecto al valor histórico, mientras que para 5 y 10 años los incrementos medios fueron del 12% y 19%, respectivamente. Estos cambios se intensifican a medida que aumenta el tiempo de retorno, alcanzando incrementos del 23% para 20 años, del 28% para 50 años y hasta del 31% para un tiempo de retorno de 100 años. Estos resultados evidencian que, bajo condiciones de cambio climático, los eventos de lluvia asociados a periodos de retorno altos presentan un incremento proporcionalmente mayor, lo que sugiere un aumento significativo en el riesgo de eventos hidrológicos extremos.

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEO PARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

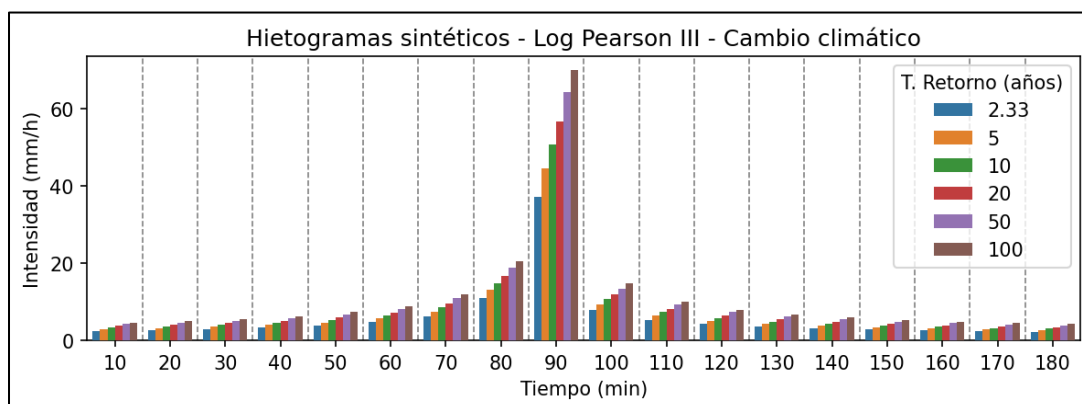


Figura 5-11. Hietogramas de precipitación para diferentes periodos de retorno, con Log Pearson III considerando cambio climático.

Fuente. Aqualogs (2025)

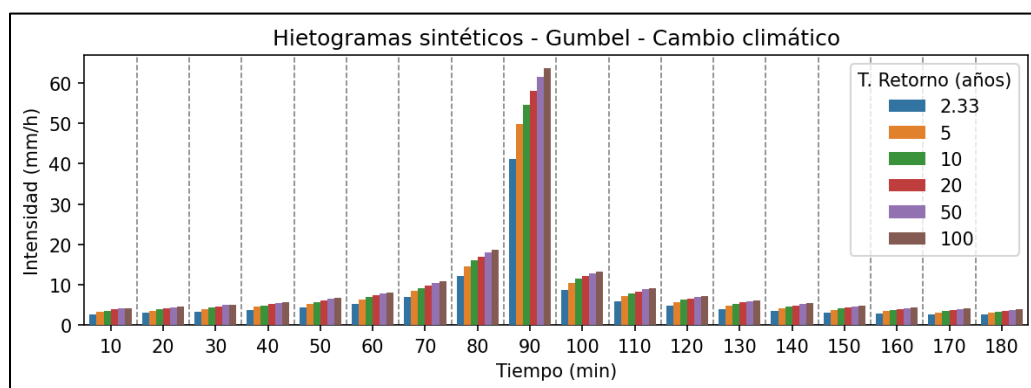


Figura 5-12. Hietogramas de precipitación para diferentes periodos de retorno, con Gumbel considerando cambio climático.

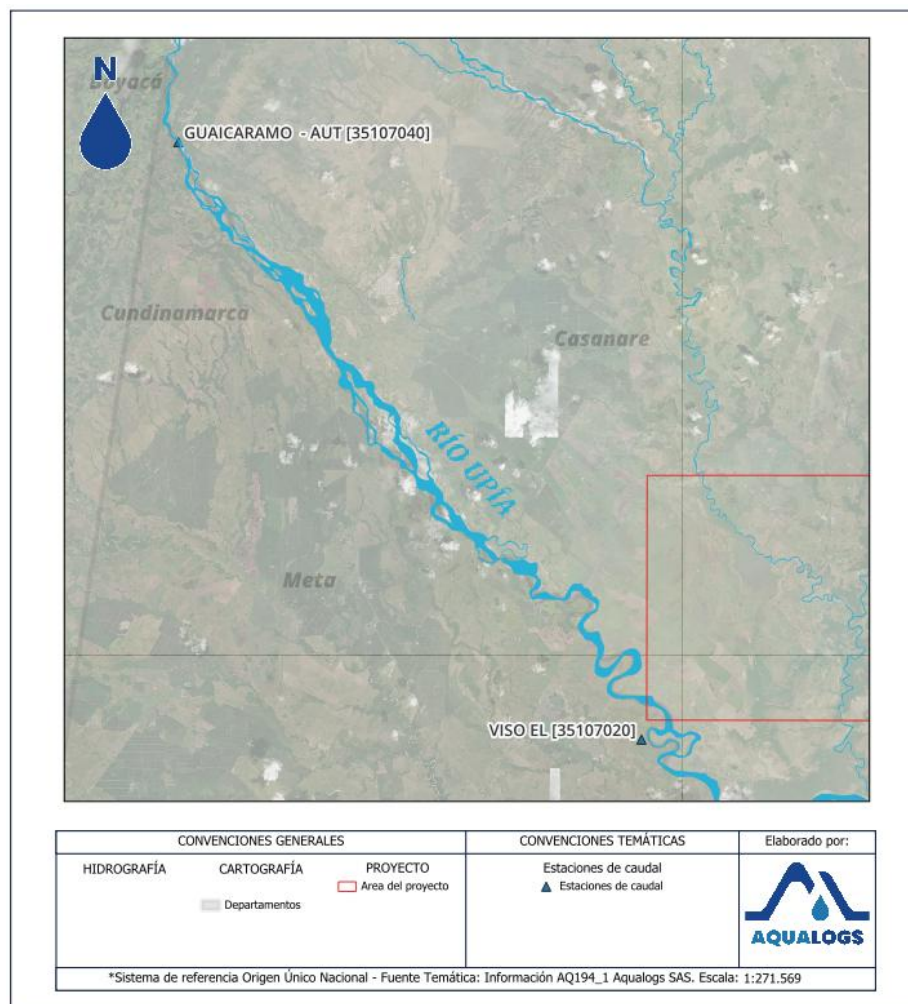
Fuente. Aqualogs (2025)

Los diferentes hidrogramas se presentan en la carpeta A2_Climatología.

5.2.2. Metodología de estimación caudales del río Upía

Para la estimación del caudal del río Upía en el punto de entrada del modelo hidráulico —que será descrito en el Tomo 4 del presente estudio (04_Análisis Hidráulico)— se utilizaron los registros hidrométricos de dos estaciones de aforo. La primera corresponde a la estación GUAICARAMO - AUT [35107040], ubicada aguas arriba del área de modelación, y la segunda a la estación VISO EL [35107020], localizada dentro de la zona de estudio. La ubicación relativa de estas estaciones y su relación con el área modelada se presentan en la Figura 5-13.

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEO PARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente



CODIGO	nombre	FECHA_INST	altitud	latitud	longitud	FECHA_SUSP
35107020	VISO EL [35107020]	15/05/1976	169	4.3500	-72.7833	15/06/1995
35107040	GUAICARAMO - AUT [35107040]	15/03/1981	264	4.6891	-73.0465	14/03/2022

Figura 5-13. Localización estación GUAICARAMO - AUT [35107040] y VISO EL [35107020].

Fuente. Aqualogs (2025)

Para llevar a cabo la metodología propuesta en Tránsito de caudales, es fundamental considerar la distancia existente entre las dos estaciones de aforo utilizadas. Dicho valor constituye un insumo relevante para el proceso de tránsito de caudales y se presenta en la Tabla 5-9.

