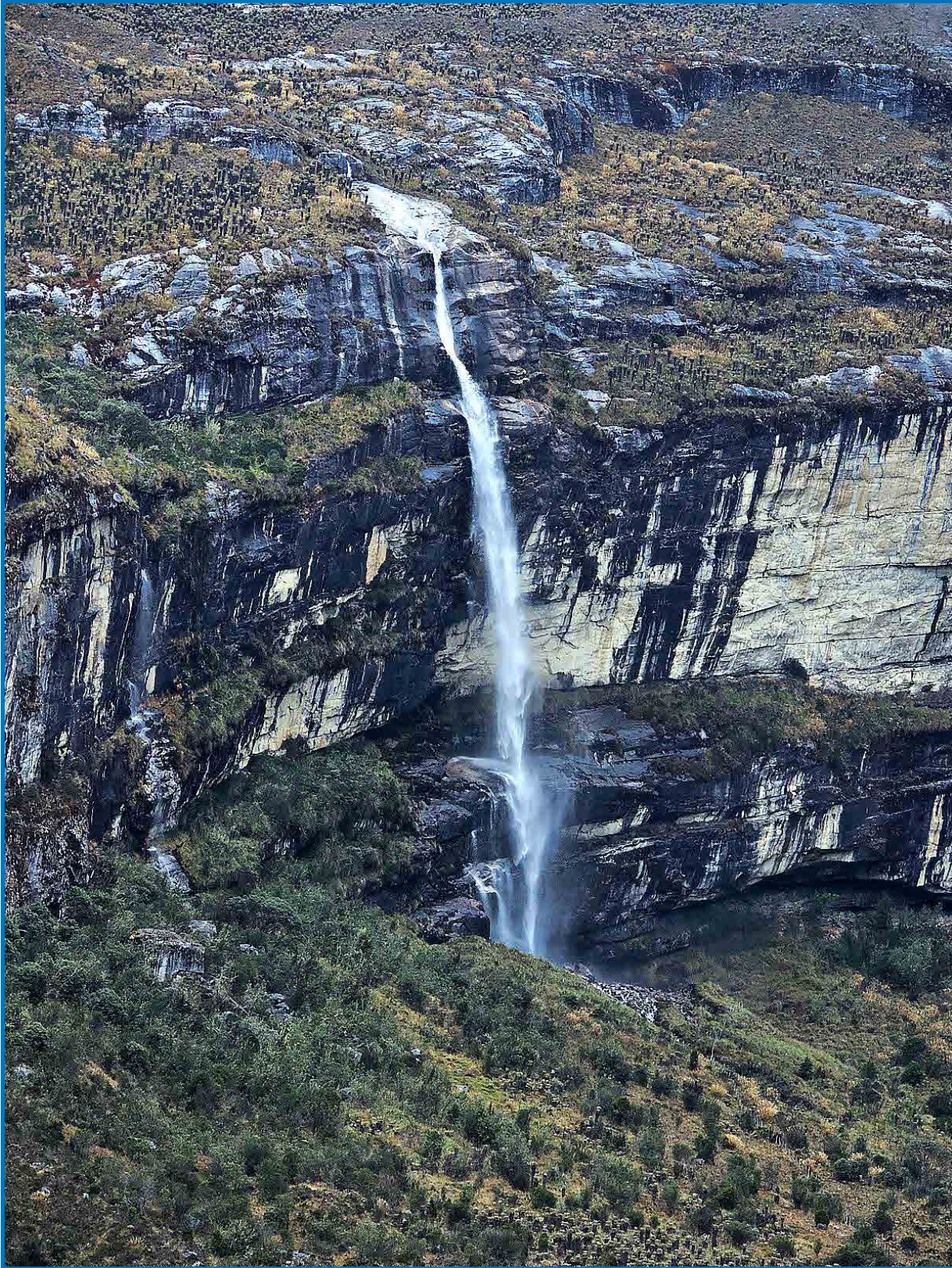


3. HIDROLOGÍA

“Toda el agua que habrá jamás, la tenemos ahora mismo”

National Geographic, (s.f.).

Estimación de la oferta hídrica y diagnóstico general de saneamiento básico existente entre las microcuencas de los Ríos Cardenillo, Cóncavo, San Pablín, Corralitos y Lagunillas pertenecientes a la cuenca Alta del Río Nevado.



Grupos Investigación UPTC: VTS - UDESA - GICA - BC

Salto parte alta de la microcuenca del Río Corralitos

INTRODUCCIÓN

Este capítulo presenta una línea base de conocimiento hidrológico cuyo objetivo fue la estimación de la oferta hídrica, demanda hídrica y un diagnóstico general del saneamiento básico existente en el área de estudio del Parque Nacional Natural El Cocuy y su zona de influencia en la Cuenca Alta del Río Nevado (microcuencas de los Ríos Lagunillas, Cóncavo, Corralitos, San Pablín y Cardenillo).

Como respuesta al objetivo propuesto es presentado de forma sintética el análisis de información espacial e hidroclimatológica secundaria, un inventario de información general de los sistemas de saneamiento básico y de variables asociadas con la demanda hídrica, el análisis de consistencia, homogeneidad y validez de la información hidroclimatológica, la caracterización hidroclimatológica, la morfometría superficial y de drenaje, así como la estimación de la oferta y demanda hídrica.

La información generada incluyó de forma adicional a dos microcuencas (Río Mortiño y quebrada Casas Viejas) brindando una mayor representatividad a esta escala y permitiendo analizar de forma completa la zona de estudio definida en el convenio interinstitucional entre Parques Nacionales Naturales (PNN) y la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC).

Mediante el empleo técnicas de medición, trabajo de campo, análisis e interpretación de información (secundaria y primaria) espacial e hidroclimatológica, así como del uso de herramientas computacionales y modelos matemáticos hidrológicos fueron estimadas las variables de mayor interés asociadas con el componente hidrológico del proyecto.

La interdisciplinariedad presente durante todo el desarrollo de las actividades permitió realizar análisis específicos y detallados, los cuales forman parte fundamental de los resultados de este componente.

Los resultados e indicadores generados por este componente serán un gran referente del estado actual de la hidrología en la zona de estudio y se constituyen como un insumo de gran valor en la gestión integral de los recursos hídricos por parte de los municipios e instituciones de la región.

3.1 DESARROLLO

A continuación, son presentados y analizados de forma sintética los resultados obtenidos con la ejecución del proyecto.

3.1.1 Información secundaria y primaria

La información consultada y recopilada fue obtenida a partir de una rigurosa revisión bibliográfica, visita de reconocimiento, taller de mapeo colectivo y trabajo de campo.

3.1.1.1 Revisión bibliográfica

Específicamente, fue consultado en detalle el centro de documentación de la Corporación Autónoma Regional de Boyacá (Corpoboyacá) en lo concerniente a estudios de Planes de Manejo y Uso Eficiente de Agua (PUUEA) de los acueductos urbanos y algunos rurales de los municipios de Güicán y Cocuy.

Adicionalmente fue recibida y analizada información secundaria de parte de Parques Nacionales Naturales relacionada con el diagnóstico de las Lagunas de los municipios de Güicán y Cocuy. Los estudios hidrológicos (morfométricos, oferta y demanda) analizados evidenciaron considerables oportunidades de trabajo para este componente dentro del Proyecto de Investigación.

3.1.1.2 Visita de reconocimiento

Fue realizada la visita de reconocimiento inicial a la zona de estudio en compañía de los investigadores de los diferentes componentes y algunos de sus colaboradores.

La visita incluyó las microcuencas de los Ríos Lagunillas, Cóncavo, Corralitos, San Pablín y Cardenillo, permitiendo conocer directamente características fisiográficas, geológicas, de suelos, uso de suelo y cobertura vegetal, usos de agua y saneamiento básico.

Esta visita de reconocimiento se convirtió en un importante insumo para el desarrollo de las diferentes actividades programadas en el

componente hidrológico y en especial el trabajo de campo.

3.1.1.3 Trabajo de campo

Fueron desarrollados aforos de caudal en puntos preseleccionados a la salida de las microcuencas de la zona de estudio: Río Cardenillo, Corralitos, San Pablín, Cóncavo, Lagunillas y en las quebradas Casas Viejas y Agua Blanca (Río Mortiño). Adicionalmente, se realizaron visitas de reconocimiento y recolección de información primaria, a estructuras de toma y aducción, pertenecientes a sistemas de acueducto y sistemas de riego, ubicadas en la zona urbana y rural. De igual forma, fue recopilada información secundaria proveniente de diferentes dependencias de las alcaldías de los municipios de Güicán y El Cocuy, relacionadas con oferta, demanda hídrica y saneamiento básico. Las actividades comprendieron además un reconocimiento de los puntos de vertimientos de agua residual en el municipio de Güicán.

3.1.2 Información Hidroclimatológica

La recopilación de información hidroclimatológica requirió de todo un proceso de consulta, solicitud e interacción con el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Adicionalmente, se tuvo acceso directo a estaciones ubicadas en la zona de estudio y alrededores.

Como resultado de todo este proceso de solicitud fue recibida gran parte de la información (parámetros hidroclimatológicos) de las estaciones seleccionadas, las cuales son indicadas en la Tabla 3.1 y Figura 3.1. La estación Ritacuba Blanco EMMA (Meteorológica Especial) debido a su reciente instalación (10/07/2017) todavía no posee información suficiente y validada por el IDEAM.

Las estaciones de las cuales finalmente se recibió información corresponden a ocho (8) estaciones meteorológicas: climatológicas ordinarias (2), climatológicas principales (3) y pluviométricas (3). Adicionalmente, dos (2)

estaciones hidrométricas (limnimétricas). Estas estaciones se encuentran en un rango altitudinal entre 2550 m y 4676 m, con las estaciones San Luis y Nevado del Cocuy, respectivamente. Igualmente, corresponden a diferentes corrientes como son: Nevado, Mortiño, Lagunillas, Agua Blanca y Chicamocha.

A nivel de registro temporal, nueve (9) de las estaciones se encuentran activas, mientras que una (1) se encuentra suspendida. La estación más antigua (Pluviométrica, El Cocuy) comenzó a registrar información desde el 15/01/1934 y fue suspendida el 15/05/1942, aunque el 15/03/1958 fue reinstalada y registra información actualmente.

|| Tabla 3.1 Estaciones hidrometeorológicas consultadas ||

NOMBRE	CATEGORÍA	CORRIENTE	MUNICIPIO	FECHA INSTALACIÓN	FECHA SUSPENSIÓN	INFORMACIÓN RECIBIDA DE IDEAM
El Cocuy	PM	Nevado	El Cocuy	15/03/1958		X
El Mortiño	PM	Mortiño	El Cocuy	15/06/1974		X
El Cocuy	PM	Nevado	El Cocuy	15/01/1934	15/05/1942	X
Güicán	CO	Nevado	Güicán	15/08/1991		X
Sierra Nevada Cocuy	CO	Qda. Lagunillas	Güicán	15/05/1974		X
El Espino automática	CP	Nevado	El Espino	19/11/2005		X
Nevado del Cocuy	CP	Chicamocha	Güicán	19/11/2005		X
Ritacuba Blanco emma	ME		Güicán	10/07/2017		
La Playa, Cardenillo	LG	Río Cardenillo	Güicán	15/08/1974		
Puente vda. Calvario	LG	Río Cardenillo	Güicán	29/10/2013		
Ritacuba Negro	LG	Río Cardenillo	Güicán	29/10/2013		
Güicán	LM	Nevado	Güicán	15/07/1955		X
San Luis	LM	Nevado	Güicán	15/06/1974		X
Totumo	LM	Nevado	El Espino	15/05/1974	15/03/1978	
Laguna la Plaza	CP	Aguablanca	Saravena	17/09/2010		X

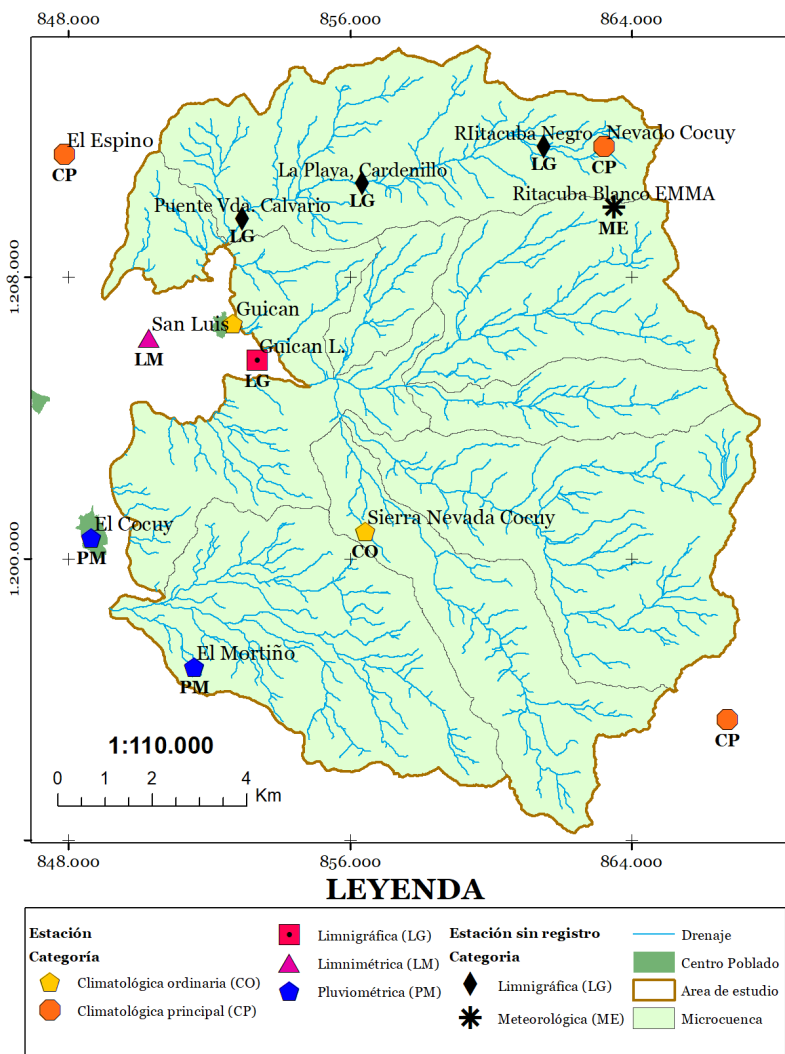


Figura 3.1 Mapa de estaciones hidrometeorológicas consultadas

3.1.3 Saneamiento Básico

La información recopilada sobre saneamiento básico tanto secundaria como primaria, fue de gran importancia, ya que nos brindó un conocimiento más amplio y conciso sobre el estado y las condiciones sanitarias de fuentes y sistemas de abastecimiento de agua para consumo humano, disposición sanitaria de excrementos y orina, ya sean en letrinas o baños, y el manejo sanitario de los residuos sólidos, conocidos como basura.

La información secundaria fue principalmente obtenida del Esquema de Ordenamiento Territorial (EOT) de los municipios de Güicán y

Cocuy. El municipio de Güicán en la actualidad posee un sistema de alcantarillado combinado, que recolecta aguas residuales de tipo doméstico y aguas lluvias, con una cobertura del 99%, el cual fue construido en 1996.

En la visita de campo se identificaron tres puntos de descargas de aguas residuales, los cuales se vierten a potreros sin ningún tipo de tratamiento, muy cerca de los Ríos Nevado y Cóncavo. Dichos vertimientos recientemente han sido utilizados en temporadas secas para riego, lo cual fue confirmado por los mismos pobladores, generando así grandes afectaciones para la salud pública del municipio y la región. Igualmente, se evidenció la molestia de

los habitantes aledaños a los vertimientos, por la disposición de los mismos y por los malos olores y presencia de vectores. En la Tabla 3.2 mostrada a continuación, se presentan las

coordenadas planas de los tres vertimientos inspeccionados y en la Tabla 3.3 se muestra la población aportante a vertimientos y el porcentaje del aporte respectivamente.

|| Tabla 3.2 Coordenadas planas MAGNA Colombia Este de los vertimientos de agua residual ||

VERTIMIENTO	ALTITUD (m)	COORDENADAS ESTE (m)	COORDENADAS NORTE (m)
1 Sector Hotel Colibrí	2884	852294,9	1206335,5
2 Sector Matadero	2854	852082,6	1206509,3
3 Sector Hospital	2775	851929,8	1206402,3

El vertimiento 1 (sector Hotel Colibrí) se encuentra localizado en cercanías de la plaza de mercado, en la parte urbana del municipio, el cual posee un área de drenaje aproximada del 25% del área que aporta el casco urbano. El vertimiento 2 (sector matadero) encuentra pasos abajo del matadero del municipio, el cual

actualmente se encuentra fuera de uso, este vertimiento posee un área de drenaje de 57%. Por último, el vertimiento 3 (sector Hospital) se encuentra en la zona rural a pocos metros de una vivienda y cuenta con un área de drenaje del 18%.

|| Tabla 3.3 Población aportante a vertimientos. Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos Municipio de Güicán (2006) ||

VERTIMIENTO	POBLACIÓN TRIBUTARIA (Hab)	PORCENTAJE (%)
1. (sector Hotel Colibrí)	1555	57
2. (sector Matadero)	510	25
3. (sector Hospital)	375	18
TOTAL	2040	100

Dentro de las actividades realizadas en la visita de campo, se inspeccionaron las plantas de tratamiento de agua potable (PTAP) de los acueductos urbanos de los municipios de Güicán y El Cocuy, de igual forma se visitó la PTAP del Acueducto Regional del municipio de Güicán, la cual actualmente se encuentra fuera de servicio. Debe resaltarse que la PTAP del municipio de El Cocuy forma parte del respectivo sistema de acueducto, pero no capta agua procedente de la zona de estudio, razón por la cual no es de interés directo en temas asociados con demanda y saneamiento básico.

La planta de tratamiento de agua potable del municipio de Güicán es una planta de infiltración de tasa declinante, con una capacidad de 1700 m³ en 22 horas. La desinfección la realizan

con hipoclorito de calcio (250gr). El proceso de infiltración está compuesto por cuatro tanques, donde el lecho filtrante consta de antracita, arena y grava. En cuanto al control y medición del caudal de entrada a la planta existe un vertedero triangular de pared delgada.



3.1.4 Análisis de Consistencia Homogeneidad y Validez de la Información Hidroclimatológica

Los resultados relacionados con detalles de la información procesada, la identificación de datos anómalos, llenado de datos faltantes y la homogeneidad de las series son indicados a continuación.

3.1.4.1 Información Procesada

La información hidroclimatológica recibida del IDEAM fue organizada en formatos compatibles para su posterior procesamiento. Fueron realizadas operaciones de conversión de registros de las variables a formatos de trabajo compatibles con herramientas computacionales estadísticas, edición preliminar de datos y la respectiva organización de información de las cincuenta y dos (52) series temporales correspondientes a diez (10) estaciones hidrometeorológicas.

Las series temporales corresponden a variables como: caudal máximo mensual, caudal medio mensual, caudal mínimo mensual, precipitación máxima mensual en 24 horas, precipitación total mensual, número de días con precipitación al mes, precipitación cada diez minutos, valores medios mensuales de punto de rocío, temperatura máxima mensual, temperatura media horaria, temperatura media mensual, temperatura mínima mensual, evaporación total mensual, humedad relativa horaria, valores medios mensuales de humedad relativa, valores máximos mensuales de niveles, valores medios mensuales de niveles, valores mínimos mensuales de niveles, valores medios mensuales de tensión de vapor, velocidad del viento, dirección del viento cada diez minutos,

velocidad media mensual del viento, brillo solar total y valores de nubosidad media mensual.