Tabla 5-9. Distancias del río entre las localizaciones importantes.

Puntos de importancia		Distancia [km]	%
Punto inicial	Punto final		
GUAICARAMO - AUT [35107040]	VISO EL [35107020]	98.92	100%
GUAICARAMO - AUT [35107040]	Límite del dominio modelación hidráulica	40.01	40.4%

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEO PARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

Para verificar la existencia de un posible desfase de onda superior al intervalo temporal de registro entre las estaciones, se realizó un análisis de correlación cruzada de las series de caudal disponibles. El resultado se presenta en la Figura 5-14, donde se observa que el valor del parámetro AMI (Average Mutual Information (Wallot & Mønster, 2018)) no presenta un incremento significativo con el aumento del desfase (lag) entre los datos de ambas estaciones. En consecuencia, se concluye que no es necesario realizar ajustes adicionales en las series de caudal por efecto del desfase.

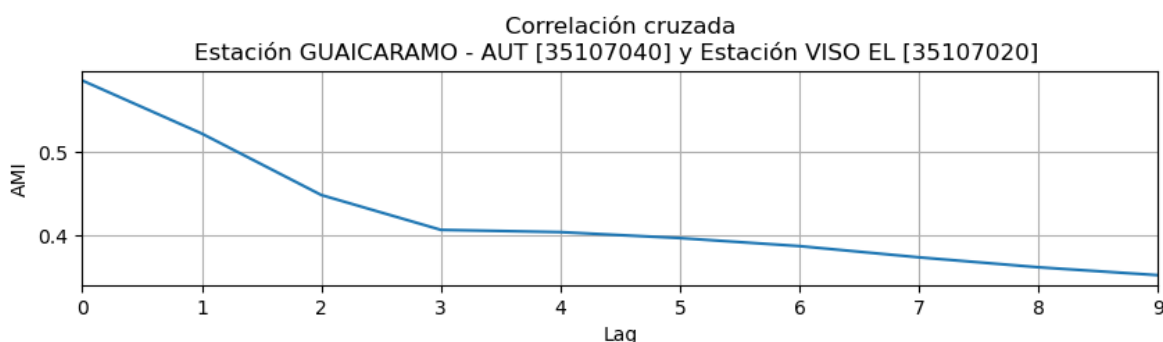


Figura 5-14. Correlación cruzada entre las series de caudales de la estación GUAICARAMO - AUT [35107040] y la estación VISO EL [35107020].

Fuente. Aqualogs (2025)

Para la identificación de los parámetros, se requiere llevar a cabo un proceso de calibración de la ecuación de Muskingum-Cunge. Con este propósito, se seleccionó un periodo de tiempo que contara con registros continuos en ambas estaciones, garantizando la coherencia temporal de la información. Los datos correspondientes a dicho periodo se presentan en la Figura 5-15, y constituyen la base para el ajuste y estimación de los parámetros del modelo.

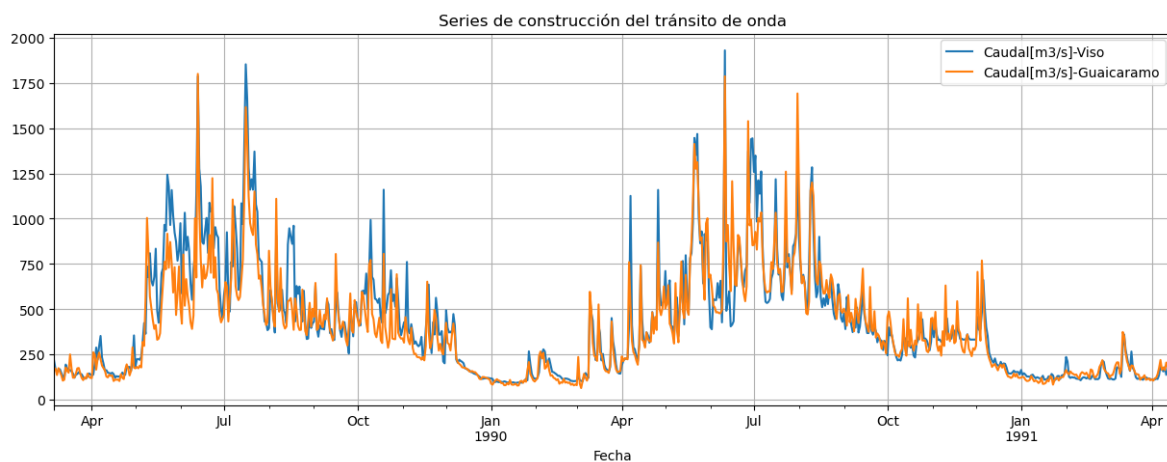


Figura 5-15. Series de caudal de la estación VISO EL [35107020] y GUAICARAMO-AUT [35107040].

Fuente. Aqualogs (2025)

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

Durante el proceso de calibración, utilizando la primera parte de la serie de tiempo, se determinó que los parámetros de Muskingum-Cunge que proporcionaron el mejor ajuste al modelo fueron: $K = 0.3280$ y $x = 0.1$. Bajo esta configuración, se obtuvo un valor del Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) de 0.8159, lo cual evidencia un desempeño aceptable del modelo en la representación de los caudales observados. La comparación entre la serie observada y modelada se presenta en la Figura 5-16.

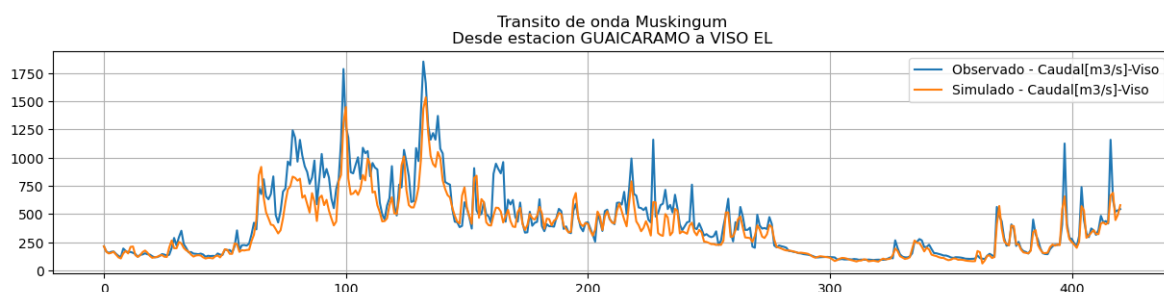


Figura 5-16. Calibración tránsito de Muskingum - Cunge.

Fuente. Aqualogs (2025)

Con el fin de verificar la consistencia de los parámetros previamente calibrados, se realizó el proceso de validación del modelo. En la Figura 5-17 se presentan las series de caudal empleadas para este fin, que incluyen los registros de la estación GUAICARAMO - AUT [35107040] como entrada y los datos observados en la estación VISO EL [35107020] para efectuar la comparación correspondiente. Posteriormente, en la Figura 5-18 se muestra la confrontación entre la serie observada y la serie simulada, obteniéndose un valor de $NSE = 0.8459$, lo cual evidencia un adecuado desempeño del modelo en la etapa de validación.