El análisis de las cincuenta y dos (52) series (agregadas principalmente a nivel mensual) correspondientes a las variables estudiadas y períodos de registro variables, permitió evaluar la consistencia, homogeneidad y validez de la información. A continuación, se describen los resultados obtenidos, a manera de ejemplo para algunas de las variables.

3.1.4.2 Análisis de Datos Anómalos (Outliers)

La identificación de datos anómalos (outliers) se realizó mediante el empleo de tres metodologías diferentes: diagramas de cajas y patillas (box-plot), prueba de Grubbs (recomendada por la Agencia de Protección del Medio ambiente de los Estados Unidos EPA) y la prueba de Rosner (Gibbons, 1994). Se consideraron como outliers definitivos aquellos que persistieron en la identificación por los tres métodos empleados, y para los cuales se verificó la ocurrencia temporal y espacial, con las demás estaciones de la red meteorológica en la zona, evidenciando su posible carácter anómalo.

3.1.4.3 Llenado de Datos Faltantes

Una vez identificados y excluidos de las series los datos considerados como anómalos definitivos, se realizó el llenado de datos faltantes para las series temporales mediante el empleo de la metodología additive outlierap proach (Gómez et al, 1999) y el software TRAMO (Time Series Regression with ARIMA Noise, Missing-Observations and Outliers), desarrollado por el Banco de España (ver siguientes Figuras).

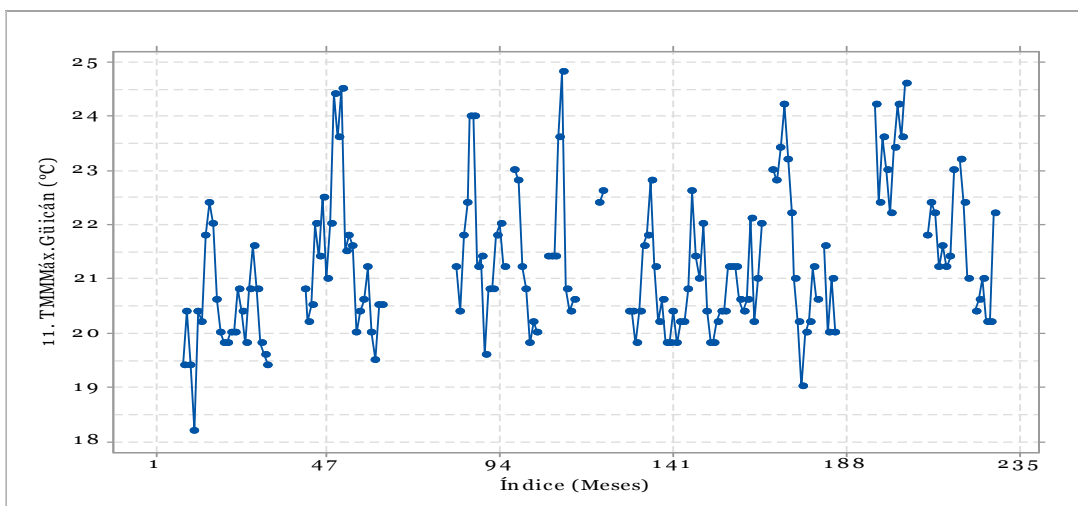


Figura 3.2. Serie temporal de temperatura media mensual máxima recibidas del IDEAM.

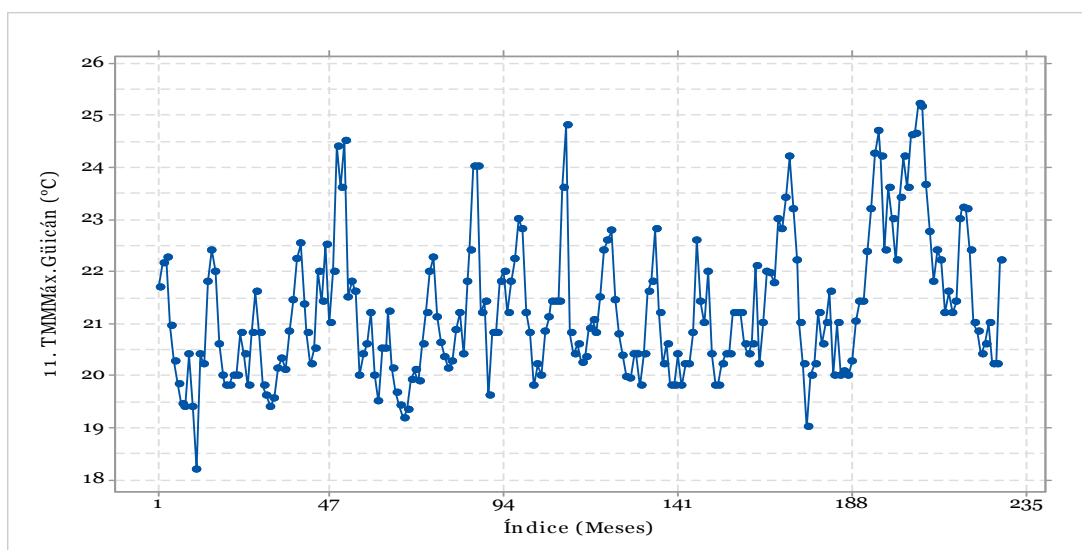


Figura 3.3 Serie temporal completa de temperatura media mensual máxima

3.1.4.4 Análisis de Homogeneidad

Los resultados relacionados con estadísticos básicos, prueba de normalidad, prueba de correlación serial, pruebas gráficas y estadísticas de homogeneidad son descritos a continuación.

Estadísticos básicos

Los estadísticos básicos para cada una de las series temporales fueron estimados. Los resultados de este análisis indican a nivel general una gran variabilidad climática natural, asociada con la presencia de fenómenos macroclimáticos a diferentes escalas temporales.

Prueba de normalidad

Se emplearon pruebas no paramétricas como Kolmogorov-Smirnov para normalidad. En la Figura 3.4 se presentan los resultados de las pruebas para las series ejemplo. Puede observarse que las series de precipitación total mensual (PTM) no cumplen en su mayoría criterios de normalidad. El valor p es una probabilidad que mide la evidencia en contra de la hipótesis nula. En estos casos el valor p es menor que el nivel de significancia (0.05), por lo cual la decisión es rechazar la hipótesis nula y concluir que sus datos no siguen una distribución normal.

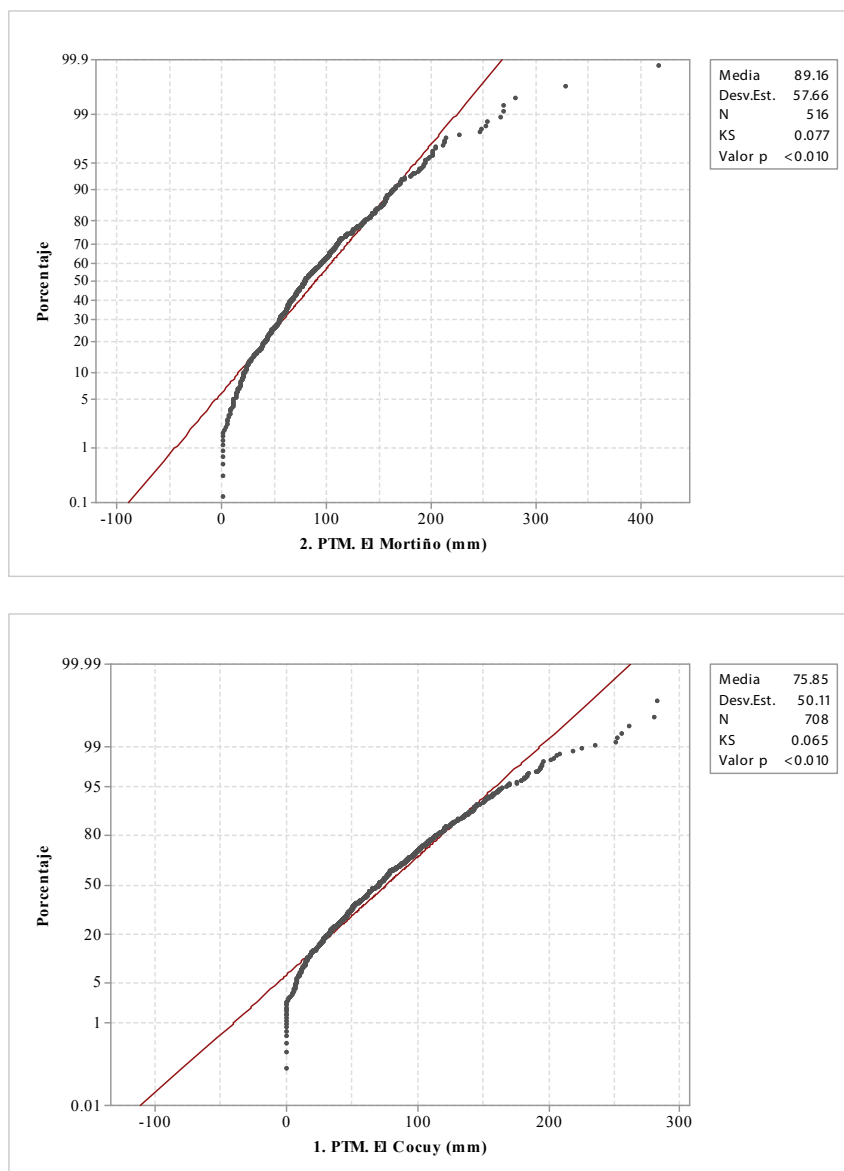


Figura 3.4 Gráficas de probabilidad de series ejemplo de precipitación

Correlación serial

En cuanto a la correlación serial fue empleada la prueba de Wald-Wolfowitz (Rachas). Los resultados permitieron observar que la totalidad de las series de precipitación, temperatura y caudal exhiben un comportamiento no aleatorio ratificando la aceptación de la hipótesis alterna (el orden de los datos no es aleatorio).

Prueba gráfica de homogeneidad

Las pruebas gráficas evidencian la homogeneidad en la mayoría de las series

de precipitación, temperatura y caudal, con algunas excepciones. En la siguiente Figura se muestran algunos ejemplos de los resultados obtenidos para series de precipitación, y temperatura.

Los resultados de la aplicación de una prueba estadística no paramétrica (Mann-Whitney) permitieron detectar con la suficiente potencia series que pueden considerarse homogéneas a un nivel de significancia de 0.05. Para el caso de la precipitación total mensual (PTM) se evidencia, a nivel general, la aceptación de homogeneidad para las series ejemplo.

Igualmente, para las series de temperatura media mensual y de caudal medio mensual. En cuanto a las series de temperatura media

máxima mensual y caudal máximo mensual, estas no aprueban la demostración estadística de homogeneidad.

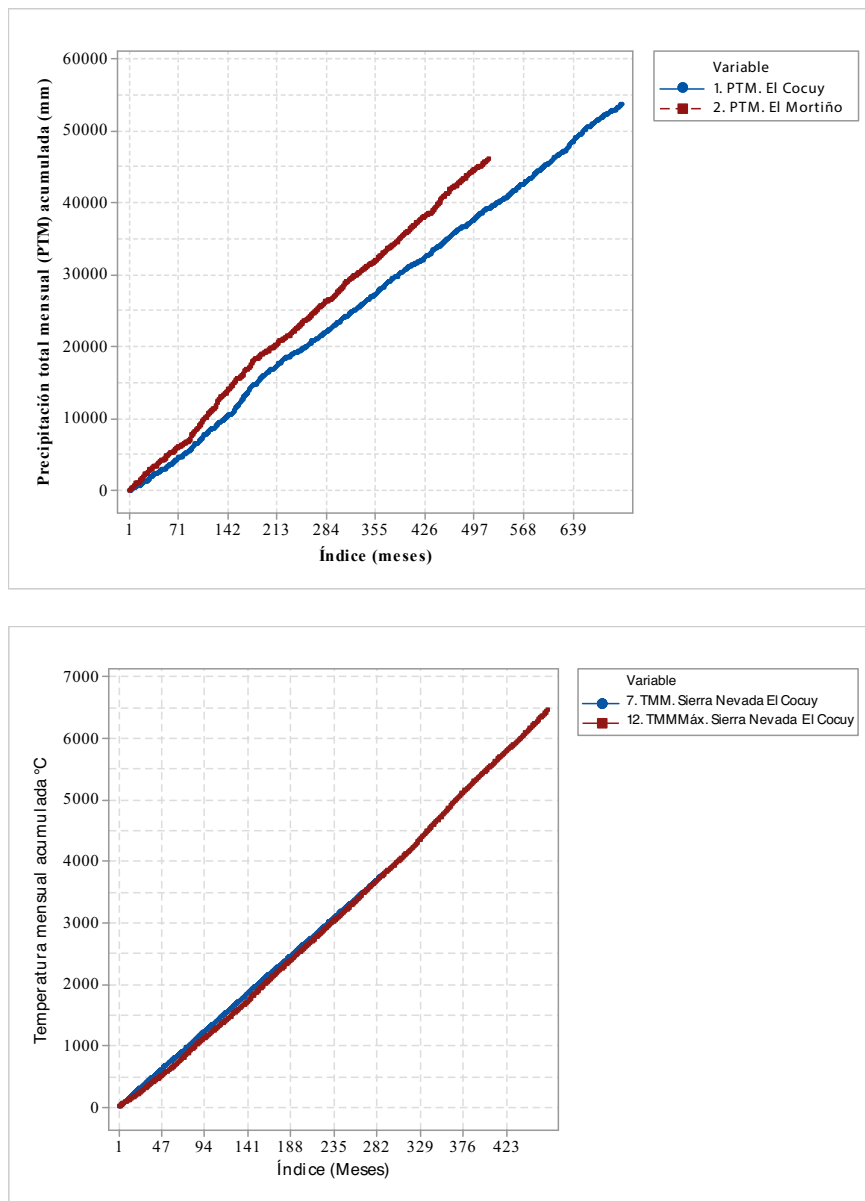


Figura 3.5 Curvas de masa simple de series temporales mensuales de precipitación y temperatura

3.1.5 Morfometría superficial

La morfometría de una cuenca es de gran importancia para el conocimiento de sus características espaciales; tiene como finalidad obtener información indispensable para la correlación del posible comportamiento

hidrológico de cada una de las microcuencas que integran la Cuenca Alta del Río Nevado.

A continuación, se describen algunos de los diferentes parámetros o índices empleados para la estimación de las características morfométricas de las microcuencas de interés en la Cuenca Alta del Río Nevado.

3.1.5.1 Área, orientación, perímetro, longitud axial y ancho promedio

el programa ArcGis (ver Figura 3.6). Los resultados obtenidos para las diferentes microcuencas se presentan en la Tabla 3.4.

Los polígonos de las diferentes microcuencas delimitadas fueron obtenidos mediante

Tabla 3.4 Área de las microcuencas

MICROCUENCAS	ÁREA (km ²)	PERÍMETRO (km)	LONGITUD AXIAL (km)	ANCHO PROMEDIO (km)
Río Lagunillas	32,82	49,68	13,66	2,40
Río Cóncavo	51,98	50,74	12,81	4,06
Río Corralitos	15,39	28,44	9,34	1,65
Río San Pablín	33,06	35,76	8,40	3,94
Quebrada Casas Viejas	8,84	19,08	5,78	1,53
Río Cardenillo	52,73	49,97	12,11	4,35
Río Mortiño	49,04	44,50	11,11	4,41

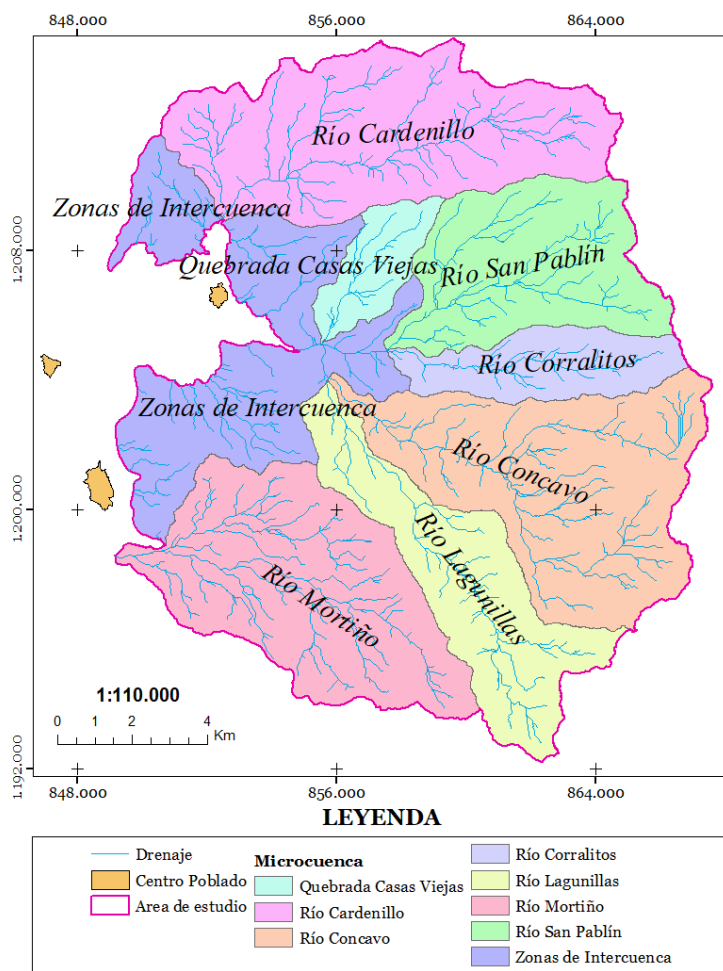


Figura 3.6 Microcuencas de la zona de estudio

En cuanto a la orientación de las microcuencas, la mayoría exhibe predominancia direccional en sentido este-oeste, excepto las de los Ríos Lagunillas, Cóncavo y la quebrada Casas Viejas, las dos primeras presentan un componente direccional en sentido noroccidental, mientras que la tercera en sentido sur-occidental. Se prevé una menor influencia de la radiación solar diaria en las microcuencas de los Ríos Lagunillas y Cóncavo, así como en la quebrada Casas Viejas, con posibles particularidades en su comportamiento hidrometeorológico.

3.1.5.2 Índices de forma

Los resultados pueden ser observados en la Tabla 3.5. El factor de forma en gran medida indica sobre la tendencia de la cuenca a concentrar las crecidas. Por tal motivo, las cuencas con factores de forma bajos, son menos susceptibles a presentar lluvias intensas y crecidas, con respecto a cuencas con áreas similares, pero con factores de forma mayores.

|| Tabla 3.5 Magnitud de índices y coeficientes asociados con la forma de las microcuencas ||

MICROCUENCAS	FACTOR DE FORMA (Kf)	COEFICIENTE DE COMPACIDAD (Kc)	RELACIÓN DE CIRCULARIDAD (Rc)	RELACIÓN DE ELONGACIÓN (Re)
Río Lagunillas	0,176	2,45	0,17	0,47
Río Cóncavo	0,317	1,99	0,25	0,63
Río Corralitos	0,176	2,05	0,24	0,47
Río San Pablín	0,468	1,75	0,32	0,77
Quebrada Casas Viejas	0,265	1,81	0,31	0,58
Río Cardenillo	0,360	1,94	0,27	0,68
Río Mortiño	0,397	1,79	0,31	0,71

Los resultados obtenidos indican que las microcuencas de los Ríos Lagunillas y Corralitos son menos susceptibles a la concentración de crecientes (mayor capacidad de atenuación). Estas cuencas poseen el factor de forma más alejado de una geometría circular, seguidas por la microcuenca de la quebrada Casas Viejas. Microcuencas de los Ríos Cóncavo, Cardenillo y Mortiño presentan una capacidad intermedia de concentración de crecientes, siendo la cuenca del Río San Pablín la que tiene la menor capacidad (más cercana a la forma circular).