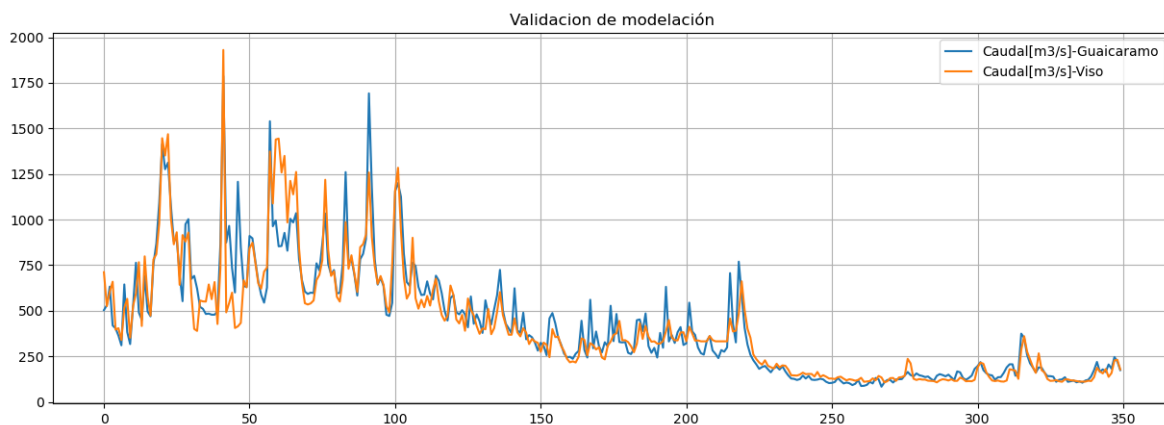


Figura 5-17. Serie de validación para el modelo de tránsito de Muskingum - Cunge.

Fuente. Aqualogs (2025)

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

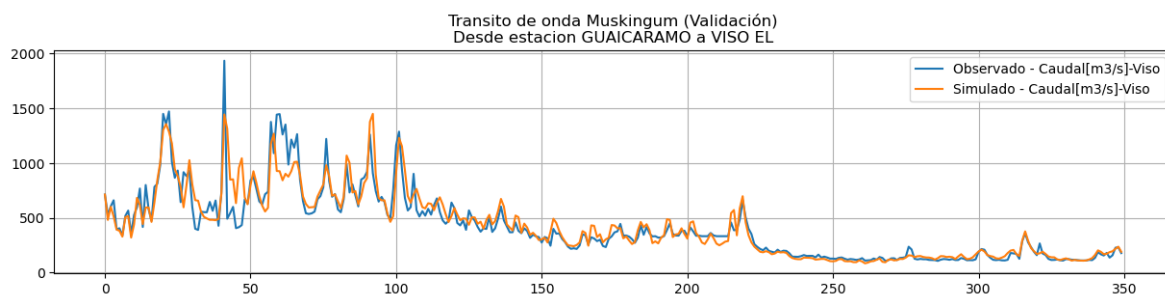


Figura 5-18. Comparación de la validación para el modelo de tránsito de Muskingum - Cunge.

Fuente. Aqualogs (2025)

Para llevar a cabo el tránsito de la serie de caudal correspondiente a la estación GUAICARAMO - AUT [35107040], se realizó una revisión preliminar orientada a garantizar la calidad de los datos empleados. Este procedimiento incluyó la verificación de la cantidad de registros disponibles, el análisis de la homogeneidad temporal de la serie y la identificación de posibles valores atípicos que pudieran afectar la consistencia de los resultados. A continuación, se presentan los principales hallazgos de este análisis, mientras que las metodologías aplicadas se describen en detalle en el capítulo 3.1 del presente informe.

Para la revisión de datos atípicos, se identificó que la serie de caudales de la estación GUAICARAMO - AUT [35107040] cubre el periodo comprendido entre el 10 de marzo de 1981 y el 30 de junio de 1994. En la Figura 5-19 se presenta la cantidad de registros disponibles dentro de dicho intervalo, lo cual permite evaluar la completitud de la serie y constituye la base para la detección de posibles valores atípicos o inconsistencias en los datos.

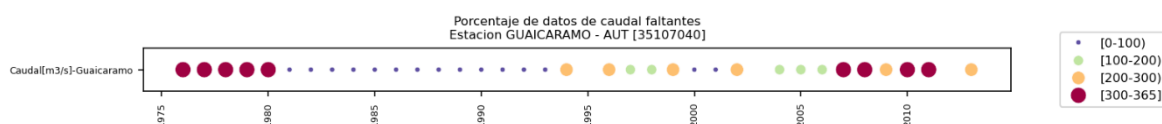


Figura 5-19. Análisis de datos faltantes.

Fuente. Aqualogs (2025)

En la Tabla 5-10 se presentan los resultados de la prueba de homogeneidad, donde se evidencia que, de acuerdo con la prueba de Pettitt, la serie analizada puede considerarse homogénea. Asimismo, se observa una disminución en el valor promedio de los registros más recientes, lo cual indica una tendencia descendente en los caudales hacia el final del periodo analizado.

Tabla 5-10. Resultados test de Pettitt para la estación GUAICARAMO - AUT [35107040].

h	cp	p	U	mu1	mu2
False	227	0.7209	1610	587.65	537.54

Finalmente, se realizó la verificación de la presencia de valores atípicos en la serie. Para ello, se calculó el límite superior, el cual corresponde a un valor de 2002.25 m³/s. A partir de este umbral se

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEO PARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

identificaron los registros considerados como atípicos, obteniéndose la serie depurada que se presenta en la Figura 5-20.

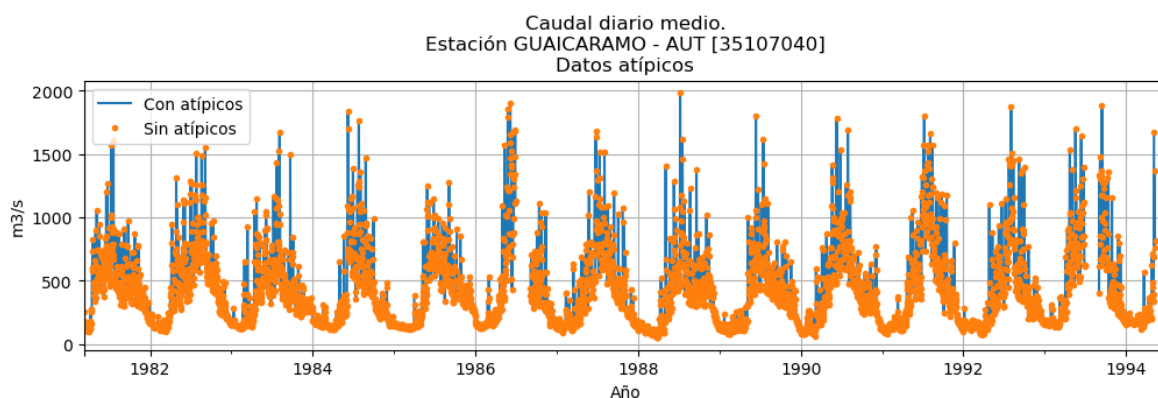


Figura 5-20. Comparación serie de caudales de la estación con y sin datos atípicos.

Fuente. Aqualogs (2025)

Por medio de las ecuaciones del Tránsito de caudales se determinaron los valores de los parámetros K y X en la frontera del modelo. Los resultados obtenidos corresponden a $K = 0.8201$ y $X = -0.5$. Con base en dichos parámetros, se generó la serie de caudales simulados en la frontera del modelo, la cual se presenta en la Figura 5-21.

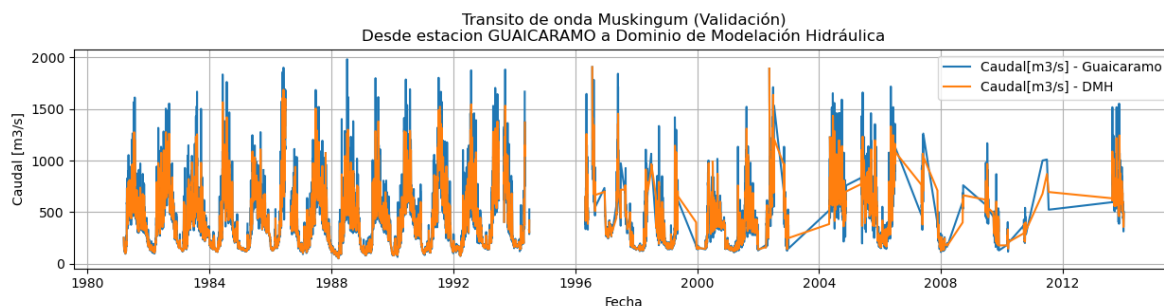


Figura 5-21. Tránsito de caudales hasta la frontera del dominio de modelación hidráulica.

Fuente. Aqualogs (2025)

Finalmente, a partir de la construcción de la serie de caudales, fue necesario identificar los caudales asociados a cada período de retorno. Para ello, se aplicó el procedimiento descrito en el capítulo 5.2.1.5.2 Análisis de las series de tiempo obteniéndose la serie de caudales máximos anuales, la cual se presenta en la Figura 5-22.

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEO PARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

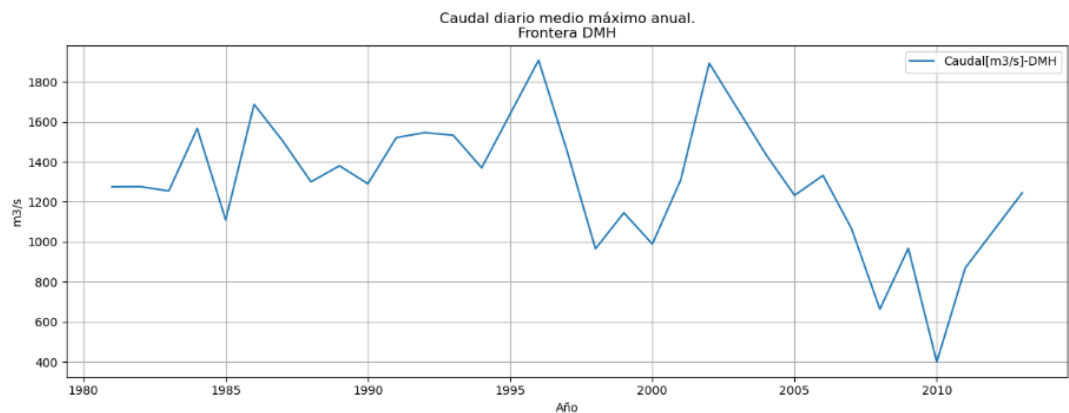
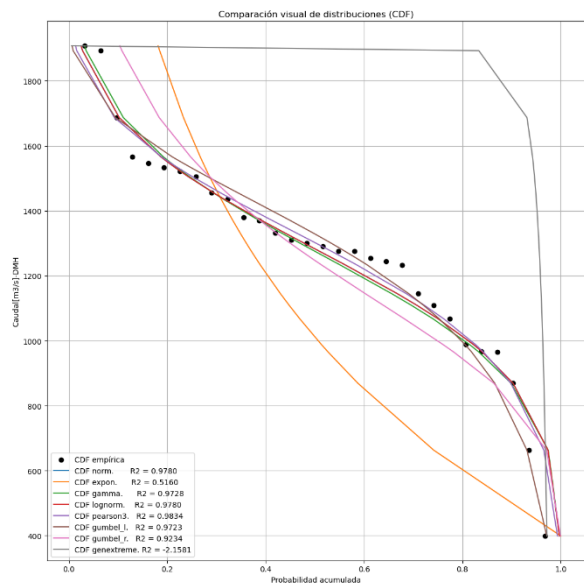


Figura 5-22.Caudales máximos anuales del caudal en el Dominio del modelo hidráulico.

Fuente. Aqualogs (2025)

A partir de la serie de caudales máximos anuales se identificó la función de distribución de probabilidad acumulada que mejor representa el comportamiento de los datos. Con base en dicha función se estimaron los caudales correspondientes a los diferentes períodos de retorno definidos en el estudio. Esto se observa en la siguiente figura.

Gráfica de la funcion de probabilidad de densidad (PDF (Probability Density Function))



Parámetros de selección de PDF.		
Distribución	Parámetro	Resultado
Normal	K-S	estadístico = 0.1370 p-valor = 0.5796
	AIC	434.9415
	BIC	437.7439
Exponencial	K-S	estadístico = 0.3728 p-valor = 0.0003
	AIC	471.0566
	BIC	473.8590
Gamma	K-S	estadístico = 0.1476 p-valor = 0.4855
	AIC	437.7232
	BIC	441.9268
Log normal	K-S	estadístico = 0.1370 p-valor = 0.5796
	AIC	436.9415
	BIC	441.1451
Pearson 3	K-S	estadístico = 0.1136 p-valor = 0.7929
	AIC	436.0416
	BIC	440.2451
Gumbel L	K-S	estadístico = 0.1098 p-valor = 0.8239
	AIC	436.0903
	BIC	438.8927
Gumbel R	K-S	estadístico = 0.1855 p-valor = 0.2235

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEOPARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

GEV	AIC	444.7544
	BIC	447.5568
	K-S	estadístico = 0.8647 p-valor = 0.0000
	AIC	536.7263
	BIC	540.9299

Figura 5-23. Análisis probabilístico de las series de caudales máximos.

Fuente. Aqualogs (2025)

A partir de la información obtenida, se evaluaron distintas distribuciones de probabilidad con el fin de identificar aquella que presentara la mejor representatividad respecto a la serie de caudales máximos anuales. Con base en la distribución seleccionada, se estimaron los caudales correspondientes a los periodos de retorno definidos. Estos se muestran en la Tabla 5-11.

Tabla 5-11. Caudales asociados a los periodos de retorno del río Upía.

	Caudal [m3/s]	Caudal [m3/s]	Caudal [m3/s]	Caudal [m3/s]
	Dist. Normal	Dist. Pearson III	Dist. Gumbel (L)	Modelación
T : 2.33 años	1339.8	1357.8	1387	1361.53
T : 5 años	1551	1554	1575.2	1560.07
T : 10 años	1691.1	1675.1	1679.9	1682.03
T : 20 años	1806.8	1769.9	1756.8	1777.83
T : 50 años	1937	1871	1834.9	1880.97
T : 100 años	2023.8	1935.1	1882.6	1947.17

Para la estimación de los caudales bajo condiciones de cambio climático, se realizó una revisión comparativa de los resultados obtenidos en la modelación hidrológica, considerando los escenarios con y sin cambio climático. El análisis evidenció que los caudales proyectados presentan un comportamiento pseudo lineal entre ambos escenarios, observándose en todos los casos valores superiores de caudal bajo condiciones de cambio climático, lo que refleja un incremento sistemático asociado a la variabilidad climática proyectada. Estas estimaciones se presentan en la Figura 5-24. Donde los parámetros a y b corresponden a la aproximación de la recta y r^2 corresponde al valor de coeficiente de Pearson.

Ecuación 5-9 Aproximación de la recta.

$$Q_{ccc} = a_i * Q_{scc} + b_i$$

Donde Q_{ccc} es el caudal con cambio climático, Q_{scc} es el caudal sin tener en cuenta el cambio climático y a_i y b_i son los parámetros aproximados, que dependen del periodo de retorno a usar.

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEO PARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