La magnitud del coeficiente de compacidad indica que las microcuencas de los Ríos: Lagunillas, Cóncavo, Corralitos, Casas Viejas, Cardenillo y Mortiño, no poseen formas redondas, ovals-redondas, ovals-oblongas, ovals, oblonga-rectangulares u oblongas, sino formas más alargadas (ver Tabla 3.5). Por otra parte, la microcuenca del Río San Pablín se puede clasificar como oval-oblonga a

rectangular-oblonga, de acuerdo con el menor coeficiente de compacidad.

Las anteriores consideraciones también permiten deducir que la mayoría de microcuencas de la zona de estudio son moderadamente susceptibles a las crecidas, debido al coeficiente de compacidad bastante alejado de uno (1), excepto la microcuenca del Río San Pablín semejante a formas circulares, con una menor capacidad de atenuación de crecientes (resultados consistentes con los obtenidos con el factor de forma).

El índice de circularidad tiene un comportamiento inversamente proporcional al coeficiente de compacidad (ver Tabla 3.5). De acuerdo con la anterior apreciación, las dos variables tendrán un mismo significado, pero con tendencias inversas, donde se observa que los resultados obtenidos más cercanos a 1 tendrán una forma más circular u ovalada como en el caso de las microcuencas San Pablín. Estos

resultados guardan correspondencia directa con los análisis realizados para los dos índices de forma anteriores.

Como se puede observar, las microcuencas con menor relación de elongación corresponden a los Ríos Lagunillas y Corralitos, seguidas de la quebrada Casas Viejas (ver Tabla 3.5). Esto indica que las microcuencas mencionadas poseen forma un poco más alargada, mientras que la microcuenca del Río San Pablín es la más semejante a la forma circular, seguida por la del Río Mortiño. Este análisis refuerza la idea de considerar estas dos últimas microcuencas como las de mayor capacidad de concentración de crecientes.

3.1.6 Morfometría de relieve

La morfometría de relieve es de gran importancia en el estudio de las microcuencas

ya que se relaciona directamente con la formación de los suelos, el drenaje superficial, el grado de erosión de las cuencas, entre otros procesos hidrológicos. A continuación se presentan algunos de los resultados asociados con los índices morfométricos superficiales de relieve.

3.1.6.1 Diferencia altitudinal

Para propósitos del análisis considerando el tipo de corrientes (de alta montaña), la diferencia altitudinal junto con el criterio de límite entre zonas, la elevación mediana de cada microcuenca, permitieron identificar dos partes (alta y media), las cuales representan el 50% del área que se encuentra por encima y el 50% por debajo de dicha altitud. En la Figura 3.7 son presentadas las partes identificadas para una microcuenca ejemplo.

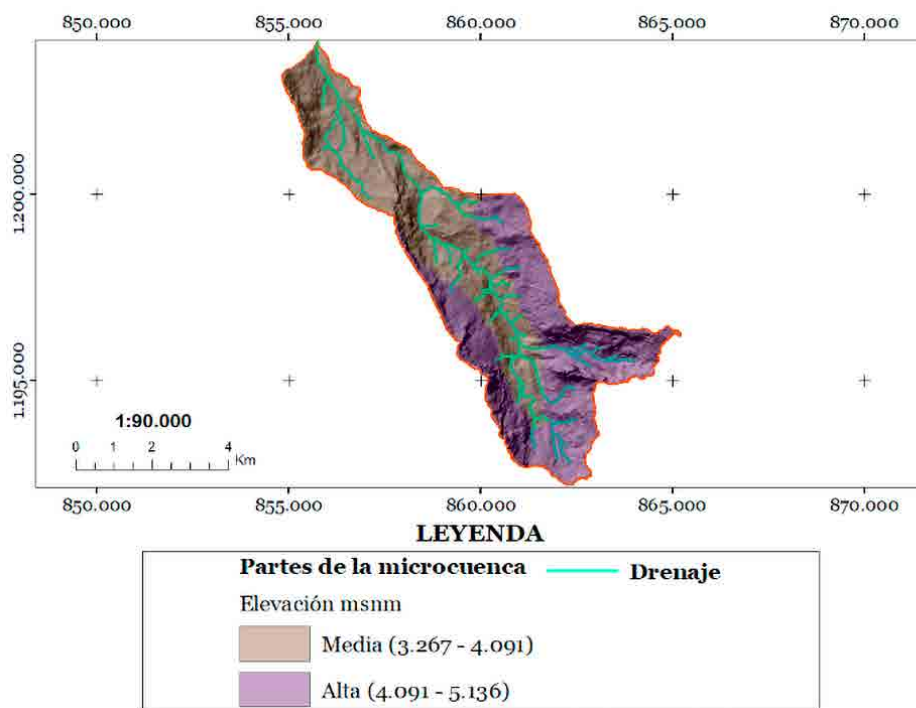


Figura 3.7 Partes de la microcuenca río Lagunillas

3.1.6.2 Curva hipsométrica

Los resultados para una de las microcuencas son presentados en la Figura 3.8. El área bajo la curva hipsométrica tomada en porcentaje,

revela el estado de desarrollo de la cuenca, donde valores superiores a 60% indicarían un desequilibrio en el funcionamiento, con mayor potencial erosivo o una cuenca en fase de juventud. Valores que rodean el 47%,

representan una cuenca en equilibrio y en fase de madurez; mientras que valores inferiores

de 30, implicarían una cuenca sedimentaria en fase de vejez (Racca, 2007).

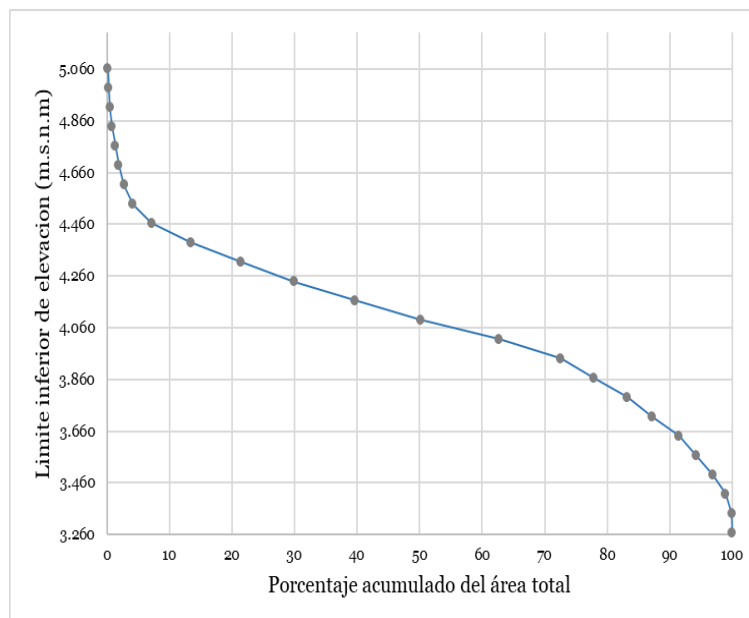


Figura 3.8 Curva hipsométrica microcuenca río Lagunillas

A partir de las curvas hipsométricas obtenidas para cada una de las microcuencas se pudo observar que reflejan un área bajo la curva de entre el 40% y 55%, aproximadamente. Estos resultados indican la presencia de cuencas en estado de equilibrio y en fase de madurez, con una distribución de masa estable a lo largo de la cuenca, aproximadamente igual en todos los tramos, con caudales relativamente estables y caracterizándose por tener una corriente no muy lenta.

3.1.6.3 Coeficientes de masividad, orográfico y pendiente media de las microcuencas

Como se puede observar en la Tabla 3.6, la microcuenca con mayor coeficiente de masividad es la microcuenca quebrada Casas Viejas, con una magnitud de 430,19 m/km², seguida por la microcuenca del Río Corralitos con 286,47 m/km², siendo las microcuencas con menor área y diferencias altimétricas considerables (con relación a su área).

Tabla 3.6 Coeficientes de masividad, orográfico y pendiente media de las microcuencas

MICROCUENCAS	COEFICIENTE DE MASIVIDAD (m/km ²)	COEFICIENTE OROGRÁFICO (Co)	PENDIENTE MEDIA DE LA MICROCUENCA (%)
Río Lagunillas	124,31	0,51	38,02
Río Cóncavo	83,17	0,36	42,67
Río Corralitos	286,47	1,26	39,69
Río San Pablín	132,00	0,58	42,56
Quebrada Casas Viejas	430,19	1,64	36,10
Río Cardenillo	78,13	0,32	40,68
Río Mortiño	76,21	0,28	23,74

Las microcuencas de los Ríos: Cóncavo, Cardenillo y Mortiño, poseen menores magnitudes de coeficiente de masividad, considerando sus grandes extensiones y altas diferencias altimétricas. Por otra parte, las microcuencas de los Ríos San Pablín y Lagunillas exhiben una magnitud intermedia de este coeficiente. Los resultados ponen de manifiesto que este coeficiente puede ser diferente en microcuencas con un rango similar de elevaciones medias.

El coeficiente orográfico guarda relación con el grado de degradación del suelo en las cuencas relacionando directamente la elevación con el flujo del agua y el área, cuyas características influyen sobre la escorrentía superficial en cada cuenca. Según Quintero (2003), cuando el coeficiente orográfico es menor de 6 se considera una cuenca poco accidentada y su potencial de degradación de suelos es bajo, lo cual indica que las microcuencas estudiadas

poseen esas características, ya que los coeficientes se encuentran entre 0,32 y 1,64 (ver Tabla 3.6).

Como puede observarse, la microcuenca con la menor pendiente es la microcuenca del Río Mortiño con 23,74%, y las microcuencas con mayores pendientes son las de los Ríos Cóncavo y San Pablín, con un valor de 42,74% y 42,67, respectivamente (ver Tabla 3.6).

El terreno de la microcuenca del Río Mortiño se puede clasificar como de relieve muy inclinado, con grado de erosión moderada ya que su pendiente se encuentra entre 12% - 25 %, según la escala de clasificación de pendientes utilizada por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAG). Las demás microcuencas, excepto la mencionada anteriormente (Mortiño), poseen un relieve moderadamente escarpado, con grado de erosión severo, encontrándose dentro del rango designado por dicha institución, entre 25%-50% (ver Figura 3.9 y Figura 3.10).

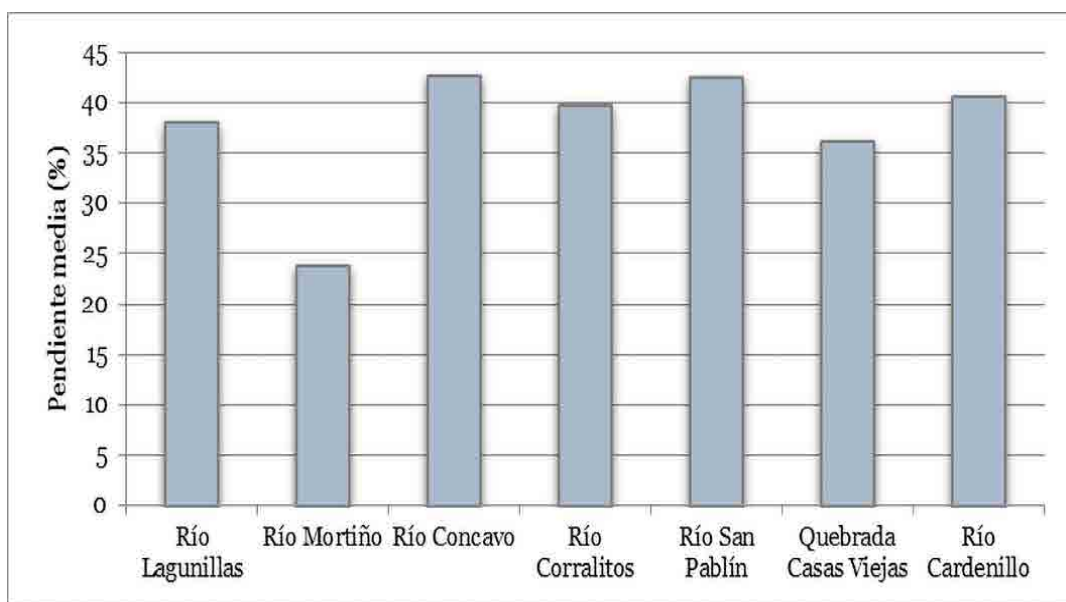


Figura 3.9 Histograma de pendiente media de las microcuencas

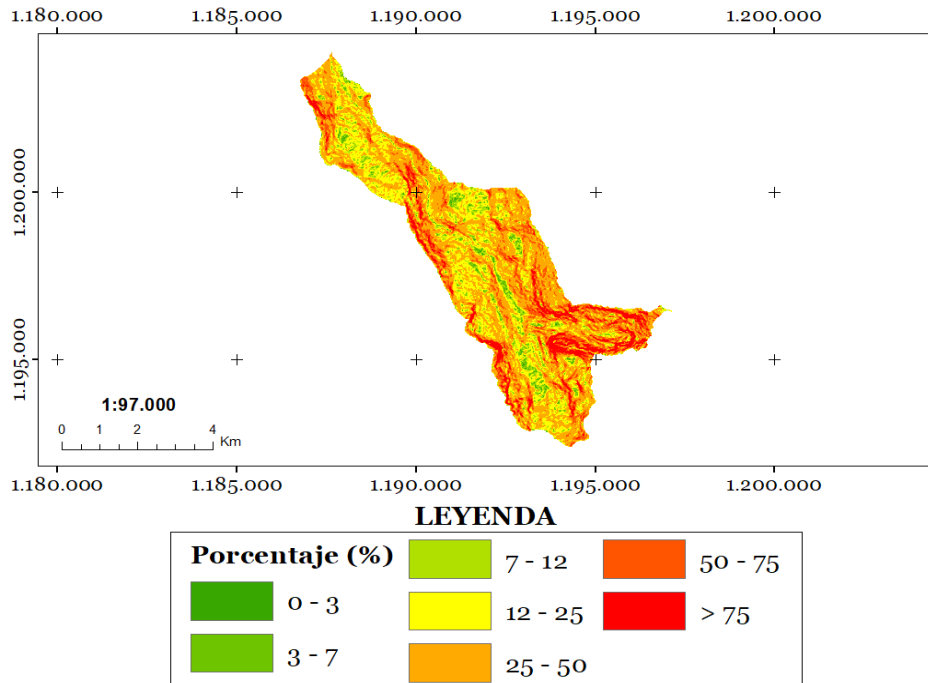


Figura 3.10 Mapa de pendientes microcuenca río Lagunillas

3.1.7 Morfometría de drenaje

Identificar su distribución y diversas características permitirá generar información asociada al efecto de la ocurrencia de eventos hidrocimatológicos extremos y en general de la respuesta hidrológica en cada una de las microcuencas. Dentro de las características analizadas se encuentra el perfil del cauce principal y su pendiente, densidad de drenaje,

orden del cauce, relación de bifurcación, sinuosidad y torrencialidad. A continuación se muestran los resultados para algunas de estas variables.

3.1.7.1 Perfil del cauce principal

La Figura 3.11 presenta el perfil (ejemplo) para el cauce principal de la microcuenca del Río Lagunillas.

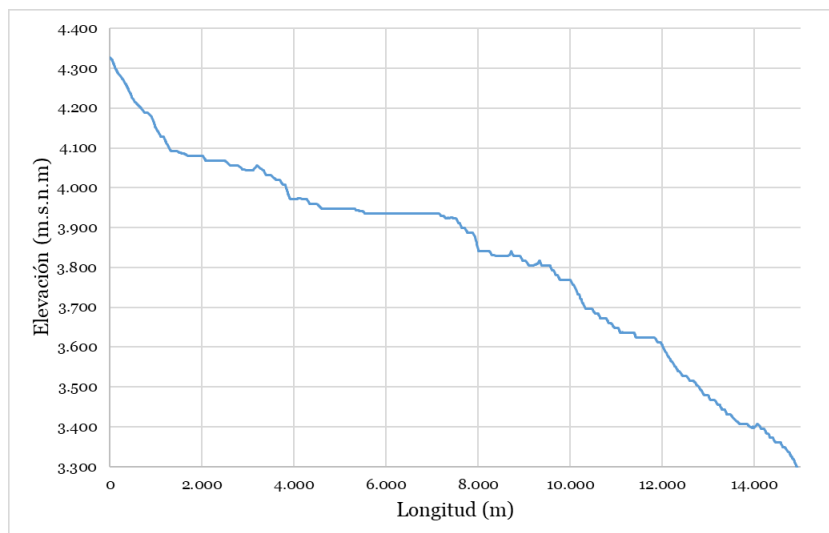


Figura 3.11. Perfil del cauce principal microcuenca Río Lagunillas

3.1.7.2 Pendiente media del cauce principal

Los parámetros y resultados obtenidos para la pendiente media del cauce principal de las diferentes microcuencas se muestran en la Tabla 3.7 y la Figura 3.12.

|| Tabla 3.7 Resultados de estimación de la pendiente media del cauce principal ||

MICROCUENCAS	ELEVACIÓN MÁXIMA (msnm)	ELEVACIÓN MÍNIMA (msnm)	DESNIVEL DE LOS EXTREMOS (msnm)	LONGITUD DEL CAUCE PRINCIPAL (m)	PENDIENTE MEDIA DEL CAUCE PRINCIPAL (%)
Río Lagunillas	4.400	3.276	1.124	15.036,6	7,5
Río Cóncavo	4.600	3.276	1.324	15.453,6	8,6
Río Corralitos	4.920	3.420	1.500	9.356,6	16,0
Río San Pablín	4.590	3.409	1.181	9.373,9	12,6
Quebrada Casas Viejas	4.175	3.108	1.067	56.54,3	18,9
Río Cardenillo	4.750	3.028	1.722	13.501,4	12,8
Río Mortiño	4.450	2.786	1.664	13.144,6	12,7

Según los intervalos que establece Rosgen (1996), puede inferirse que la pendiente de los cauces de las microcuencas Río Lagunillas y Río Cóncavo, con una pendiente de 7,5 % y 8,6%, respectivamente, pueden clasificarse como

altas (4% - 10%), y las demás microcuencas corresponderían a muy altas (>10%), siendo consistentes con la denominación común para este tipo de ríos alto-andinos, conocidos como ríos de montaña.

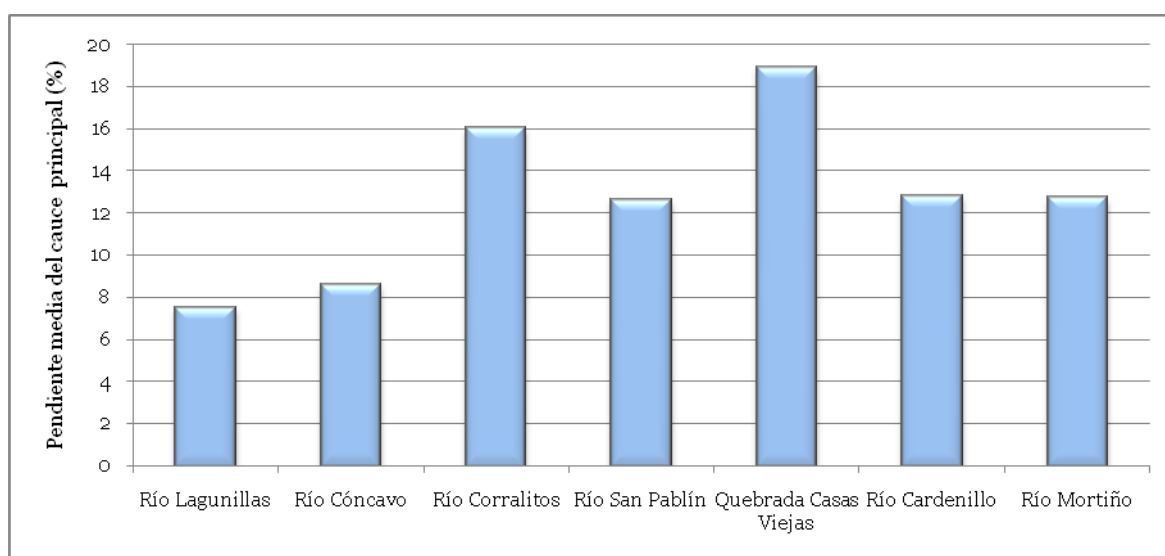


Figura 3.12 Histograma de pendiente media del cauce principal de las microcuencas

3.1.7.3 Orden de los cauces, densidad de drenaje, sinuosidad y coeficiente de torrencialidad

En la Tabla 3.8 se presentan los resultados para cada una de las microcuencas. En la Figura 3.13 pueden observarse los diferentes números de orden asignados a los segmentos de cauce principal de la microcuenca del Río Lagunillas.

Tabla 3.8 Orden del cauce principal de las microcuencas

MICROCUENCAS	ORDEN DEL CAUCE PRINCIPAL	DENSIDAD DE DRENAJE (km/km ²)	SINUOSIDAD (S)	COEFICIENTE DE TORRENCIALIDAD (Un/km ²)
Río Lagunillas	4	1,45	1,15	1,58
Río Cóncavo	5	1,70	1,44	1,64
Río Corralitos	3	1,58	1,09	2,01
Río San Pablín	4	1,65	1,15	1,54
Quebrada Casas Viejas	3	1,75	1,09	1,81
Río Cardenillo	4	1,63	1,17	1,71
Río Mortiño	5	1,97	1,16	1,73

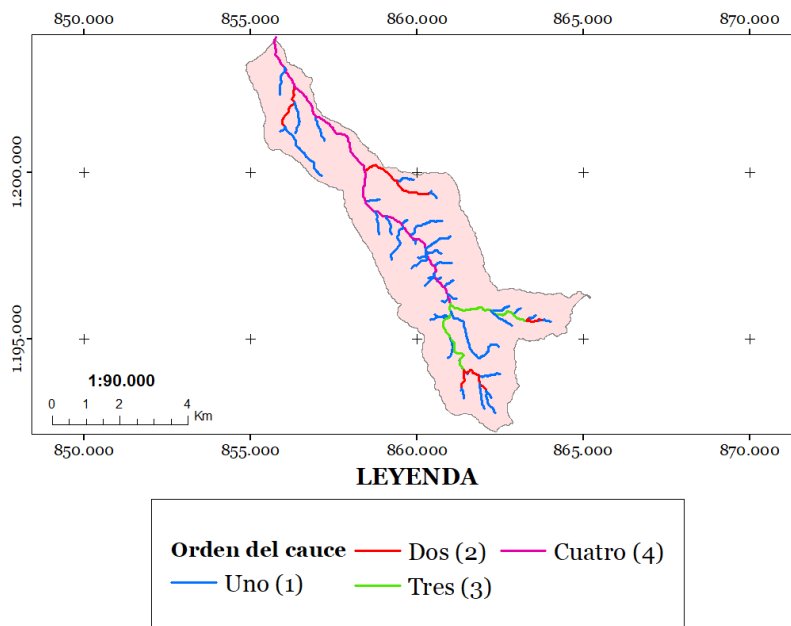


Figura 3.13 Orden de los cauces de la microcuenca Río Lagunillas

Los resultados indican un orden mayor (5) para las microcuencas de los Ríos Cóncavo y Mortiño; intermedio (4) para Lagunillas, San Pablín y Cardenillo; y un orden más bajo (3) para Corralitos y Casas Viejas. Este parámetro es un indicador asociado con la magnitud del caudal que transporta la corriente y al tamaño de la sección transversal, también relacionado

con la longitud total de las corrientes y la densidad de drenaje.

Se puede considerar que las microcuencas de la zona de estudio poseen una densidad de drenaje moderada entre 0,5 y 3,5 km/km². La microcuenca con mayor densidad de drenaje es la del Río Mortiño con 1,97 km/km², seguida por la microcuenca quebrada Casas

Viejas con 1,75 km/km². Las microcuencas con menor densidad de drenaje son las de los Ríos Lagunillas y Corralitos, con 1,45 y 1,58 km/km², respectivamente.

En general, las microcuencas analizadas (sin tener en cuenta otros factores del medio físico) tendrán una moderada respuesta hidrológica ante una tormenta, evacuando la escorrentía directa en un tiempo intermedio. Los resultados mencionados anteriormente son consistentes con los obtenidos para los índices y factores relacionados con la forma de las microcuencas.

Se puede considerar que las microcuencas de la zona de estudio poseen una densidad de drenaje moderada entre 0,5 y 3,5 km/km². La microcuenca con mayor densidad de drenaje es la del Río Mortiño con 1,97 km/km², seguida por la microcuenca quebrada Casas Viejas con 1,75 km/km². Las microcuencas con menor densidad de drenaje son las de los ríos Lagunillas y Corralitos, con 1,45 y 1,58 km/km², respectivamente (ver Tabla 3.8).

Según la clasificación de Schumm (1963), con respecto al índice de sinuosidad, la corriente principal de las microcuencas de los Ríos Lagunillas, Mortiño, Corralitos, San Pablín, Casas Viejas y Cardenillo pueden clasificarse a partir de los resultados obtenidos como canales rectilíneos con valores entre 1 y 1,2 (ver Tabla 3.8). Por otro lado, la microcuenca del Río Cóncavo se clasifica como canal transicional con valores entre 1,2 a 1,5.

Los resultados permiten afirmar que la sinuosidad en las microcuencas estudiadas en la Cuenca Alta del Río Nevado es acorde con valores típicos de ríos de montaña (alta montaña, con altas pendientes y altas velocidades de escorrentía superficial). No obstante, la mayoría de los cauces presentan índices cercanos a uno (1), indicando la presencia de canales rectos.

Como se evidenció en la tabla anterior, las magnitudes obtenidas para las diferentes microcuencas con relación al coeficiente de torrencialidad son bajas, con un promedio de 1,72, lo cual indica una baja susceptibilidad a la erosión lineal, así como tiempos de concentración o de respuesta hidrológica moderados.

3.1.8 Caracterización hidroclimatológica

La posición geográfica del departamento de Boyacá, el cual se encuentra en la Región Andina, y sus características topográficas y de altitud, ejercen una gran influencia en la variabilidad climática regional, reflejadas también en la zona de estudio. La climatología general para las microcuencas es abordada para parámetros como: precipitación, temperatura caudal, evapotranspiración, humedad relativa, tensión de vapor, temperatura de punto de rocío, brillo solar, velocidad del viento, precipitación máxima en 24 horas y número de días promedio con lluvia. En la Figura 3.14 se puede observar el mapa de las estaciones involucradas en este análisis y en la Tabla 3.9 información general de las mismas.

|| Tabla 3.9 Estaciones empleadas en la caracterización hidroclimatológica ||

NOMBRE	CATEGORÍA	CORRIENTE	MUNICIPIO	ALTITUD (m)
El Cocuy	PM	Nevado	El Cocuy	2.749
El Mortino	PM	Mortino	El Cocuy	3.409
Güicán	CO	Nevado	Güicán	2.963
Sierra Nevada Cocuy	CO	Qda. Lagunillas	Güicán	3.716
El Espino Automática	CP	Nevado	El Espino	3.510
Nevado del Cocuy	CP	Chicamocha	Güicán	4.676
Güicán	LG	Nevado	Güicán	2.827
San Luis	LM	Nevado	Güicán	2.550
Laguna La Plaza	CP	Aguablanca	Saravena	4.378

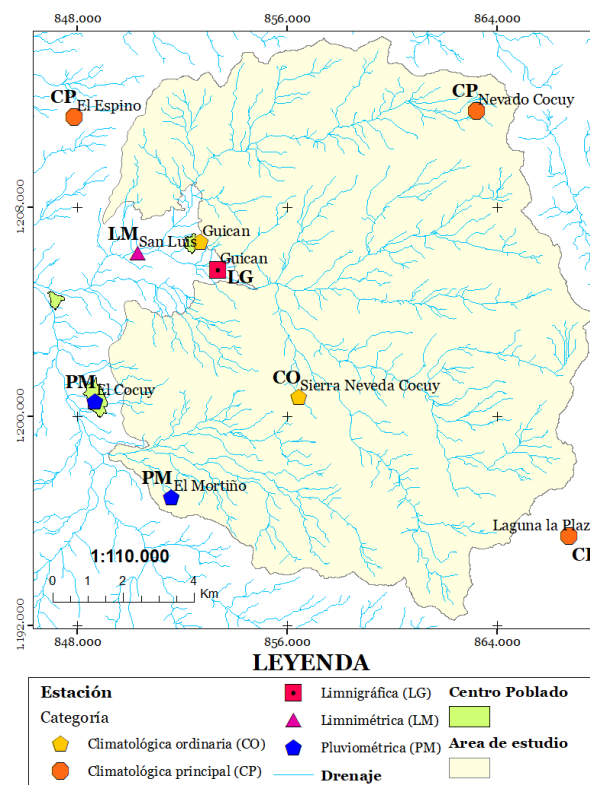


Figura 3.14 Mapa de estaciones empleadas en la caracterización hidroclimatológica

A continuación se ilustran los resultados más importantes de esta investigación para algunas de las variables mencionadas anteriormente, los cuales son fundamentales para el adecuado entendimiento del régimen hidroclimático de la zona de estudio y su relación con la oferta hídrica.

3.1.8.1 Precipitación mensual

Para el análisis temporal del régimen de lluvias en el área de estudio, fue tomado el período de 1991-2016, definido como un período común de las cuatro estaciones más representativas.

Los resultados evidencian un régimen de precipitación bimodal muy marcado, fuertemente influenciado por el desplazamiento que efectúa en sentido norte-sur-norte, la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) durante el año (Tabla 3.10 y Figura 3.15). Otros aspectos de carácter local, como el efecto de calentamiento y advección de masas húmedas que penetran la zona y el factor orográfico,

desempeñan una importante influencia en el comportamiento de las lluvias.

La zona de estudio presenta dos períodos de lluvia al año: el que popularmente se denomina “invierno” (período húmedo), y dos períodos de menos lluvia (períodos secos) que se conocen popularmente como verano. El primer periodo lluvioso, se inicia en marzo y dura todo abril y mayo; el segundo, empieza en septiembre y dura todo octubre y noviembre.

Existen meses de transición al inicio de los diferentes períodos lluviosos como son marzo y septiembre, los cuales se presentan con días alternados de lluvias y tiempo seco. En cuanto a los periodos secos, los meses considerados más secos corresponden en orden de menor a mayor magnitud de precipitación a enero, febrero y diciembre (primera temporada), muy por debajo de los meses de junio, julio y agosto (ver Figura 3.15).

Tabla 3.10 Promedios mensuales multianuales de precipitación (mm)

No.	ESTACIÓN	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.
1	El Cocuy	17,5	39,3	69,4	108,5	116,4	68,7	65,5	67,1	75	108,2	100,3	47,7
2	El Mortiño	27,1	34,6	74,3	125,6	132	89,7	77,6	83,6	84,6	120,2	109,5	51,6
3	PTM. Güicán	27,6	46,1	83,9	140,1	146,3	90,4	77,8	91,3	97,6	133,2	108,8	46,2
4	PTM. Sierra Nevada Cocuy	19,2	38,8	66,3	97,3	117,8	86	74,4	77,4	87,6	114,4	98,8	46,6

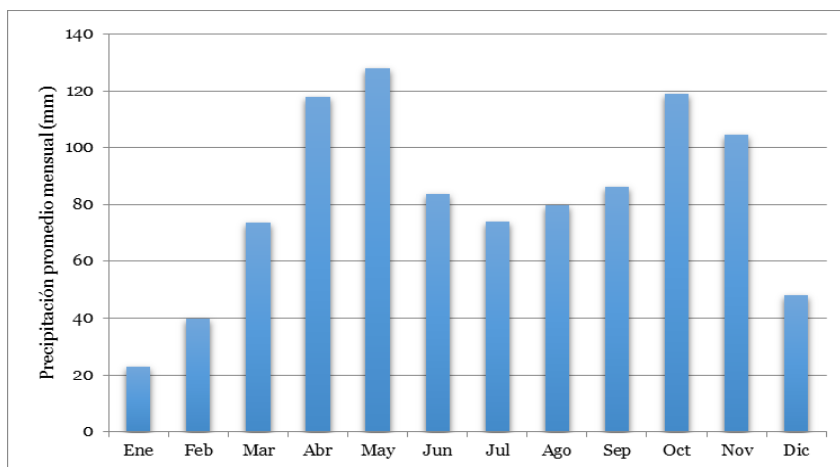


Figura 3.15 Precipitación media mensual en la zona de estudio, 1974-2016

3.1.8.2 Precipitación anual

La precipitación media anual (promedio aritmético) para el periodo de tiempo comprendido entre los años 1991 y 2016 es de 976,9 mm, obtenida a partir de las cuatro (4) estaciones analizadas anteriormente. En la Tabla 3.11 y la Figura 3.16 son presentados los valores totales anuales de precipitación. Sobresalen por su mayor magnitud de precipitación las estaciones Güicán y Mortiño, mayores a 1.000 mm; mientras que las

estaciones El Cocuy y Sierra Nevada Cocuy, se encuentran por debajo de este umbral.

Tabla 3.11 Precipitación media anual (mm).

No.	ESTACIÓN	ANUAL
1	El Cocuy	883,5
2	El Mortiño	1010,4
3	Güicán	1089,2
4	Sierra Nevada Cocuy	924,6

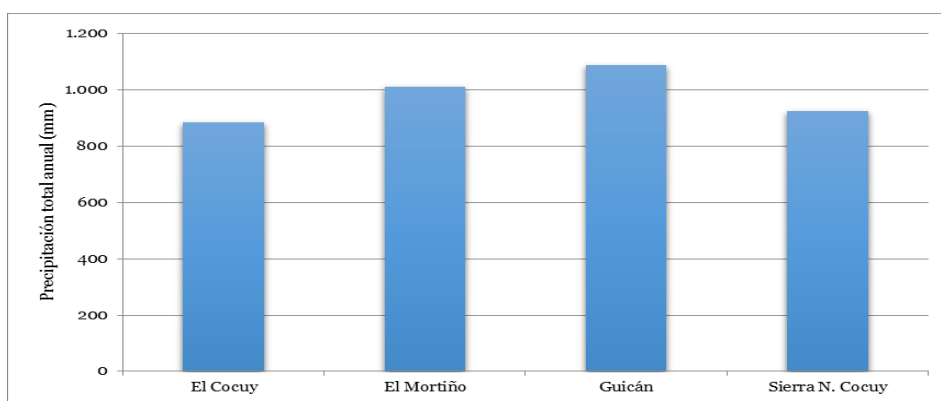


Figura 3.16 Precipitación total media anual (1991-2016)

La Tabla 3.12 muestra los valores de precipitación promedio anual registrada en las cuatro estaciones durante el período de tiempo (1991-2016), el área aferente a cada una de ellas y el resultado de la ponderación de la precipitación con el área.

La estimación realizada para la zona de estudio permitió obtener una precipitación media anual de 986,5 mm, similar en orden de magnitud a la obtenida con el promedio aritmético y reportada anteriormente como 976,9 mm, lo cual indica que la precipitación media anual areal es cercana a los 1.000 mm.

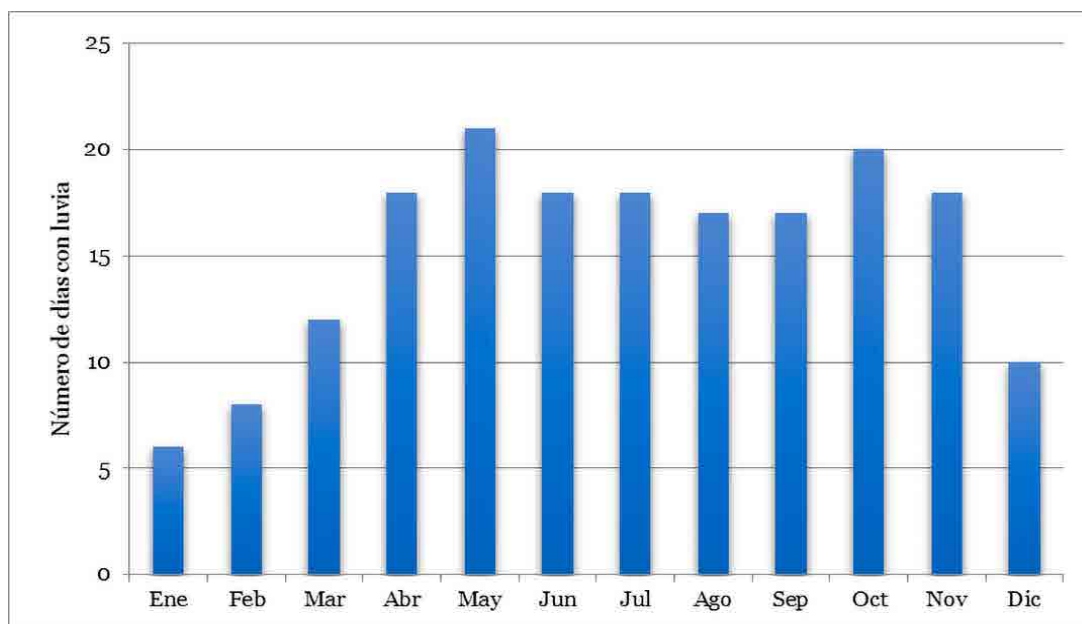
|| Tabla 3.12 Cálculo de la precipitación media anual (Polígonos de Thiessen) ||

ESTACIÓN	PRECIPITACIÓN PROMEDIO ANUAL (mm)	ÁREA (km ²)	PRECIPITACIÓN MEDIA EN LA CUENCA (mm)
El Cocuy	883,5	11,2	986,5
El Mortiño	1.010,4	21,6	
Güicán	1.089,2	100,5	
Sierra Nevada Cocuy	924,6	156,7	

3.1.8.3 Número de días con lluvia

El número promedio mensual de días con lluvia en las estaciones del área oscila entre 6 y 21 días, destacándose el mes de abril y mayo en la primera temporada lluviosa de año, y los meses de octubre y noviembre en la segunda. Por otra parte, durante la primera temporada invernal sobresale el mes de mayo con 21 días y en la segunda el mes de octubre con 20 días, respectivamente.