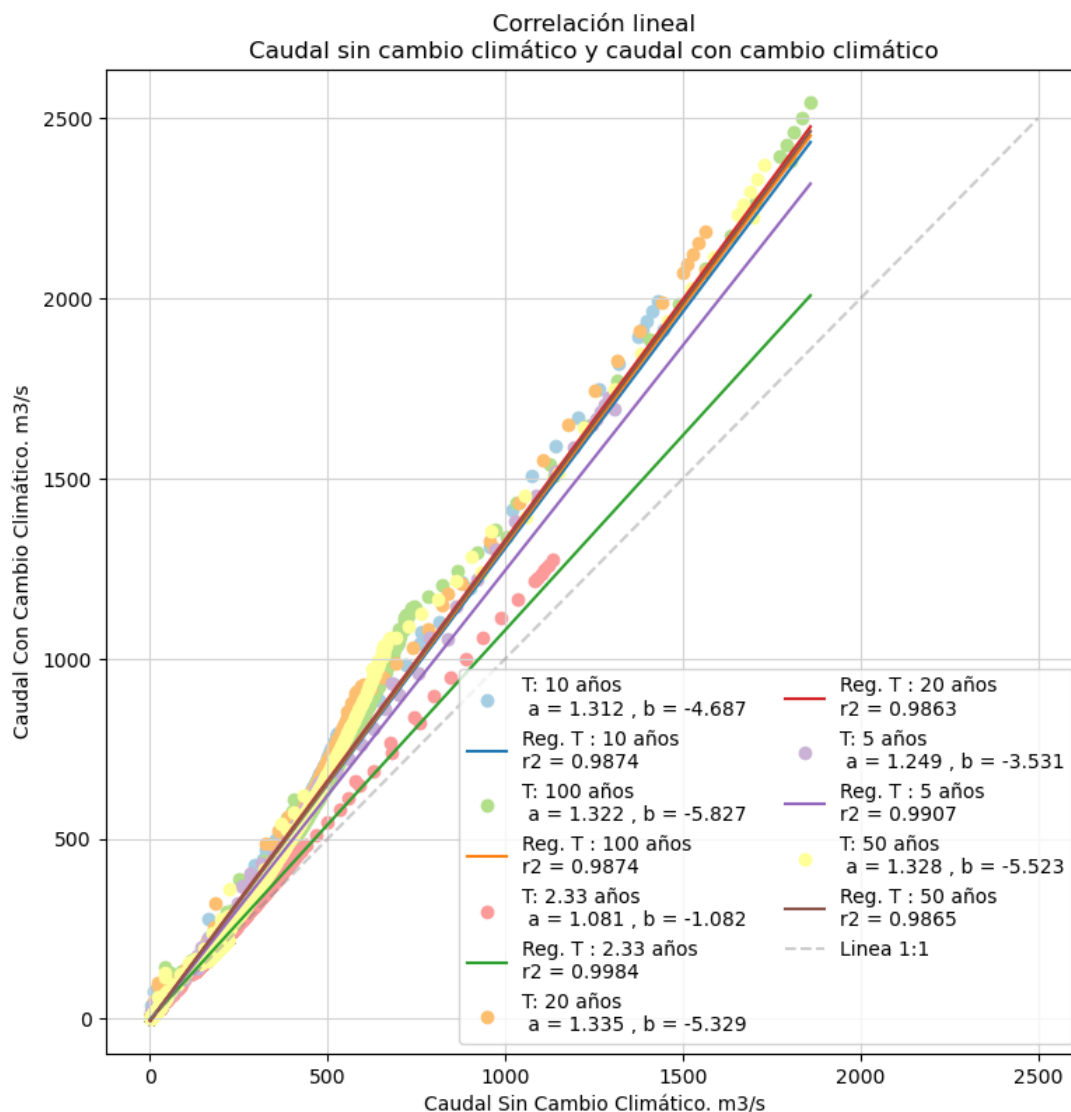


Figura 5-24. Análisis probabilístico de las series de caudales máximos.

Fuente. Aqualogs (2025)

De esta forma se estiman los caudales teniendo en cuenta el cambio climático. Estos resultados se muestran en la Tabla 5-12.

Tabla 5-12. Caudales asociados a los periodos de retorno del río Upía teniendo en cuenta el cambio climático.

	Q_CCC = a * Q_SCC + b			Caudal [m³/s]	
	a	b	r²	Q_SCC	Q_CCC
T: 2.33 años	1.081	-1.082	0.998	1361.53	1470.267
T: 5 años	1.249	-3.531	0.991	1560.07	1944.744
T: 10 años	1.312	-4.687	0.987	1682.03	2201.432
T: 20 años	1.335	-5.329	0.986	1777.83	2368.118

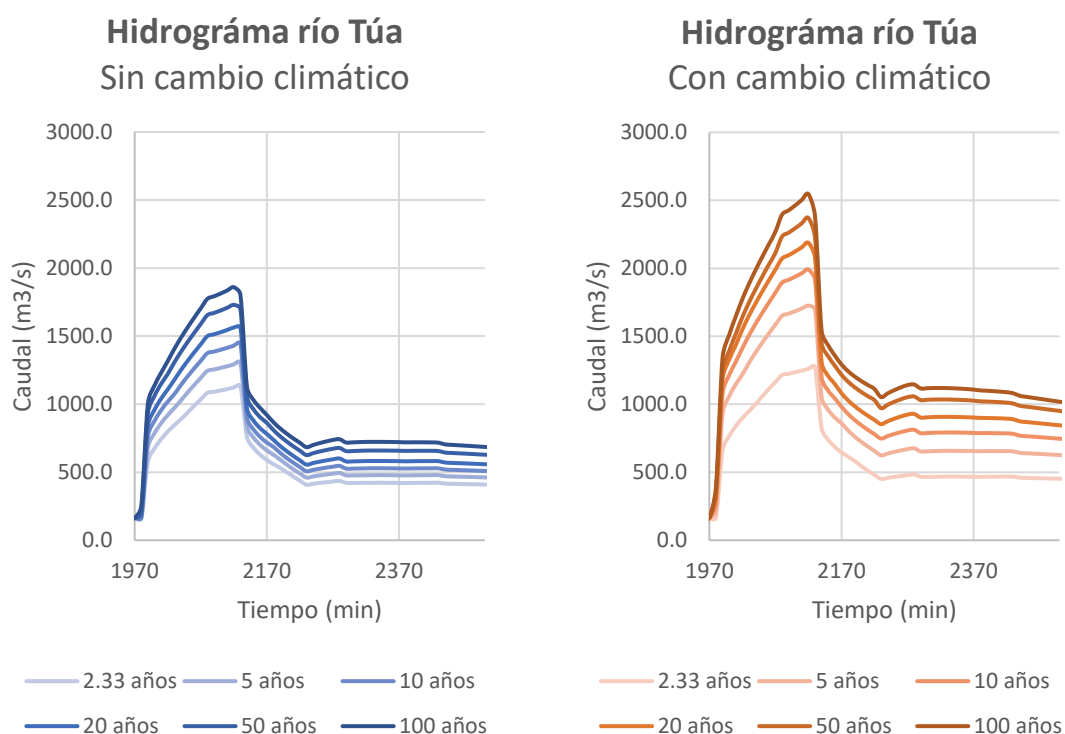
Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEO PARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

T : 50 años	1.328	-5.523	0.987	1880.97	2493.084
T : 100 años	1.322	-5.827	0.987	1947.17	2568.22

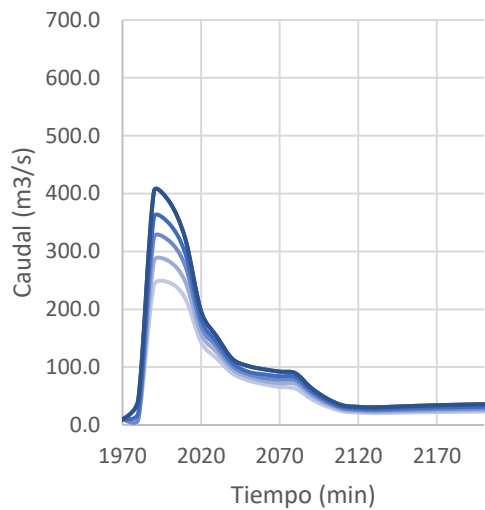
5.3. Resultados Modelación Hidrológica

5.3.1. Hidrogramas resultados

Con base en los insumos y parámetros presentados en capítulos anteriores, se llevó a cabo la modelación de los escenarios hidrológicos con y sin cambio climático. A partir de dicha modelación se generaron los hidrogramas correspondientes para cada una de las entradas del modelo hidráulico, considerando los periodos de retorno previamente establecidos.