Puede observarse un comportamiento bimodal no acentuado, y uniforme durante los meses de mitad de año (ver Figura 3.17). Por otra parte, los meses que registran mayor número de días con lluvia van desde marzo hasta noviembre. En lo que respecta a los meses con menor número de días, se encuentran enero y febrero, con promedio por debajo de diez (10) días, seguidos por el mes de diciembre con diez (10) días.



|| Figura 3.17 Promedio mensual de número de días con lluvia 1991-2016 (mm) ||

3.1.8.4 Caudal

El caudal fue analizado a partir de las dos estaciones hidrométricas existentes en la zona de estudio, San Luis y Güicán. Dichas estaciones han monitoreado el caudal durante periodos de tiempo considerables, siendo imprescindible incorporar la totalidad de registros, aun cuando la cantidad sea mayor en una de las dos.

Inicialmente fue considerado el período de tiempo común 1974-2010, y posteriormente el período de registro individual de cada estación: San Luis, 1974 -2012; y Güicán, 1956 -2010, respectivamente.

Esta variable de gran importancia para este proyecto de investigación presenta un régimen bimodal acentuado en las dos estaciones analizadas, indicando que los caudales poseen una mayor magnitud durante los meses de abril,

mayo y junio, durante la primera temporada de lluvias del año; mientras para la segunda temporada, los máximos corresponden con los meses de julio, septiembre, octubre y noviembre (Figura 3.18 a 3.21).

Sobresalen meses como enero y febrero con los caudales medios más bajos del año, seguidos por los de marzo, diciembre y agosto. A nivel general el comportamiento estacional (anual) de la variable es similar en las dos estaciones analizadas.

En las Figuras 3.20 y 3.21 son presentadas las series completas de caudal medio mensual registradas en las dos estaciones hidrométricas estudiadas, en las cuales también es evidente la influencia de la variabilidad climática a través de fenómenos macroclimáticos a nivel estacional (ZCIT) e interanual (ENSO, El Niño y La Niña).

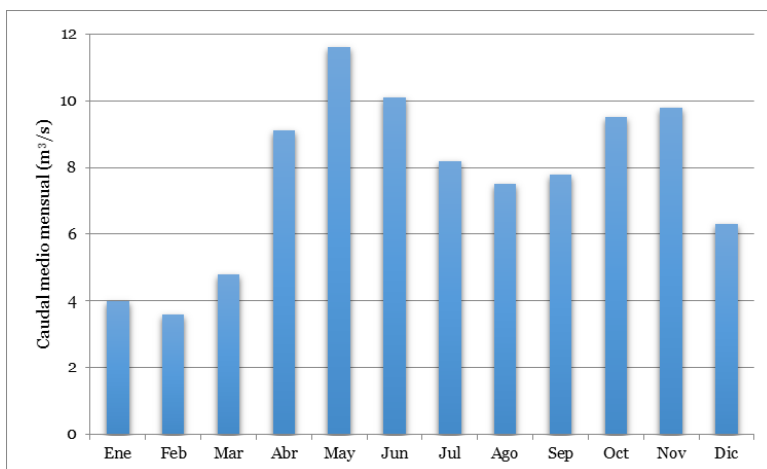


Figura 3.18 Caudal medio mensual multianual estación S. Luis (1974-2012)

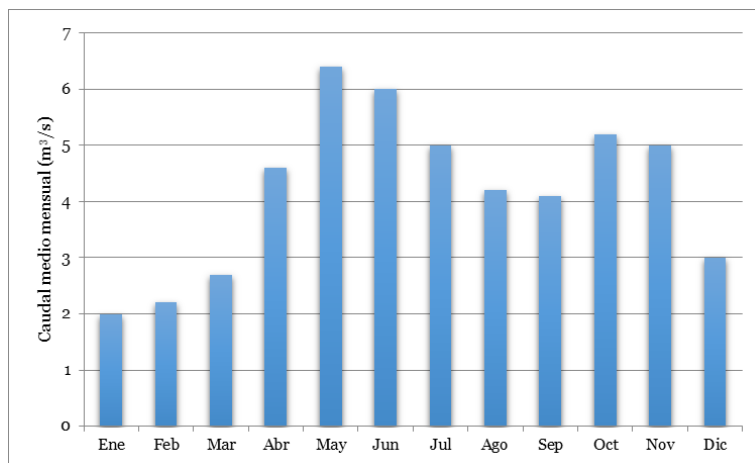


Figura 3.19 Caudal medio mensual multianual estación Güicán (1956-2010)

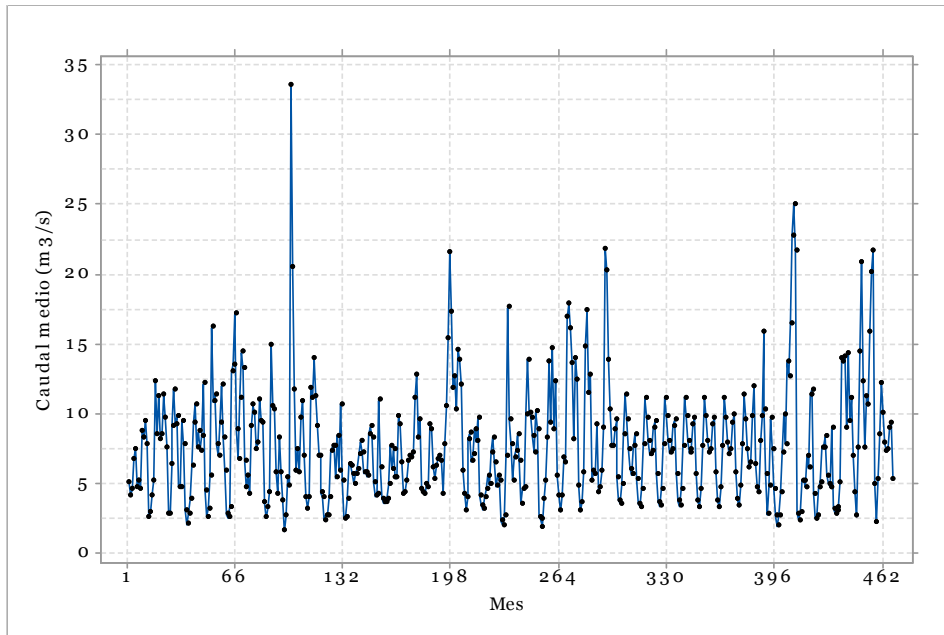


Figura 3.20 Caudal medio mensual estación San Luis (1974-2012)

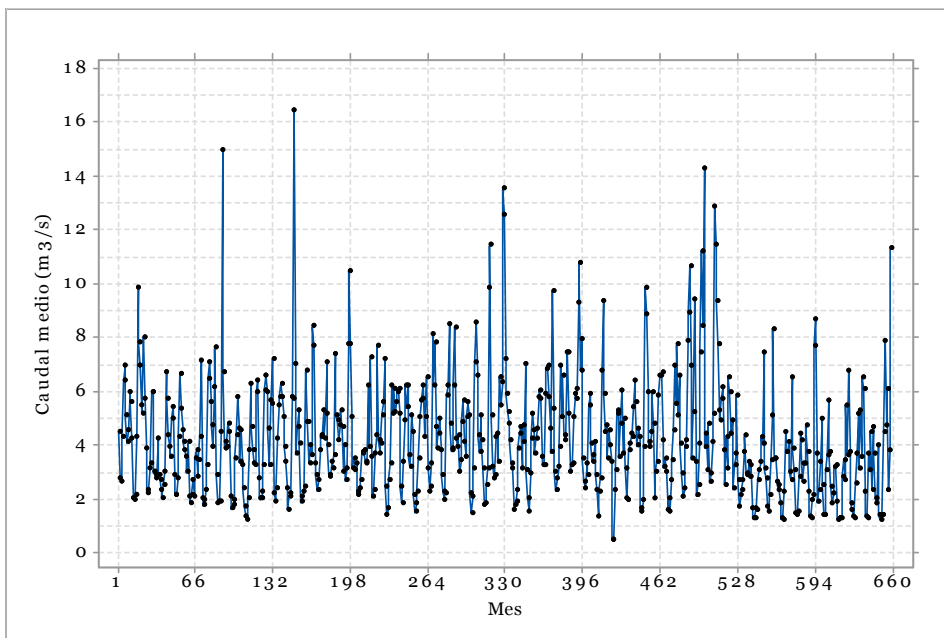


Figura 3.21 Caudal medio mensual estación Güicán (1956-2010)

3.1.8.5 Evaporación

La evaporación fue analizada durante el periodo de tiempo comprendido entre 1991-2016 en las estaciones Güicán y Sierra Nevada. Esta variable presenta una mayor magnitud

durante los meses tradicionalmente más secos (enero, febrero, marzo, diciembre) y de menor magnitud durante los meses de temporadas de lluvias correspondientes a los dos semestres del año (ver Figura 3.22)

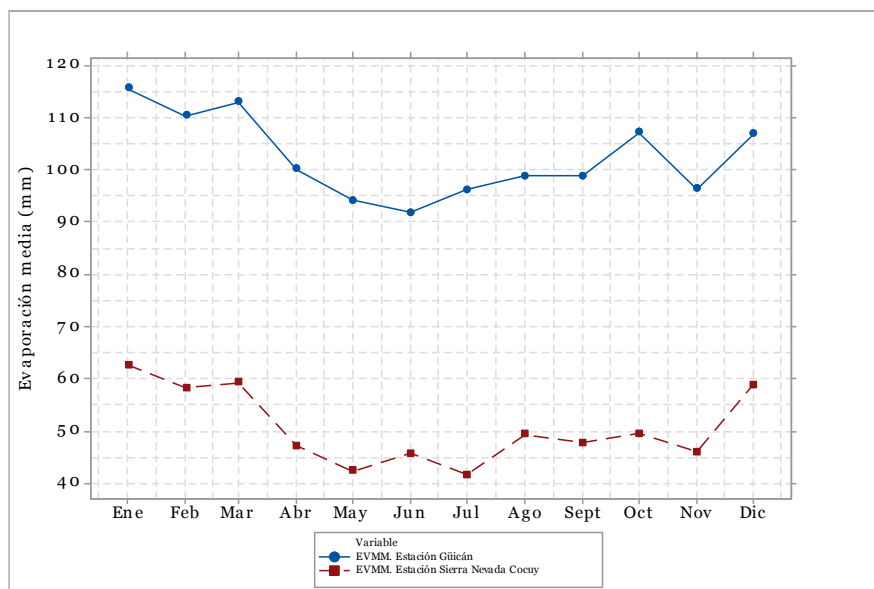


Figura 3.22 Evaporación media mensual (1991-2016)

La variable presenta una media anual de 1.228,8 mm en la estación Güicán y 604,1 mm en la Estación Sierra Nevada Cocuy. La magnitud registrada evidencia una diferencia significativa en las dos estaciones de medición, atribuible a la ubicación geográfica y en especial a la altitud.

Estos resultados permiten inferir que la parte baja de las microcuencas del Río Lagunillas y Cóncavo, y la parte alta de la microcuenca del río Mortiño, presentan una mayor magnitud de evaporación que la registrada cerca a la parte baja de la microcuenca del Río Cardenillo.

3.1.9 Estimación de oferta hídrica

Los resultados obtenidos incluyen los aforos realizados en las diferentes microcuencas, la modelación hidrológica, la estimación del caudal ecológico, y la estimación de la oferta hídrica neta.

3.1.9.1 Aforo de Caudal

Las mediciones de caudal o aforo en las corrientes fueron realizadas por vadeo, mediante el empleo del método de la sección media, con el equipo OTTMFPRO.

Las mediciones se efectuaron en puntos preseleccionados a la salida de las microcuencas de los Ríos Cardenillo, Corralitos, San Pablín, Cóncavo, Lagunillas y de las quebradas Casas Viejas y Agua Blanca (Río Mortiño).

En la Tabla 3.13 se presentan los resultados de los aforos de caudal. La microcuenca con mayor caudal puntual corresponde a la del río Cardenillo, seguido por los Ríos Cóncavo, Lagunillas, San Pablín, Corralitos, Quebrada Agua Blanca y la Quebrada Casas Viejas, respectivamente.

|| Tabla 3.13 Resultados de aforo de caudal en las microcuencas ||

Nº	MICROCUENCA	ANCHO DE LA CORRIENTE (m)	PROFUNDIDAD MEDIA (m)	ÁREA TOTAL (m ²)	CAUDAL (m ³ /s)	FECHA
1	Río Cardenillo	8,60	0,25	2,19	1,649	9/4/2018
2	Quebrada Casas Viejas	3,80	0,12	0,47	0,283	9/4/2018
3	Río San Pablín	5,65	0,25	1,43	0,923	10/4/2018
4	Río Corralitos	5,80	0,21	1,22	0,346	10/4/2018
5	Río Lagunillas	5,80	0,41	2,36	1,316	11/4/2018
6	Río Cóncavo	7,40	0,29	2,17	1,479	11/4/2018
7	Quebrada Agua Blanca (Río Mortiño)	5,88	0,10	0,60	0,338	12/4/2018

Resalta la consistencia de la magnitud de los caudales obtenidos en los aforos versus los resultados presentados en el Esquema de Ordenamiento Territorial del Municipio de Güicán (Alcaldía Municipal de Güicán, 2000) obtenidos del IDEAM. Al comparar la magnitud de los caudales aforados, agrupados de la forma mencionada anteriormente, con los resultados presentados en el EOT, es claramente identificable la correspondencia directa con los valores medios mensuales multianuales registrados para los meses de abril y mayo, en las estaciones limnimétricas Güicán y San Luis, operadas por el IDEAM.

3.1.9.2 Balance hidrológico simple

Este método es tradicionalmente empleado con fines de estimación de oferta hídrica a largo plazo, aceptable para la zona de estudio en su conjunto (área mayor a 250 km²). El

balance hidrológico de largo plazo empleado es definido como un balance simple en el cual fue incluida la precipitación como variable de entrada y la evapotranspiración como variable de salida con el objeto de establecer la oferta hídrica anual y servir como comparación con los resultados anuales del empleo del modelo lluvia escorrentía más elaborado.

Los registros de precipitación (1991-2015) y los respectivos polígonos de Thiessen fueron empleados para obtener la precipitación media mensual. En las Tabla 3.14 son mostrados los valores medios de precipitación mensual para las diferentes zonas de análisis (microcuencas, intercuenca y área completa de estudio). Para propósitos de análisis y su correspondencia entre modelos hidrológicos las zonas de intercuenca son identificadas desde uno (1) hasta seis (6).

|| Tabla 3.14 Precipitación media mensual en las zonas de análisis (mm) ||

No.	MICROCUENCA	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.
1	Río Lagunillas	19,2	38,8	66,3	97,3	117,8	86,0	74,4	77,4	87,6	114,4	98,8	46,6
2	Río Cóncavo	19,2	38,8	66,3	97,3	117,8	86,0	74,4	77,4	87,6	114,4	98,8	46,6
3	Río Corralitos	19,2	38,8	66,3	97,3	117,8	86,0	74,4	77,4	87,6	114,4	98,8	46,6
4	Río San Pablín	21,9	41,1	71,9	111,0	126,9	87,4	75,5	81,8	90,8	120,4	102,0	46,5
5	Quebrada Casas Viejas	27,6	46,1	83,9	140,1	146,3	90,4	77,8	91,3	97,6	133,2	108,8	46,2
6	Río Cardenillo	27,6	46,1	83,9	140,1	146,3	90,4	77,8	91,3	97,6	133,2	108,8	46,2
7	Río Mortiño	22,6	37,0	69,9	110,1	123,9	86,9	75,4	79,7	85,7	116,6	103,5	48,8
8	Zona 1	27,6	46,1	83,9	140,1	146,3	90,4	77,8	91,3	97,6	133,2	108,8	46,2
9	Zona 2	27,6	46,1	83,9	140,1	146,3	90,4	77,8	91,3	97,6	133,2	108,8	46,2
10	Zona 3	27,6	46,1	83,9	140,0	146,2	90,4	77,8	91,3	97,6	133,2	108,8	46,2

No.	MICROCUENCA	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.
11	Zona 4	27,6	46,1	83,9	140,1	146,3	90,4	77,8	91,3	97,6	133,2	108,8	46,2
12	Zona 5	22,2	41,5	72,6	112,5	128,1	87,8	75,8	82,5	91,3	121,3	102,6	46,6
13	Zona 6	22,7	41,9	73,7	115,3	129,8	87,9	75,8	83,2	91,8	122,3	103,0	46,4
14	Zona de estudio completa	22,8	41,1	73,3	115,0	129,1	87,7	75,8	82,8	90,8	121,5	103,3	46,9

En la Tabla 3.15 puede observarse la evapotranspiración real (1991-2015) obtenida a partir de las mediciones de evaporación potencial del IDEAM (1991-2015) en las estaciones Güicán y Sierra Nevada del Cocuy.

Estos resultados fueron ajustados de acuerdo con la aplicación de coeficientes de cultivo de asociados al uso de suelo y cobertura vegetal actual de la zona de estudio.

|| Tabla 3.15 Evapotranspiración real media mensual en las zonas de análisis (mm) ||

No.	MICROCUENCA	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.
1	Río Lagunillas	41,1	38,2	38,9	30,9	27,8	30	27,3	32,4	31,3	32,5	30,2	38,6
2	Río Cóncavo	41,1	38,2	38,9	30,9	27,8	30	27,3	32,4	31,3	32,5	30,2	38,6
3	Río Corralitos	41,1	38,2	38,9	30,9	27,8	30	27,3	32,4	31,3	32,5	30,2	38,6
4	Río San Pablín	51,3	48,4	49,3	41,3	38	39	38	42	41,3	43,8	40	47,9
5	Quebrada Casas Viejas	73,3	70	71,7	63,5	59,7	58,2	61	62,7	62,7	67,9	61,1	67,7
6	Río Cardenillo	73,3	70	71,7	63,5	59,7	58,2	61	62,7	62,7	67,9	61,1	67,7
7	Río Mortiño	41,1	38,2	38,9	30,9	27,8	30	27,3	32,4	31,3	32,5	30,2	38,6
8	Zona 1	73,3	70	71,7	63,5	59,7	58,2	61	62,7	62,7	67,9	61,1	67,7
9	Zona 2	73,3	70	71,7	63,5	59,7	58,2	61	62,7	62,7	67,9	61,1	67,7
10	Zona 3	73,2	69,9	71,6	63,4	59,6	58,1	60,8	62,6	62,6	67,8	61	67,6
11	Zona 4	73,3	70	71,7	63,5	59,7	58,2	61	62,7	62,7	67,9	61,1	67,7
12	Zona 5	52,4	49,4	50,4	42,4	39	39,9	39,1	43	42,3	44,9	41	48,9
13	Zona 6	54,6	51,6	52,7	44,6	41,2	41,8	41,4	45,1	44,5	47,4	43,1	50,9
14	Nevado completo	52,6	49,6	50,6	42,6	39,2	40,1	39,3	43,2	42,5	45,1	41,2	49,1

Los resultados del balance hidrológico son presentados en la Tabla 3.16. Estos evidencian el estado de déficit y superávit en términos

hidrológicos para meses particulares del año promedio.

|| Tabla 3.16 Resultados balance hídrico simple en las zonas de análisis (mm) ||

No.	MICROCUEENCA	ÁREA (km ²)	ESCORRENTÍA (mm)	OFERTA HÍDRICA (m ³)
1	Río Lagunillas	32,82	525,4	17.243.628
2	Río Cóncavo	51,98	525,4	27.310.292
3	Río Corralitos	15,39	525,4	8.085.906
4	Río San Pablín	33,06	456,9	15.105.114
5	Quebrada Casas Viejas	8,84	309,8	2.738.632
6	Río Cardenillo	52,73	309,8	16.335.754
7	Río Mortiño	49,04	560,8	27.501.632
8	Zona 1	0,277	309,8	85.815
9	Zona 2	12,701	309,8	3.934.770
10	Zona 3	11,46	310,9	3.562.914
11	Zona 4	0,0108	309,8	3.346
12	Zona 5	1,04	452,1	470.184
13	Zona 6	5	434,9	2.174.500
14	Nevado completo	274,35	455,1	124.856.139

Los meses con déficit son claramente identificables y consistentes con la caracterización hidroclimatológica, estos son: diciembre, enero y febrero, los cuales corresponden a los meses con menor precipitación y menor caudal durante el año promedio. Meses como junio, julio y agosto correspondientes a la temporada seca de mitad de año, presentan magnitudes de superávit, así como también los meses de transición y los meses de mayor precipitación durante las dos temporadas de lluvias del año.

3.1.9.3 Modelo lluvia-escorrentía (HEC-HMS)

El modelo, HEC HMS fue desarrollado por el Hydrologic Engineering Center (HEC) - United States Corps of Engineers. Esta herramienta fue diseñada para simular la escorrentía superficial de una cuenca como respuesta a la precipitación mediante la representación de la misma como un sistema interconectado de componentes hidrológicos e hidráulicos, cada

uno de las cuales refleja un aspecto del proceso precipitación-escorrentía dentro de cada subcuenca, a partir de variables y parámetros físicos e hidrológicos. La robusta herramienta mencionada, de amplio uso a nivel mundial, fue implementada para la simulación hidrológica lluvia-escorrentía en este proyecto.

Fueron construidos dos modelos separados de cuenca en la herramienta computacional, uno para la Cuenca Alta del Río Nevado y el otro para la microcuenca del río Mortiño (ver Figura 3.23). El primer modelo para representar la Cuenca Alta del Río Nevado, conformada por las microcuencas de los Ríos Lagunillas, Cóncavo, Corralitos, San Pablín Cardenillo y la Quebrada Casas Viejas; y el segundo, para representar la Microcuenca del Río Mortiño. En la Figura 3.24 es presentada la información espacial empleada para la estimación del número de curva, correspondiente al uso de suelo y cobertura vegetal y los suelos (ver Tabla 3.17) de la zona de estudio.

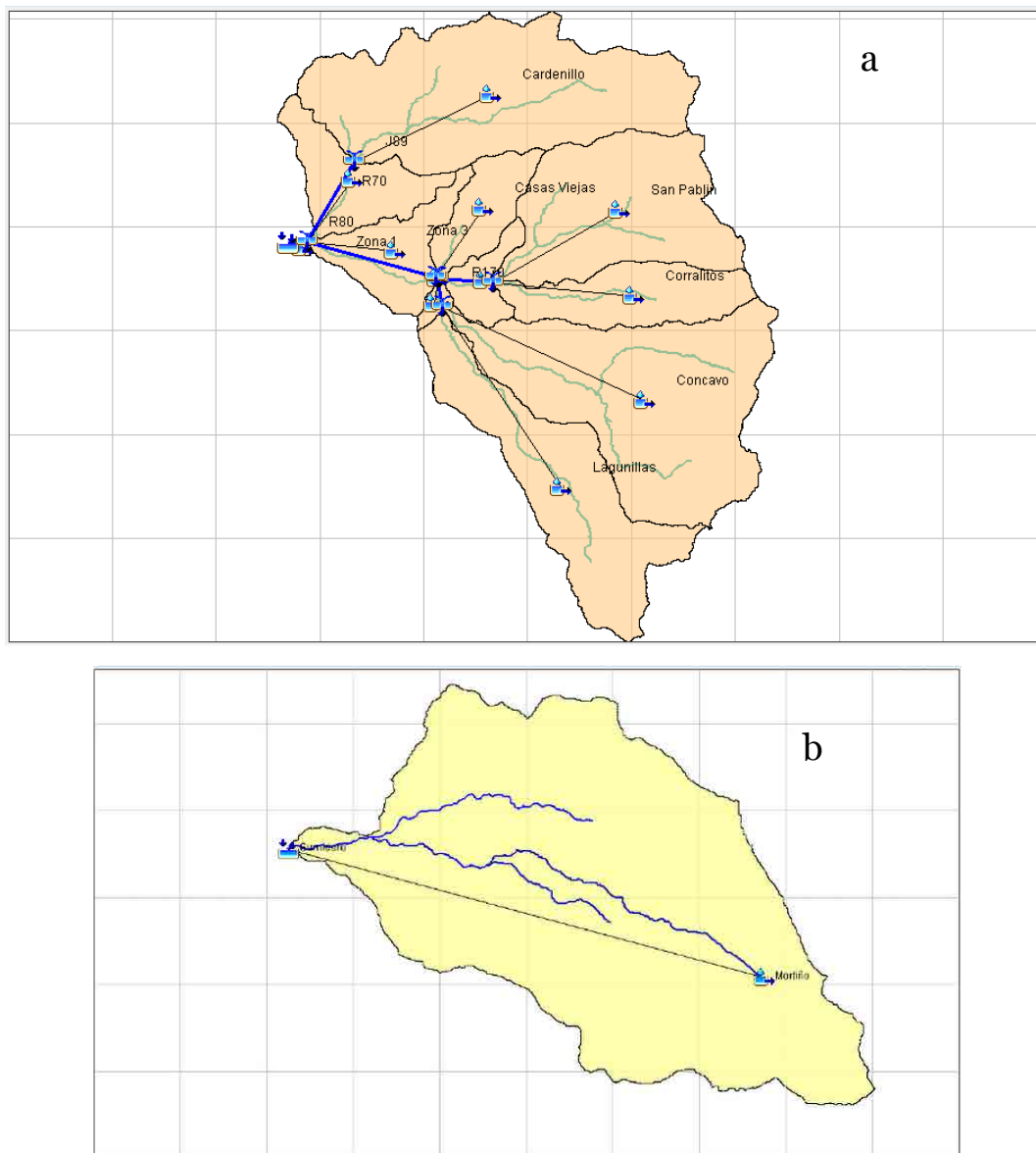


Figura 3.23 Representación esquemática de los modelos construidos en HEC-HMS. a) Cuenca Alta del Río Nevado. b) Microcuenca del Río Mortiño

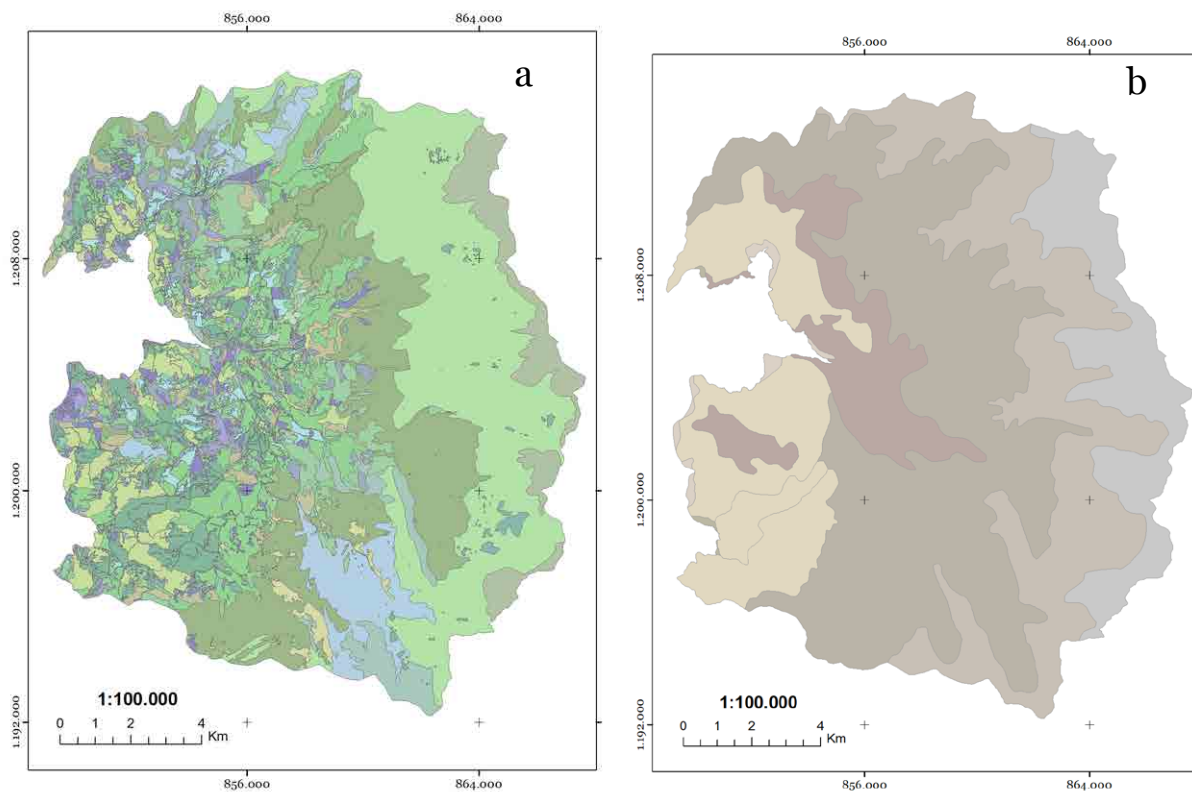


Figura 3.24 Mapas de uso de suelo y cobertura vegetal (a) y suelos (b) empleados en el modelo hidrológico HEC-HMS

|| Tabla 3.17 Categorías de suelos y rocas empleados en el modelo hidrológico ||

MATERIAL PARENTAL	ÁREA (km ²)
Depósitos superficiales de ceniza volcánica sobre rocas sedimentarias clásticas mixtas	47,6
Rocas sedimentarias clásticas arenosas con intercalaciones de limoarcillosas	27,2
Rocas sedimentarias clásticas arenosas con intercalaciones de limoarcillosas con capas discontinuas de ceniza volcánica	0,3
Rocas sedimentarias clásticas arenosas intercaladas con lutitas y calizas biodetríticas	34,2
Rocas sedimentarias clásticas mixtas y depósitos superficiales clásticos hidrogravigénicos	65,3
Rocas sedimentarias clásticas mixtas y localmente rocas ígneas	2,0
Rocas sedimentarias clásticas arenosas con intercalaciones de limoarcillosas	114,2

Los números de curva estimados son indicados en la Tabla 3.18 y los parámetros específicos de importancia en la respuesta hidrológica

de las microcuencas y zonas de análisis son presentados en la Tabla 3.19

|| Tabla 3.18 Número de curva ponderado para las diferentes zonas de análisis ||

MICROCUENCA	NÚMERO DE CURVA (CN)
Lagunillas	76,95
Concavo	79,72
Corralitos	81,38
San Pablín	80,67
Casas Viejas	73,09
Cardenillo	77,85
Mortiño	77,55
Zona 2	74,59
Zona 3	72,10
Zona 4	61,58
Zona 5	63,80
Zona 6	69,20

|| Tabla 3.19 Parámetros morfométricos y de tránsito de caudales ||

MICROCUENCA	LONGITUD (km)	PENDIENTE (m/m)	TIEMPO DE CONCENTRACIÓN (horas)	TIEMPO DE RETARDO (horas)	TIEMPO DE RETARDO (min)
Lagunillas	16,41	0,07	4,17	2,50	75,0
Cóncavo	17,43	0,115	3,97	2,38	71,5
Corralitos	10,88	0,171	2,57	1,54	46,3
San Pablín	10,94	0,158	2,62	1,57	47,2
Casas Viejas	6,88	0,189	1,78	1,07	32,1
Cardenillo	15,2	0,14	3,45	2,07	62,1
Mortiño	13,14	0,127	3,14	1,89	56,6
Zona 2	7,71	0,182	1,96	1,17	35,2
Zona 3	8,58	0,187	2,11	1,27	38,0
Zona 6	4,8	0,204	1,34	0,80	24,1
Zona 4	0,26	0,242	0,14	0,08	2,5
Zona 5	2,43	0,24	0,77	0,46	13,9
Zona 1	1,1	0,213	0,43	0,26	7,8

La metodología incluyó la aplicación del método de número de curva (CN) propuesto por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (USGS) para estimación de abstracciones (pérdidas). El modelo lluvia escorrentía fue parametrizado con el objetivo de generar caudal promedio mensual para el ciclo anual (estacional) de largo plazo por medio de la modelación continua a partir de información climatológica (lluvia y evaporación) e

información física (tipo de suelo, uso del suelo, características morfométricas y datos geográficos) del área de captación de la fuente.

Una vez corrido el modelo lluvia-escorrentía fue obtenida la oferta hídrica media a nivel mensual, la cual es presentada en unidades de caudal (Tabla 3.20).

|| Tabla 3.20 Caudal medio mensual estimado (m³/s) ||

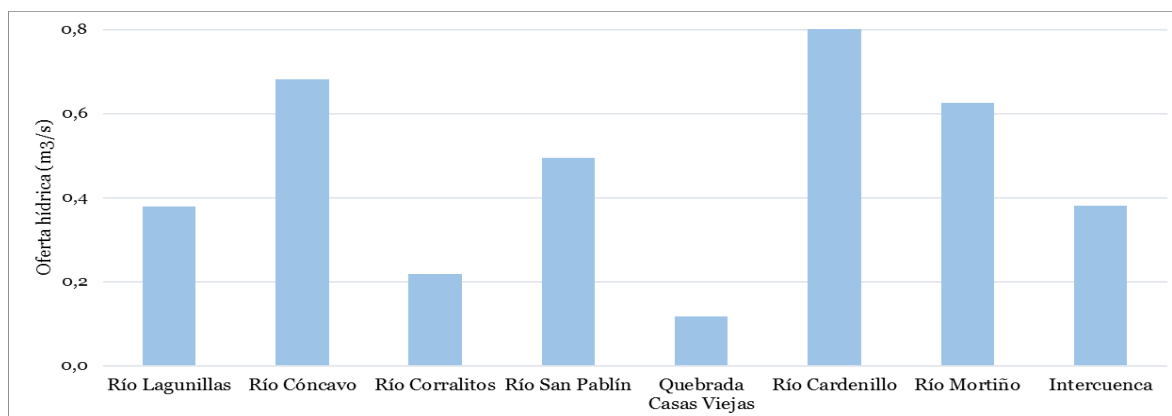
No.	MICROCUENCA	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.
1	Río Lagunillas	0,0024	0,0703	0,2591	0,5383	0,7444	0,4309	0,3269	0,3531	0,4458	0,7093	0,5528	0,1155
2	Río Cóncavo	0,0110	0,1482	0,4837	0,9576	1,3005	0,7771	0,6004	0,6451	0,8022	1,2425	0,9820	0,2310
3	Río Corralitos	0,0052	0,0515	0,1575	0,3033	0,4077	0,2481	0,1937	0,2076	0,2558	0,3901	0,3108	0,0781
4	Río San Pablín	0,0168	0,1184	0,3760	0,7775	0,9538	0,5288	0,4103	0,4727	0,5635	0,8815	0,6810	0,1569
5	Quebrada Casas Viejas	0,0026	0,0212	0,0914	0,2340	0,2512	0,1062	0,0781	0,1082	0,1232	0,2150	0,1508	0,0213
6	Río Cardenillo	0,0409	0,1953	0,6907	1,6203	1,7300	0,7899	0,6003	0,8040	0,9030	1,4993	1,0847	0,1963
7	Río Mortiño	0,0144	0,0980	0,4480	1,0198	1,2356	0,6773	0,5199	0,5772	0,6612	1,1214	0,9197	0,2047
8	Zona 1	0,0001	0,0007	0,0029	0,0074	0,0079	0,0033	0,0025	0,0034	0,0039	0,0068	0,0047	0,0007
9	Zona 2	0,0054	0,0353	0,1420	0,3531	0,3784	0,1641	0,1220	0,1672	0,1894	0,3253	0,2305	0,0355
10	Zona 3	0,0026	0,0247	0,1121	0,2926	0,3148	0,1309	0,0955	0,1334	0,1523	0,2688	0,1873	0,0249
11	Zona 4	0,0000	0,0000	0,0001	0,0002	0,0002	0,0001	0,0000	0,0001	0,0001	0,0002	0,0001	0,0000
12	Zona 5	0,0000	0,0004	0,0041	0,0123	0,0161	0,0068	0,0046	0,0058	0,0075	0,0144	0,0100	0,0008
13	Zona 6	0,0000	0,0054	0,0307	0,0805	0,1006	0,0460	0,0329	0,0408	0,0507	0,0901	0,0644	0,0080
14	Nevado total	0,1100	0,8489	2,9723	6,5472	7,8491	4,0884	3,1207	3,7200	4,4238	7,1377	5,3882	1,0996

La oferta hídrica obtenida con este modelo hidrológico a nivel medio anual es sintetizada en la Tabla 3.21.

|| Tabla 3.21 Oferta hídrica superficial media anual ||

MICROCUENCA	ÁREA (km ²)	OFERTA (m ³ /s)	OFERTA (m ³)
Río Lagunillas	32,82	0,379	11.954.343
Río Cóncavo	51,98	0,682	21.500.812
Río Corralitos	15,39	0,217	6.858.160
Río San Pablín	33,06	0,495	15.602.837
Quebrada Casas Viejas	8,84	0,117	3.687.735
Río Cardenillo	52,73	0,846	26.686.807
Río Mortiño	49,04	0,625	19.702.985
Intercuenca	30,49	0,381	116.049
Zona de estudio	274,3	3,94	124.320.157

En unidades de caudal volumétrico en la Figura 3.25 son presentados los resultados medios anuales para las diferentes zonas de análisis.



|| Figura 3.25 Oferta hídrica media anual por microcuenca (m³/s) ||

La Tabla 3.22 presenta la comparación de los resultados obtenidos con los dos modelos matemáticos hidrológicos. Debe resaltarse la consistencia de los resultados a nivel anual

para la zona de estudio, lo cual da validez a los resultados obtenidos a través del modelo HEC-HMS, permitiendo una mayor resolución temporal a escala estacional (mensual).

|| Tabla 3.22 Comparación anual de resultados con los dos tipos de modelos ||

MICROCUECNA	OFERTA BALANCE HIDROLÓGICO			OFERTA MODELO HEC-HMS		
	mm	m³/s	m³	mm	m³/s	m³
Río Lagunillas	525,4	0,547	17.243.628	359,3	0,379	11.954.343
Río Cóncavo	525,4	0,866	27.310.292	408	0,682	21.500.812
Río Corralitos	525,4	0,256	8.085.906	439,5	0,217	6.858.160
Río San Pablín	456,9	0,479	15.105.114	465,6	0,495	15.602.837
Quebrada Casas Viejas	309,8	0,087	2.738.632	411,5	0,117	3.687.735
Río Cardenillo	309,8	0,518	16.335.754	499,2	0,846	26.686.807
Río Mortiño	560,8	0,872	27.501.632	396,3	0,625	19.702.985
Intercuencia	354,6	0,0102	322.661	328,5	0,381	116.049
Zona de estudio	455,1	3,959	124.856.139	446,9	3,94	124.320.157

3.1.9.4 Oferta hídrica glaciar

Fue propuesta una metodología particular planteada para la estimación del aporte glaciar por fusión considerando los aforos realizados por IDEAM en julio de 2010 en el periglacial y zonas de páramo de varias microcuencas (Cardenillo, Lagunillas y Playitas como afluente de San Pablín), a partir de los cuales ellos establecieron que los glaciares de la Sierra Nevada del Cocuy aportan al sistema hídrico del Río Nevado, entre el 14.9% y el 16.7% de la escorrentía superficial.