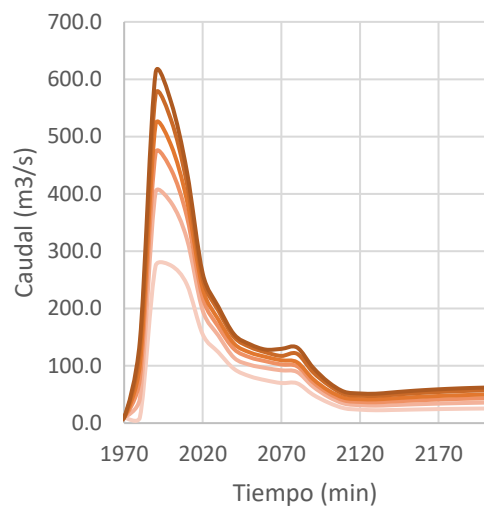


Hidrográma caño Piñalito Sin cambio climático



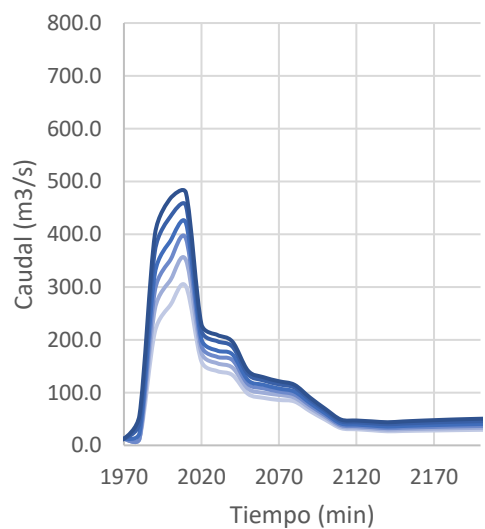
2.33 años 5 años 10 años
20 años 50 años 100 años

Hidrográma caño Piñalito Con cambio climático



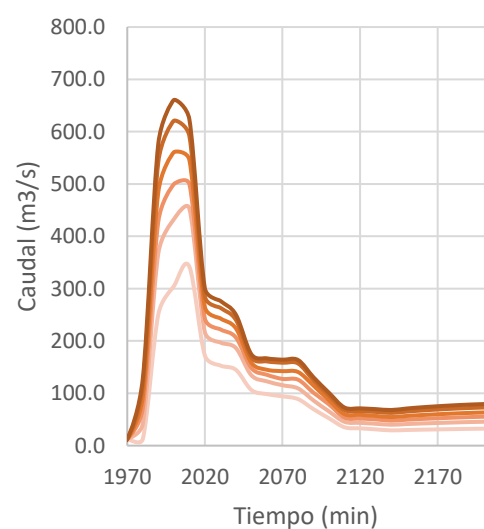
2.33 años 5 años 10 años
20 años 50 años 100 años

Hidrográma caño Huesero Sin cambio climático



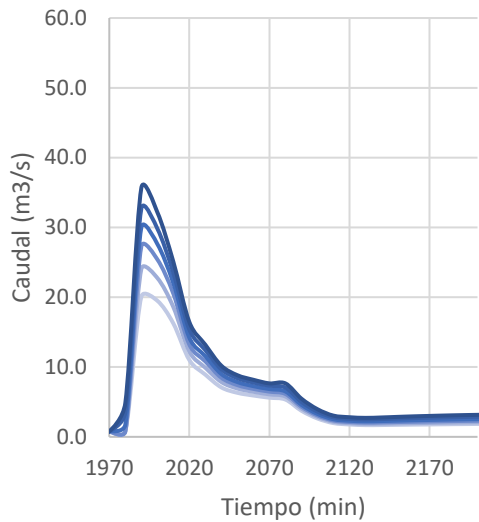
2.33 años 5 años 10 años
20 años 50 años 100 años

Hidrográma caño Huesero Con cambio climático



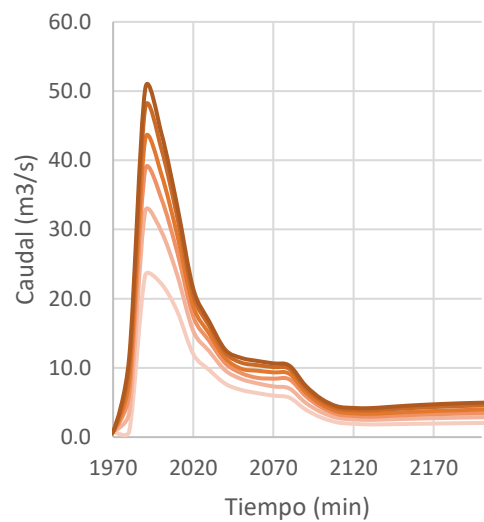
2.33 años 5 años 10 años
20 años 50 años 100 años

Hidrográma caño Clavelino Sin cambio climático



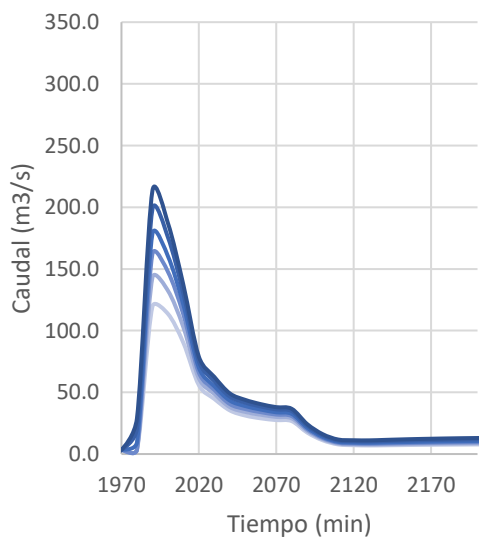
— 2.33 años — 5 años — 10 años
— 20 años — 50 años — 100 años

Hidrográma caño Clavelino Con cambio climático



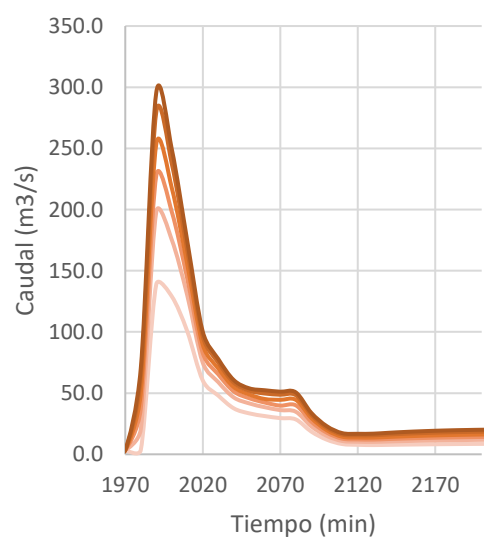
— 2.33 años — 5 años — 10 años
— 20 años — 50 años — 100 años

Hidrográma caño Aguaverde Sin cambio climático



— 2.33 años — 5 años — 10 años
— 20 años — 50 años — 100 años

Hidrográma caño Aguaverde Con cambio climático



— 2.33 años — 5 años — 10 años
— 20 años — 50 años — 100 años

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEOPARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

Los resultados se encuentran en la carpeta A2_Climatología.

5.3.2. Caudales río Upía

Siguiendo la metodología presentada en el 5.2.2 Metodología de estimación caudales del río Upía, a continuación, se presentan los caudales utilizados en la modelación hidráulica del río Upía.

Tabla 5-13. Caudales asociados a los periodos de retorno del río Upía.

	Caudal [m3/s]	Caudal [m3/s]	Caudal [m3/s]	Caudal [m3/s]
	Dist. Normal	Dist. Pearson III	Dist. Gumbel (L)	Modelación
T : 2.33 años	1339.8	1357.8	1387	1361.53
T : 5 años	1551	1554	1575.2	1560.07
T : 10 años	1691.1	1675.1	1679.9	1682.03
T : 20 años	1806.8	1769.9	1756.8	1777.83
T : 50 años	1937	1871	1834.9	1880.97
T : 100 años	2023.8	1935.1	1882.6	1947.17

Tabla 5-14. Caudales asociados a los periodos de retorno del río Upía teniendo en cuenta el cambio climático.