Evaluando el grado de correlación y dependencia entre diferentes variables hidroclimatológicas con el área de retroceso glaciar anual, fue posible establecer una fuerte relación con la precipitación, así como de esta última con el número de días con lluvia.

No obstante, a diferencia de una cuenca normal en la que los caudales tienen una relación directamente proporcional con la precipitación, las zonas glaciares presentan una relación inversa, es decir que la precipitación no influye en el incremento de los caudales, sino que

por el contrario influye indirectamente en su reducción.

Con base en los análisis realizados fue planteada una metodología para estimar a nivel estacional (mensual) los caudales de fusión glaciaria (deshielo). Esta consiste en la aplicación de un aporte glaciario del 16% al caudal medio mensual obtenido para el mes de julio en cada microcuenca (modelación lluvia escorrentía en HEC-HMS) y multiplicado por un factor estacional asociado a la relación inversa entre

el número total de días con lluvia al mes y el caudal de fusión de nieve.

Los resultados obtenidos son presentados en la Tabla 3.23, a nivel medio mensual; y a nivel medio anual, en la Tabla 3.24. Estos representan muy bien el comportamiento estacional de los caudales generados por el derretimiento de nieve en las microcuencas involucradas, así como en toda la zona de estudio. Su representación espacial en la zona de estudio a escala de microcuenca es presentada en la Figura 3.26.

|| Tabla 3.23 Caudal medio mensual de deshielo en las microcuencas glaciares (m³/s) ||

No.	MICROCUECNA	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.
1	Río Lagunillas	0,280	0,140	0,102	0,066	0,051	0,059	0,059	0,062	0,059	0,053	0,062	0,102
2	Río Cóncavo	0,513	0,257	0,187	0,121	0,093	0,108	0,108	0,114	0,108	0,098	0,114	0,187
3	Río Corralitos	0,166	0,083	0,060	0,039	0,030	0,035	0,035	0,037	0,035	0,032	0,037	0,060
4	Río San Pablín	0,351	0,175	0,128	0,083	0,064	0,074	0,074	0,078	0,074	0,067	0,078	0,128
6	Río Cardenillo	0,513	0,257	0,187	0,121	0,093	0,108	0,108	0,114	0,108	0,098	0,114	0,187
14	Zona de estudio	2,668	1,334	0,970	0,628	0,485	0,562	0,562	0,593	0,562	0,508	0,593	0,970

|| Tabla 3.24 Oferta glaciaria media anual a nivel de microcuenca ||

MICROCUECNA	OFERTA GLACIARIA	
	m ³ /s	m ³
Río Lagunillas	0,0911	2.872.938
Río Cóncavo	0,1673	5.276.179
Río Corralitos	0,0540	1.702.500
Río San Pablín	0,1143	3.605.665
Quebrada Casas Viejas	0	0
Río Cardenillo	0,1673	5.275.437
Río Mortiño	0	0
Intercuenca	0	0
Zona de estudio	0,870	27.423.612

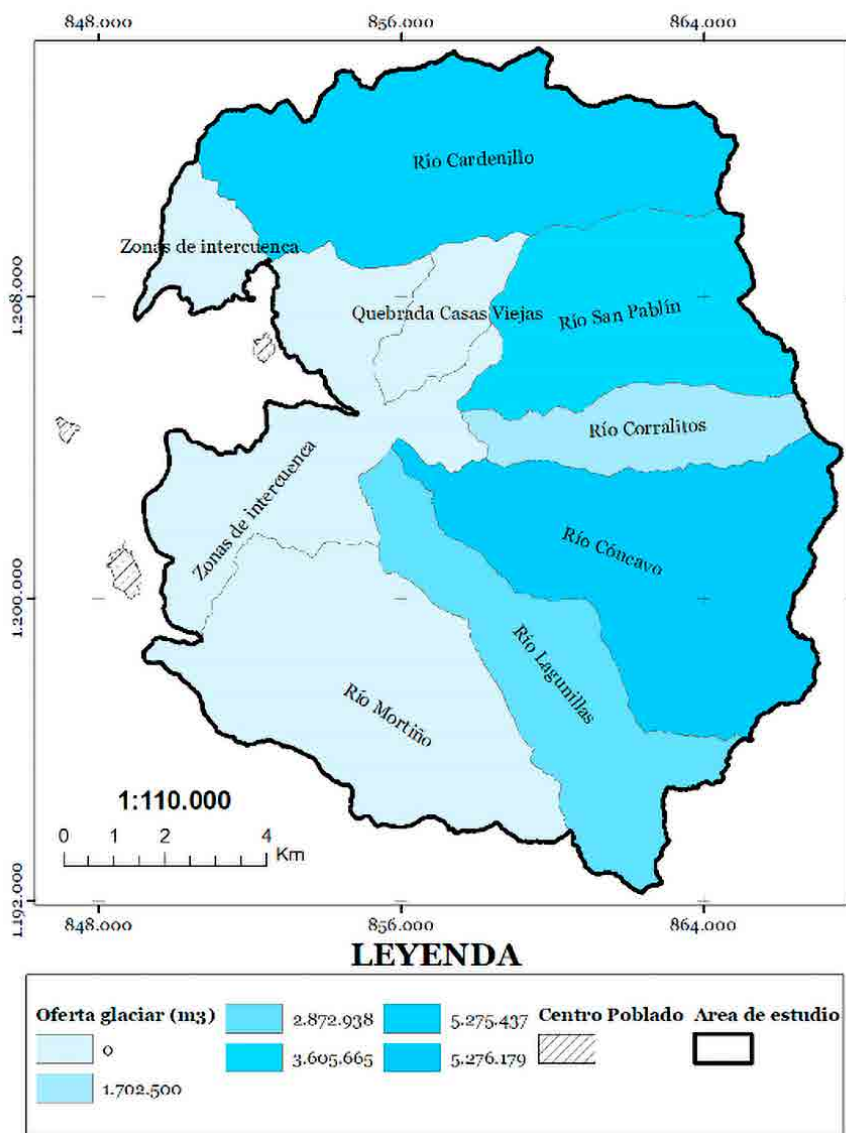


Figura 3.26 Mapa de oferta glaciaria media anual para la zona de estudio

El aporte glaciario según estas estimaciones tiene un máximo en las microcuencas de los Ríos Cóncavo y Cardenillo, seguidos por San Pablín, Lagunillas y Corralitos. Debe considerarse el gran número de variables meteorológicas y físicas de la nieve involucradas, así como también el porcentaje de área glaciaria en cada microcuenca, con el cual se tiene una gran correspondencia.

3.1.9.5 Oferta hídrica total

La oferta hídrica total fue obtenida como la suma del caudal obtenido a través del modelo

lluvia-escorrentía y el caudal de aporte glaciario. La oferta hídrica total para todas las zonas de análisis es presentada a nivel medio estacional (mensual) en la Tabla 3.26.

Como lo muestran todos los resultados de oferta hídrica a nivel superficial, el comportamiento estacional de los caudales es consistente con el efecto marcado por la variabilidad de diferentes variables climatológicas. Dicha variabilidad y su relación directa, o inversa como lo es en el caso del número de días con lluvia al mes se hace evidente con el aporte por fusión o ablación glaciaria.

|| Tabla 3.25 Oferta hídrica total mensual en las zonas de análisis (m³/s) ||

No.	MICROCUEENCA	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.
1	Río Lagunillas	0,282	0,210	0,361	0,604	0,795	0,490	0,386	0,415	0,505	0,763	0,615	0,217
2	Río Cóncavo	0,524	0,405	0,670	1,078	1,394	0,885	0,708	0,759	0,910	1,340	1,096	0,418
3	Río Corralitos	0,171	0,134	0,218	0,342	0,438	0,283	0,229	0,244	0,291	0,422	0,348	0,138
4	Río San Pablín	0,368	0,294	0,504	0,860	1,018	0,603	0,484	0,551	0,637	0,948	0,759	0,284
5	Quebrada Casas Viejas	0,003	0,021	0,091	0,234	0,251	0,106	0,078	0,108	0,123	0,215	0,151	0,021
6	Río Cardenillo	0,554	0,452	0,877	1,741	1,823	0,898	0,708	0,918	1,011	1,597	1,199	0,383
7	Río Mortiño	0,014	0,098	0,448	1,020	1,236	0,677	0,520	0,577	0,661	1,121	0,920	0,205
8	Zona 1	0,000	0,001	0,003	0,007	0,008	0,003	0,002	0,003	0,004	0,007	0,005	0,001
9	Zona 2	0,005	0,035	0,142	0,353	0,378	0,164	0,122	0,167	0,189	0,325	0,230	0,035
10	Zona 3	0,003	0,025	0,112	0,293	0,315	0,131	0,096	0,133	0,152	0,269	0,187	0,025
11	Zona 4	0,00000	0,00001	0,00005	0,00018	0,00020	0,00007	0,00004	0,00007	0,00008	0,00017	0,00011	0,00001
12	Zona 5	0,000	0,000	0,004	0,012	0,016	0,007	0,005	0,006	0,008	0,014	0,010	0,001
13	Zona 6	0,000	0,005	0,031	0,081	0,101	0,046	0,033	0,041	0,051	0,090	0,064	0,008
14	Nevado total	2,778	2,183	3,943	7,175	8,334	4,650	3,682	4,313	4,986	7,646	5,981	2,070

|| Tabla 3.26 Oferta hídrica (media anual) superficial total ||

MICROCUEENCA	OFERTA SUPERFICIAL SIN APOORTE GLACIAR		OFERTA SUPERFICIAL TOTAL	
	m ³ /s	m ³	m ³ /s	m ³
Río Lagunillas	0,379	11.954.343	0,470	14.827.281
Río Cóncavo	0,682	21.500.812	0,849	26.776.992
Río Corralitos	0,217	6.858.160	0,271	8.560.660
Río San Pablín	0,495	15.602.837	0,609	19.208.502
Quebrada Casas Viejas	0,117	3.687.735	0,117	3.687.735
Río Cardenillo	0,846	26.686.807	1,014	31.962.244
Río Mortiño	0,625	19.702.985	0,625	19.702.985
Intercuenca	0,381	116.049	0,060	1.892.160
Zona de estudio	3,94	124.320.157	4,812	151.743.769

Debe resaltarse que los resultados son consistentes con la información hidrométrica de la estación más cercana, aunque esta solo cubre una parte de la zona de estudio de uno de los modelos de cuenca parametrizados en HEC-HMS. Un análisis comparativo realizado entre los resultados obtenidos para el primer modelo implementado en HEC-HMS de la

Cuenca Alta del Río Nevado (sin incluir la microcuenca del Río Cardenillo) y los registros de la estación hidrométrica Güicán, permitieron conocer la consistencia de los resultados a lo largo de la mayoría de meses del año, excepto en algunos meses de la segunda temporada seca (ver Figura 3.27).

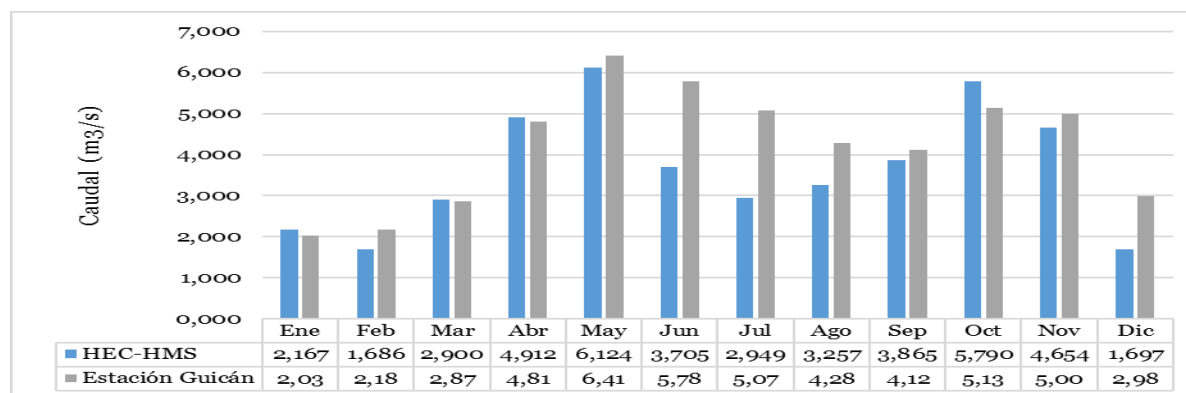


Figura 3.27 Validación de resultados obtenidos con información hidrométrica disponible

3.1.9.6 Caudal ecológico

El caudal ecológico fue estimado a través del método hidrológico establecido mediante la Resolución 865 de 2004 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Este método permite realizar la estimación considerando un porcentaje de descuento del 25%, adoptado también por el IDEAM como

caudal mínimo ecológico. El porcentaje es aplicado al caudal medio mensual multianual más bajo de la corriente en estudio, en este caso de cada microcuenca.

Con base en la estimación de la oferta hídrica media a nivel estacional (mensual), finalmente en la Tabla 3.27, son presentados los resultados obtenidos de caudal ecológico mediante el empleo del método hidrológico.

Tabla 3.27 Caudal ecológico estimado para las diferentes microcuencas

MICROCUECENA	CAUDAL (m³/s)	CAUDAL (l/s)	VOLUMEN ANUAL (m³)
Río Lagunillas	0,05251	52,5	1.655.944
Río Cóncavo	0,10122	101,2	3.192.054
Río Corralitos	0,03359	33,6	1.059.307
Río San Pablín	0,07111	71,1	2.242.628
Quebrada Casas Viejas	0,00066	0,7	20.704
Río Cardenillo	0,09574	95,7	3.019.275
Río Mortiño	0,00359	3,6	113.364
Zona de estudio	0,5175	517,5	16.319.058

3.1.9.7 Oferta hídrica neta

La oferta hídrica neta una vez descontado el caudal ambiental es presentada en la

Tabla 3.28. En la Figura 3.28 es representada espacialmente la oferta hídrica neta media anual a escala de microcuenca para toda la zona de estudio.

Tabla 3.28 Oferta hídrica neta.

MICROCUCENCA	OFERTA (m³/s)	OFERTA (m³)
Río Lagunillas	0,418	13.171.338
Río Cóncavo	0,748	23.584.938
Río Corralitos	0,238	7.501.353
Río San Pablín	0,538	16.965.874
Quebrada Casas Viejas	0,116	3.667.031
Río Cardenillo	0,918	28.942.969
Río Mortiño	0,621	19.589.621
Intercuenca	0,380	11.983.680
Zona de estudio	4,294	135.424.711

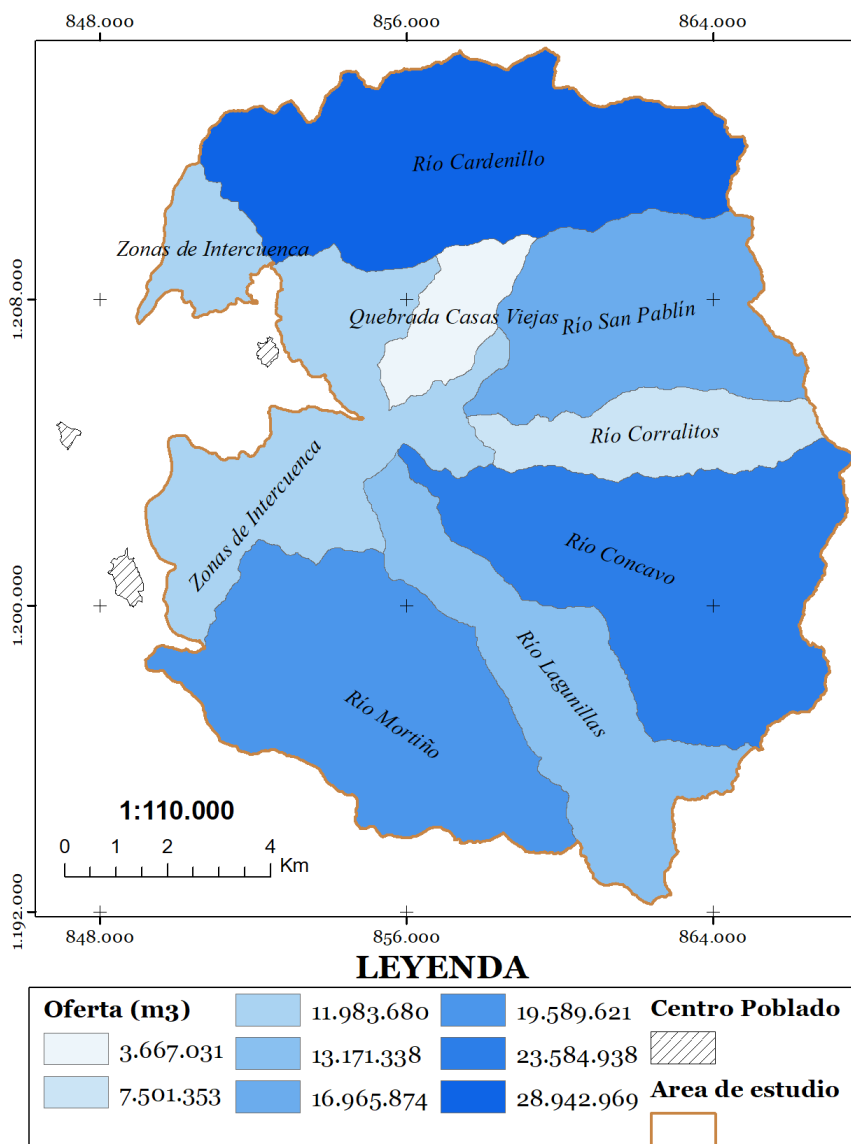


Figura 3.28 Oferta hídrica neta a escala de microcuenca en la zona de estudio

Los resultados muestran a la microcuenca del Río Cardenillo con la mayor oferta hídrica, seguida por la de los Ríos: Cóncavo, Mortiño, San Pablín, Lagunillas, zonas de intercuenca y finalmente Corralitos y la quebrada Casas Viejas. Estos resultados tienen fuertes señales de diferentes fenómenos hidroclimatológicos, especialmente de la precipitación y el derretimiento glaciar, así como de las características físicas y morfológicas de las zonas analizadas (área).

3.1.10 Estimación de demanda hídrica

Los resultados del análisis de información primaria y secundaria, la estimación de la demanda hídrica por las dos metodologías propuestas y su integración son presentados en este numeral.