	Q _{CCC} = a * Q _{SCC} + b			Caudal [m3/s]	Caudal [m3/s]
	a	b	r2	Q _{SCC}	Q _{CCC}
T : 2.33 años	1.081	-1.082	0.998	1361.53	1470.267
T : 5 años	1.249	-3.531	0.991	1560.07	1944.744
T : 10 años	1.312	-4.687	0.987	1682.03	2201.432
T : 20 años	1.335	-5.329	0.986	1777.83	2368.118
T : 50 años	1.328	-5.523	0.987	1880.97	2493.084
T : 100 años	1.322	-5.827	0.987	1947.17	2568.22

Las series de caudales usadas se encuentran en la carpeta A2_Climatología.

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEO PARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

6. Análisis flujo base

6.1. Marco teórico

El flujo base de los ríos se define como la fracción del caudal que proviene principalmente del almacenamiento subsuperficial (acuíferos poco profundos, humedad del suelo y otros aportes retardados). Este componente mantiene la descarga del cauce durante periodos en los que no ocurre recarga directa por precipitación. En consecuencia, el hidrograma de un río con régimen permanente puede descomponerse en dos aportes principales: la escorrentía directa, asociada a eventos de lluvia, y el flujo base, que asegura la continuidad del caudal en ausencia de precipitaciones inmediatas (Hall, 1968).

Para el análisis del flujo base se han desarrollado diversas metodologías de estimación, tanto de carácter físico como estadístico. En el presente estudio, se emplean los resultados del modelo **TOPMODEL**, descrito en el capítulo anterior, con el fin de identificar este componente del caudal. La elección de este enfoque obedece, en primer lugar, a la ausencia de registros hidrométricos en el área de estudio que permitan una estimación directa; y, en segundo lugar, a que el modelo incorpora el parámetro m , asociado a la conductividad hidráulica del suelo. Dicho parámetro se encuentra directamente vinculado al control del flujo subsuperficial y al déficit de almacenamiento local (Gil & Tobón, 2016).

De manera general, un valor reducido del parámetro m indica que la cuenca presenta una elevada transmisividad bajo condiciones de saturación, una marcada dominancia en la generación de escorrentía subsuperficial y una alta capacidad de infiltración de la precipitación (Gil & Tobón, 2016). Estas características corresponden con el comportamiento esperado en el lugar donde se encuentran localizadas las cuencas objeto de estudio.

6.2. Metodología

Para la estimación del flujo base fue necesario identificar un período continuo de precipitación y, mediante modelación hidrológica, determinar los caudales asociados. Para ello, se seleccionaron las estaciones hidrometeorológicas ubicadas dentro de la cuenca del río Túa, con las cuales se construyó una serie diaria continua de precipitación que permitió generar los caudales representativos de la cuenca.

Este análisis se efectuó a partir de las estaciones identificadas en el capítulo 3 Análisis de datos climatológicos. Posteriormente, se realizó la unificación de las series de precipitación mediante el método de polígonos de Thiessen, con el fin de obtener una única serie representativa para toda la cuenca del río Túa. Las estaciones utilizadas se presentan en la Tabla 6-1, al igual que las áreas asociadas a cada una de estas.

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEO PARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

Tabla 6-1. Áreas de los polígonos de Thiessen.

Código de la estación	Nombre de la estación	Altitud (m.s.n.m)	Coordenadas MAGNA-SIRGA_CTM12		Área m2	Porcentaje
			Este	Norte		
35080080	PIEDRA CAMPANA	450	4974055.74	2095070.97	145956229.5	1.30%
35010010	PUERTO LOPEZ	182	5007045.13	2011604.94	1108674653	9.91%
35080030	CAMP BUENAVISTA	1370	4990393.04	2130793.64	421157386.2	3.76%
35080070	SAN LUIS DE GACENO	400	4981172.61	2090581.55	1522007363	13.60%
35195020	TAURAMENA	460	5014422.26	2113505.94	727911404.3	6.51%
35080050	PAEZ	1350	4994103.32	2121140.28	266612100.2	2.38%
35090060	CAZADERO	1725	5001846.02	2141799.54	100432055.8	0.90%
35190030	CHAMEZA	180	5010757.48	2133077.37	464559886.2	4.15%
35090050	VISTA HERMOSA	1200	4994490.31	2110879.61	490085420.4	4.38%
35195030	AGUAZUL	380	5050140.64	2130077.29	602469438.4	5.39%
35180010	PRADERA LA	180	5037026.55	2103580.74	1958351428	17.50%
35100020	CABUYARO	180	5023293.74	2030940.83	3140238655	28.07%
35190070	SAN JOSE	190	5059986.82	2120674.11	239305875.3	2.14%
Área total					11187761895	100%

A partir de la información meteorológica previamente presentada, es posible reconstruir la serie de entrada utilizada en el modelo. Dicho modelo permite obtener la serie de caudales base que representa la respuesta del cauce frente a los eventos de precipitación. En la Figura 6-1 se muestran los resultados obtenidos. Los parámetros empleados corresponden a los descritos en capítulos anteriores, mientras que los insumos específicos se detallan en el Anexo 5. Flujo base.

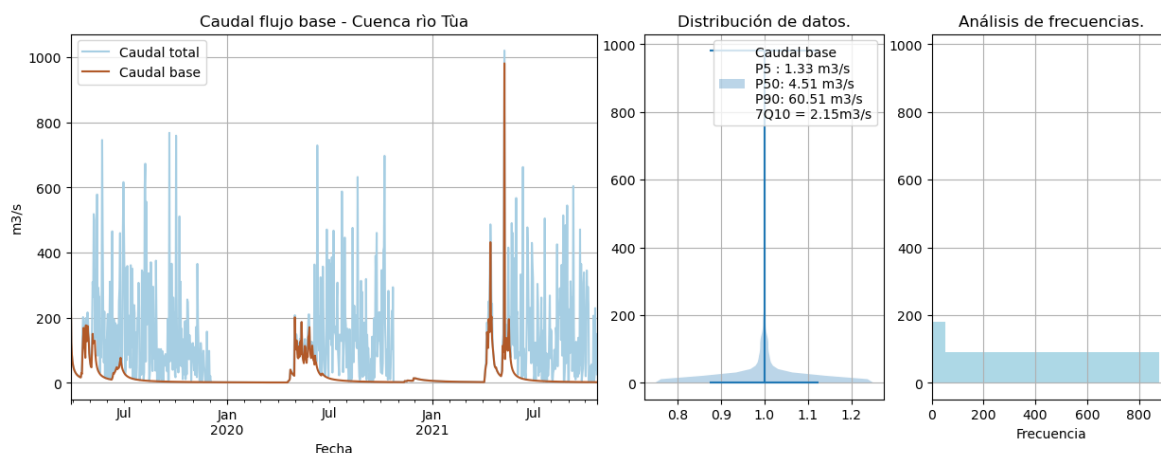


Figura 6-1. Series de caudal flujo base.

Fuente. Aqualogs (2025)

Para la estimación del caudal base se analizaron las series de caudal total y de flujo base. A partir de la serie de caudal total se aplicaron las metodologías 7Q10 y Q95, obteniéndose valores de 2,15 m³/s y 1,33 m³/s, respectivamente, como aproximaciones al caudal base. De manera complementaria, el análisis de la serie de flujo base evidenció un caudal mínimo de 1,15 m³/s. Asimismo, el análisis de frecuencias indicó que el valor modal de la serie corresponde también a 1,15 m³/s, mientras que el caudal promedio es de 20.45 m³/s.

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEO PARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

6.3. Resultados

En la Tabla 6-2 se presentan los caudales base obtenidos mediante diferentes métodos de cálculo. Se observa que el valor mínimo corresponde a 1,15 m³/s, mientras que el máximo alcanza 20,45 m³/s. No obstante, este último valor incorpora la respuesta de la cuenca frente a los eventos de precipitación registrados.

Tabla 6-2. Caudales bases estimados.

Método	Caudal base Río Túa m ³ /s
7Q10	2.15
Q95	1.33
Q base mínimo	1.15
Q base modal	1.15
Q base promedio	20.45

7. Anexos

7.1. Anexo 1. Localización

En la carpeta A1_Localizacion se encuentran:

1. Cuenca del río Cabuyarito
2. Cuenca del río Charte
3. Cuenca del río Cusiana
4. Número de curva calculado
5. Tipos de suelo
6. Usos de suelo

7.2. Anexo 2. Climatología.

En la carpeta A2_Climatología se encuentran:

1. Datos Crudos
2. Resultados
3. Estaciones Climatológicas

7.3. Anexo 3. Cambio Climático

En la carpeta A3_Cambio Climático se encuentra:

1. Estaciones con Downscaling

7.4. Anexo 4. Estudio hidrológico

En la carpeta A4_Estudio Hidrológico se encuentra:

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEPARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

1. Cuencas del sistema Tua.
2. Hidrogramas sintéticos.
3. Modelo
4. Estimación del caudal del río Upía

7.5. Anexo 5. Flujo base

En la carpeta A5_FlujoBase se encuentra:

1. Estaciones de precipitación para flujo base
2. Serie de caudales modelados (Caudales_TUA.xlsx)
3. Serie de precipitación a modelar (PTMM_dia_rec.csv)

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEO PARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

8. Bibliografía

- Appels, W. M., Bogaart, P. W., & van der Zee, S. E. A. T. M. (2016). Surface runoff in flat terrain: How field topography and runoff generating processes control hydrological connectivity. *Journal of Hydrology*, 534. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.01.021>
- Appels, W. M., Bogaart, P. W., & van der Zee, S. E. A. T. M. (2017). Feedbacks Between Shallow Groundwater Dynamics and Surface Topography on Runoff Generation in Flat Fields. *Water Resources Research*, 53(12). <https://doi.org/10.1002/2017WR020727>
- Arias, P. A., Ortega, G., Villegas, L. D., & Martínez, J. A. (2021). Colombian climatology in CMIP5/CMIP6 models: Persistent biases and improvements. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 75–96.
- BEVEN, K. J., & KIRKBY, M. J. (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology / Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant. *Hydrological Sciences Bulletin*, 24(1). <https://doi.org/10.1080/02626667909491834>
- Blöschl, G. (2005). Rainfall-Runoff Modeling of Ungauged Catchments. In *Encyclopedia of Hydrological Sciences*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/0470848944.hsa140>
- Chow, V. Te. (1959). Open-Channel Hydraulics. Ven Te Chow. McGraw-Hill, New York, 1959. xviii+ 680 pp. Illus. 17. *Science*, 131(3408).
- Chow, V. te., & Maidment, D. R. . (1998). *Applied hydrology*. McGraw-Hill.
- Cunge, J. A. (1969). On the subject of a flood propagation computation method (muskingum method). *Journal of Hydraulic Research*, 7(2). <https://doi.org/10.1080/00221686909500264>
- Devia, G. K., Ganasri, B. P., & Dwarakish, G. S. (2015). A Review on Hydrological Models. *Aquatic Procedia*, 4. <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.126>
- Gaspari, F. J., Vagaría, A. M. R., Senisterra, G. E., Denegri, G. A., Delgado, M. I., & Besteiro, S. I. (2009). *AUGMDOMUS : revista eletrónica del Comité de Medio Ambiente*.
- Gil, E. G., & Tobón, C. (2016). Hydrological modelling with TOPMODEL of chingaza páramo, Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 69(2). <https://doi.org/10.15446/rfna.v69n2.59137>
- Gravelius, H. (1914). Flusskunde. *GJ Gótschen*, 1.
- Guo, Y., Zhang, Y., Zhang, T., Wang, K., Ding, J., & Gao, H. (2019). *Surface Runoff*. https://doi.org/10.1007/978-3-662-48297-1_8
- Gutjahr, O., Putrasahan, D., Lohmann, K., Jungclaus, J. H., von Storch, J.-S., Brüggemann, N., Haak, H., & Stössel, A. (2019). Max Planck Institute Earth System Model (MPI-ESM1.2) for the High-

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEOPARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

Resolution Model Intercomparison Project (HighResMIP). *Geoscientific Model Development*, 12(7), 3241–3281. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-3241-2019>

Hall, F. R. (1968). Base-Flow Recessions—A Review. *Water Resources Research*, 4(5).
<https://doi.org/10.1029/WR004i005p00973>

Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society of America Bulletin*, 56(3), 275–370.

INVIAS, I. N. de V. (2009). *Manual de Drenaje para Carreteras*.

Jeziorska, J., & Niedzielski, T. (2018). Applicability of TOPMODEL in the mountainous catchments in the upper Nysa Kłodzka river basin (SW Poland). *Acta Geophysica*, 66(2).
<https://doi.org/10.1007/s11600-018-0121-6>

Kastridis, A. (2020). Impact of forest roads on hydrological processes. In *Forests* (Vol. 11, Issue 11).
<https://doi.org/10.3390/f11111201>

Kent, K. M. and others. (1972). National engineering handbook. *Hydrology Section*, 4.

Luo, M., Liu, T., Meng, F., Duan, Y., Frankl, A., Bao, A., & De Maeyer, P. (2018). Comparing Bias Correction Methods Used in Downscaling Precipitation and Temperature from Regional Climate Models: A Case Study from the Kaidu River Basin in Western China. *Water*, 10(8).
<https://doi.org/10.3390/w10081046>

Montgomery, D. R., & Dietrich, W. E. (1995). Hydrologic Processes in a Low-Gradient Source Area. *Water Resources Research*, 31(1). <https://doi.org/10.1029/94WR02270>

Ruiz García, P., Monterroso Rivas, A. I., Conde, C., Sanchez-Torres, G., Vargas-Castilleja, R., & Báez-Vásquez, J. (2022). *Guía de Escenarios de Cambio Climático CMIP6. Tres Estudios de Caso*.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20064.15369>

Schumm, S. A. (1956). Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey. *Geological Society of America Bulletin*, 67(5), 597–646.

Sørensen, R., & Seibert, J. (2007). Effects of DEM resolution on the calculation of topographical indices: TWI and its components. *Journal of Hydrology*, 347(1–2).
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.09.001>

Strahler, A. N. (1952). Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Geological Society of America Bulletin*, 63(11), 1117–1142.

Strahler, A. N. (1964). *Quantitative geomorphology of drainage basin and channel networks*.

Switanek, M. B., Troch, P. A., Castro, C. L., Leuprecht, A., Chang, H.-I., Mukherjee, R., & Demaria, E. M. C. (2017). Scaled distribution mapping: a bias correction method that preserves raw climate model projected changes. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(6), 2649–2666. <https://doi.org/10.5194/hess-21-2649-2017>

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		 GEOPARK CREAR VALOR Y RETRIBUIR
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente

- Themeßl, M. J., Gobiet, A., & Heinrich, G. (2012). Empirical-statistical downscaling and error correction of regional climate models and its impact on the climate change signal. *Climatic Change*, 112(2), 449–468. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0224-4>
- Wallot, S., & Mønster, D. (2018). Calculation of Average Mutual Information (AMI) and false-nearest neighbors (FNN) for the estimation of embedding parameters of multidimensional time series in matlab. *Frontiers in Psychology*, 9(SEP). <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.01679>
- Wang, L., & Liu, H. (2006). An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling. *International Journal of Geographical Information Science*, 20(2). <https://doi.org/10.1080/13658810500433453>
- Wohl, E., Scamardo, J., & Morrison, R. R. (2025). James Buttle Review: Bed, Banks and Beyond: River Flood Dynamics. *Hydrological Processes*, 39(4). <https://doi.org/10.1002/hyp.70131>
- Yeguez, M., Ablan, M., Buytaert, W., Acevedo, D., Rodríguez, M., & Machado, D. (2019). Modelado hidrológico de un páramo andino venezolano con afloramientos rocosos usando TOPMODEL. *MASKANA*, 10(2). <https://doi.org/10.18537/mskn.10.02.06>

Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 Análisis hidroclimatológico		
Código: AQ194	Versión: 02	Cliente