La información secundaria asociada a usos de agua en la zona de estudio fue obtenida del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (2010), Corpoboyacá, Parques Nacionales Naturales (PNN) y los Esquemas de Ordenamiento Territorial de los municipios de Güicán y Cocuy. A continuación, son presentados de forma sintética los resultados obtenidos con la consulta realizada. Los resultados mostrados a continuación hacen énfasis en la información proveniente de las fuentes de información secundaria y primaria más relevante para la estimación de la demanda hídrica.

3.1.10.1 Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM)

El IDEAM en 2010, presentó un inventario de fuentes de abastecimiento de agua para

consumo humano correspondientes el casco urbano y veredas de los municipios del Cocuy y Güicán. De esta manera se establecía que para consumo humano los centros urbanos de los municipios de Cocuy y Güicán situaban sus bocatombas sobre fuentes hídricas que nacen en el páramo o en lugares aguas abajo del glaciar. Con relación al consumo humano rural, evidenciaba el estudio que las comunidades ubicadas en la parte alta de la cuenca del Río Nevado, poseen sistemas de abastecimiento ofertados gracias a las corrientes naturales que se desprenden del glaciar.

3.1.10.2 Corpoboyacá

La Corporación Autónoma Regional de Boyacá (Corpoboyacá) a través de la Subdirección de Ecosistemas y Gestión, y el Grupo de Recurso Hídrico, permitió al grupo del subcomponente hidrológico realizar la consulta de información alfanumérica de importancia existente en estas dependencias, asociada con concesiones de agua existentes en la zona de estudio.

3.1.10.3 Análisis de información primaria - visita a Estructuras de Toma

Con el objetivo de recopilar información de primera mano relacionada con demanda hídrica fueron visitadas estructuras de toma de sistemas de acueducto y riego presentes en la zona de estudio. Para algunas de las estructuras estas visitas sirvieron para complementar la información secundaria obtenida de las referencias bibliográficas ya consultadas. En la Figura 3.29 se muestra la ubicación espacial de las estructuras de toma, por microcuenca y zonas de intercuenca. En la Figura 3.30 se presentan fotografías de uno de los diferentes tipos de estructuras de toma visitadas.

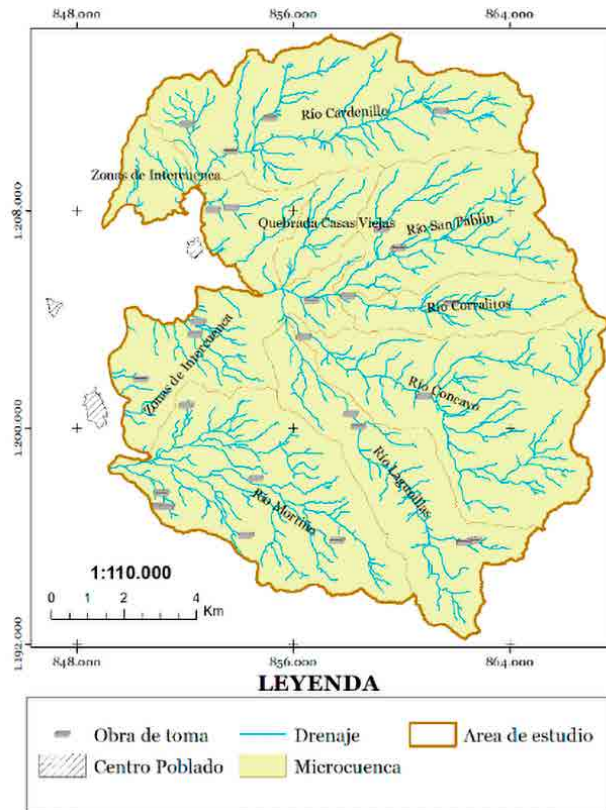


Figura 3.29 Mapa de estructuras de toma en funcionamiento y operación en la zona de estudio



Figura 3.30 Fuente de abastecimiento y estructura de captación Acueducto El Romero, Municipio de Güicán

3.1.10.4 Estimación a partir de medición de la demanda

La información secundaria y primaria plasmada finalmente en el inventario de obras de toma permitió establecer la demanda hídrica por

microcuencas, zonas de intercuenca y toda la zona de estudio (ver Figura 3.31). La magnitud de los caudales extraídos corresponde a los de las obras con o sin concesión de aguas que operan actualmente en la zona de estudio (ver Tabla 3.29 y Figura 3.32).

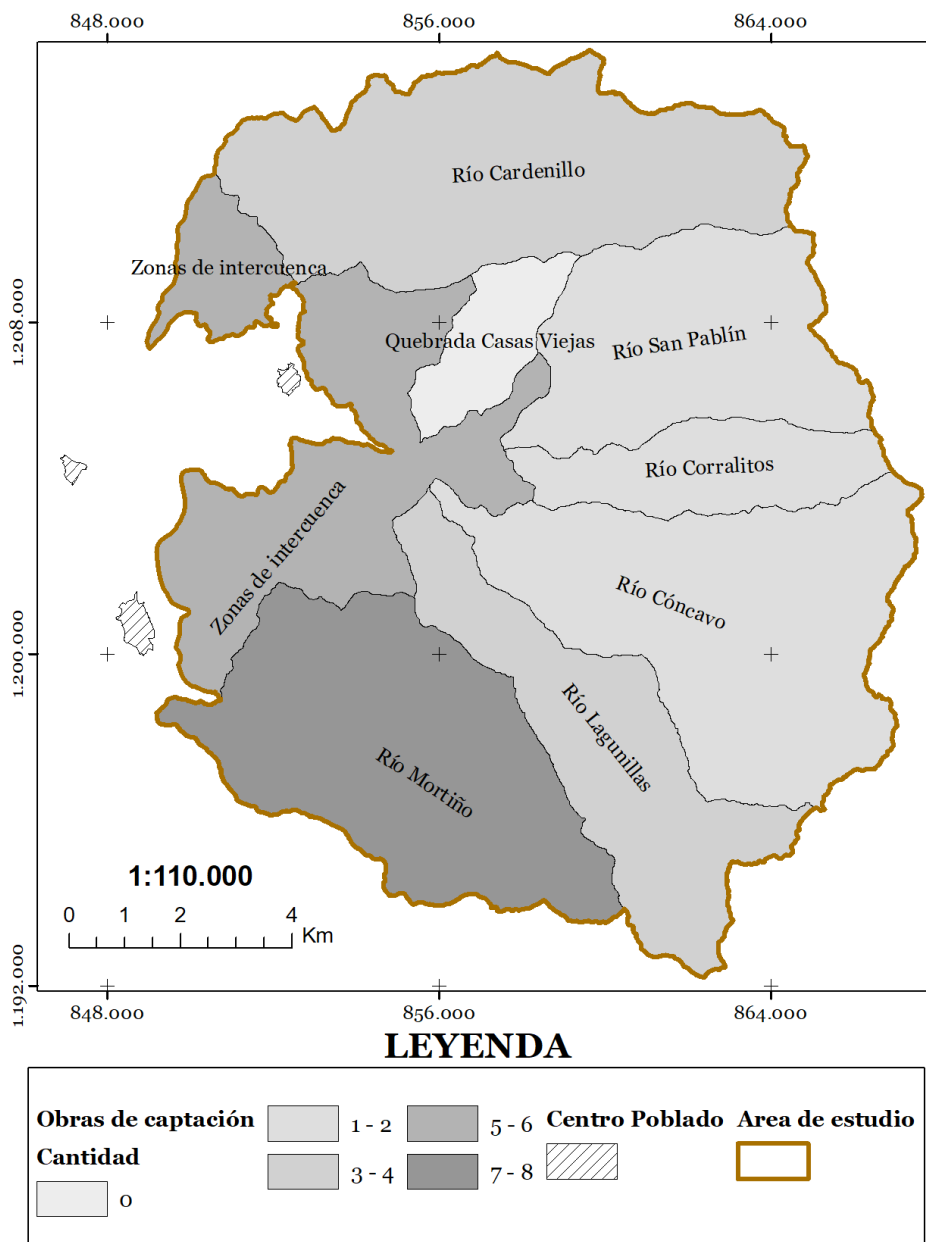


Figura 3.31 Mapa de obras de captación por microcuena

Tabla 3.29 Resultados estimación de la demanda con información de medición

MICROCUENCA	DEMANDA (m ³)
Río Lagunillas	264.902
Río Cóncavo	4.213.210
Río Corralitos	63.703
Río San Pablín	5.984.271
Quebrada Casas Viejas	10.565
Río Cardenillo	228.636
Río Mortiño	3.938.216
Zonas de intercuenca	690.008
Zona de estudio	15.393.510

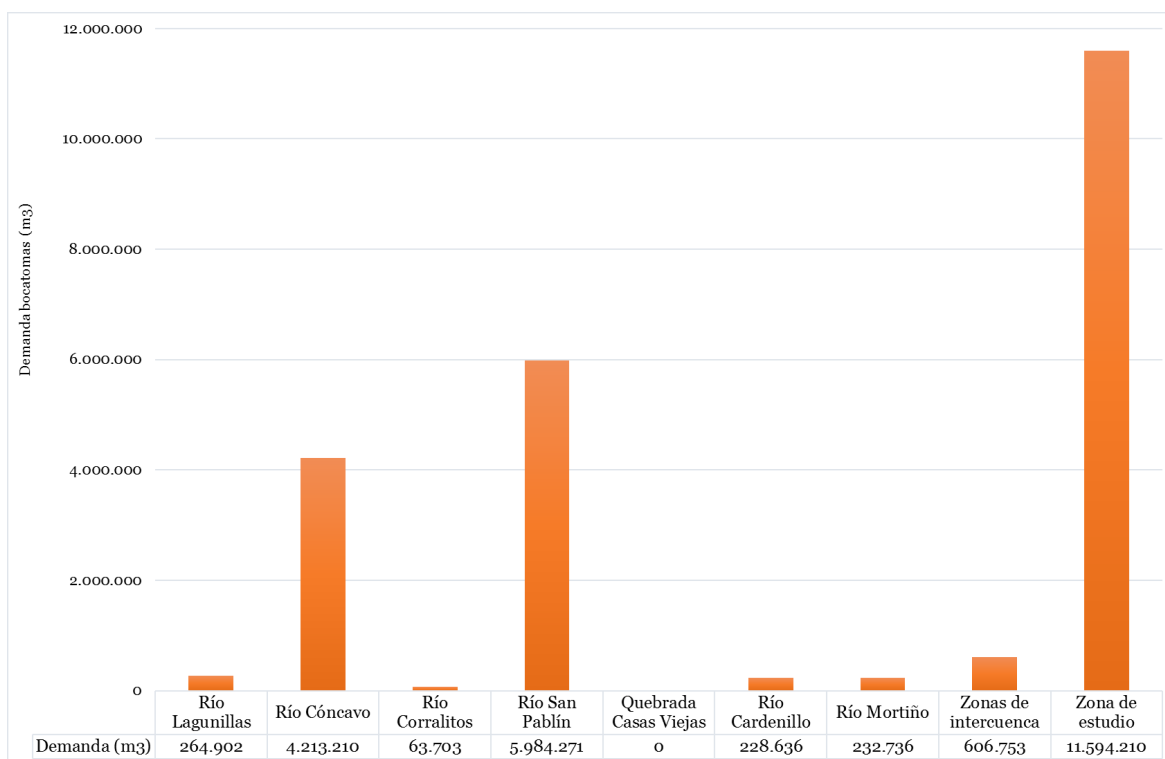


Figura 3.32 Demanda hídrica obtenida de información de obras de captación

3.1.10.5 Estimación en ausencia de información de medición

Según la Resolución 865 de 2004, del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, ante la existencia de información medida, pero insuficiente, debe aprovecharse la información medida. Por otra parte, la información inexistente debe complementarse utilizando la metodología expuesta en esta

normatividad para escenarios ante ausencia de información.

Demanda uso doméstico (DUD)

La demanda hídrica para uso doméstico en las diferentes microcuencas, zonas de intercuenca y zona de estudio (total) del proyecto es presentada en la Tabla 3.30. Son indicados los parámetros de dotación neta, pérdidas del sistema de abastecimiento (acueducto) y la dotación bruta empleada en la estimación de la demanda.

Las magnitudes evidencian una demanda máxima en la microcuenca del Río Mortiño, asociada fundamentalmente a la gran concentración de población, seguida por las zonas de intercuenca ubicadas en la parte

baja de las microcuencas y la zona de estudio. Las Microcuencas de los ríos Corralitos y San Pablín presentan las demandas más bajas, mientras que las restantes presentan valores intermedios (ver Figura 3.33).

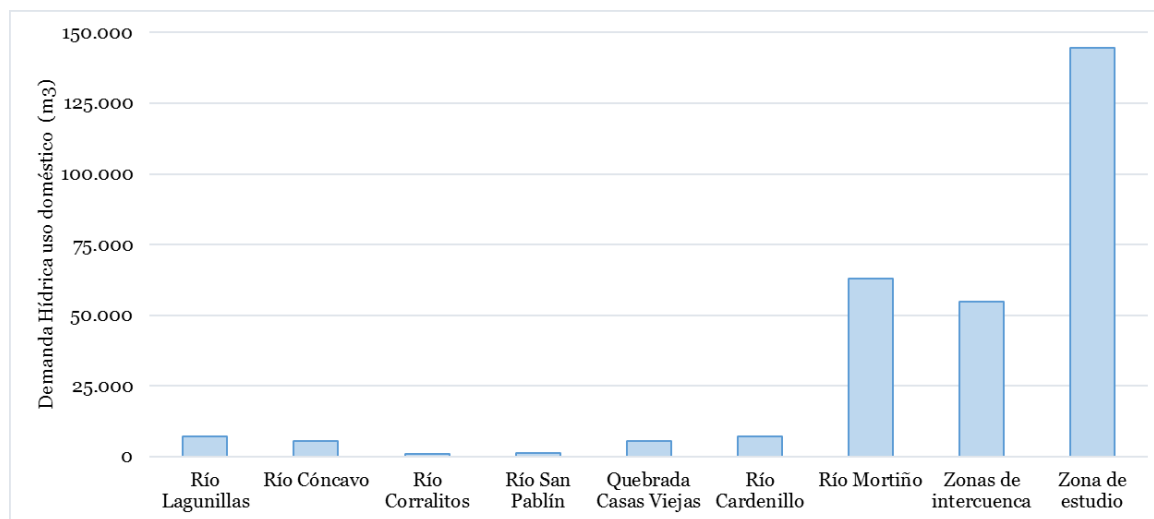


Figura 3.33 Demanda hídrica para uso doméstico

Tabla 3.30 Resultados estimación de la demanda por uso doméstico

MICROCUECENA	AREA (km ²)	POBLACIÓN (hab)	DOT. NETA (L/hab.dia)	PÉRDIDAS (%)	DOTACIÓN BRUTA	DEMANDA (m ³)
Río Lagunillas	32,82	120	120	25	160	7.008
Río Cóncavo	51,98	93	120	25	160	5.431
Río Corralitos	15,39	16	120	25	160	934
Río San Pablín	33,06	21	120	25	160	1.226
Quebrada Casas Viejas	8,84	92	120	25	160	5.373
Río Cardenillo	52,73	121	120	25	160	7.066
Río Mortiño	49,04	1076	120	25	160	62.838
Zonas de intercuenca	30,488	937	120	25	160	54.721
Zona de estudio	274,348	2476	120	25	160	144.598

Demanda uso agrícola (DUA)

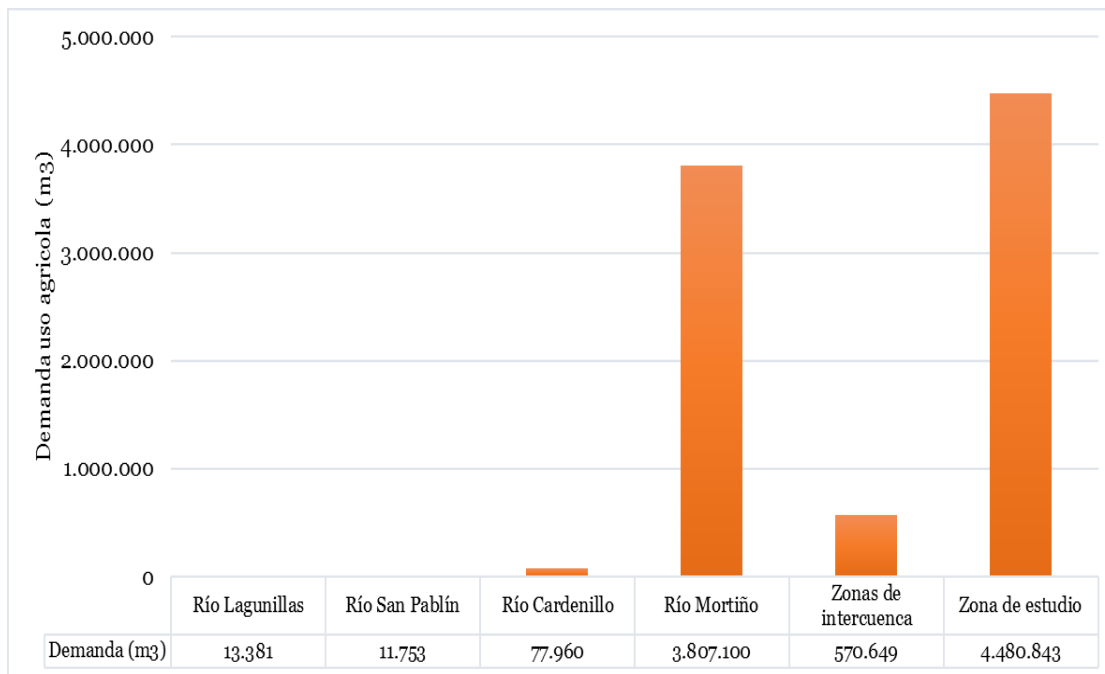
La demanda debida a este uso fue obtenida a partir de información general según el tipo de

cultivo por microcuenca y zonas de intercuenca. En la Tabla 3.31 son presentados los resultados totales por microcuenca y para la zona de estudio.

|| Tabla 3.31 DUA total de microcuencas, zonas de intercuencia y zona de estudio ||

MICROCUENCA	DUA TOTAL (m³)
Río Lagunillas	13.381
Río San Pablín	11.753
Río Cardenillo	77.960
Río Mortiño	3.807.100
Zonas de intercuencia	570.649
Zona de estudio	4.480.843

Los resultados indican una mayor de demanda hídrica para uso agrícola de la parte baja de la zona de estudio, en particular de la microcuenca del Río Mortiño y de las zonas de intercuencia (ver Figura 3.34).



|| Figura 3.34 Demanda hídrica para uso agrícola

Demanda uso pecuario (DUA)

Los resultados obtenidos de la estimación de la demanda para uso pecuario revelan un

resultado similar al de uso agrícola en cuanto a las microcuencas de mayor consumo (ver Tabla 3.32 y Figura 3.35).

Tabla 3.32 Demanda uso pecuario (DUP)

MICROCUENCAS	DEMANDA (m ³)
Río Lagunillas	6.518
Río Cóncavo	9.685
Río Corralitos	870
Río San Pablín	585
Quebrada Casas Viejas	5.188
Río Cardenillo	10.168
Río Mortiño	68.253
Zonas de intercuenca	64.605
Zona de estudio	165.873

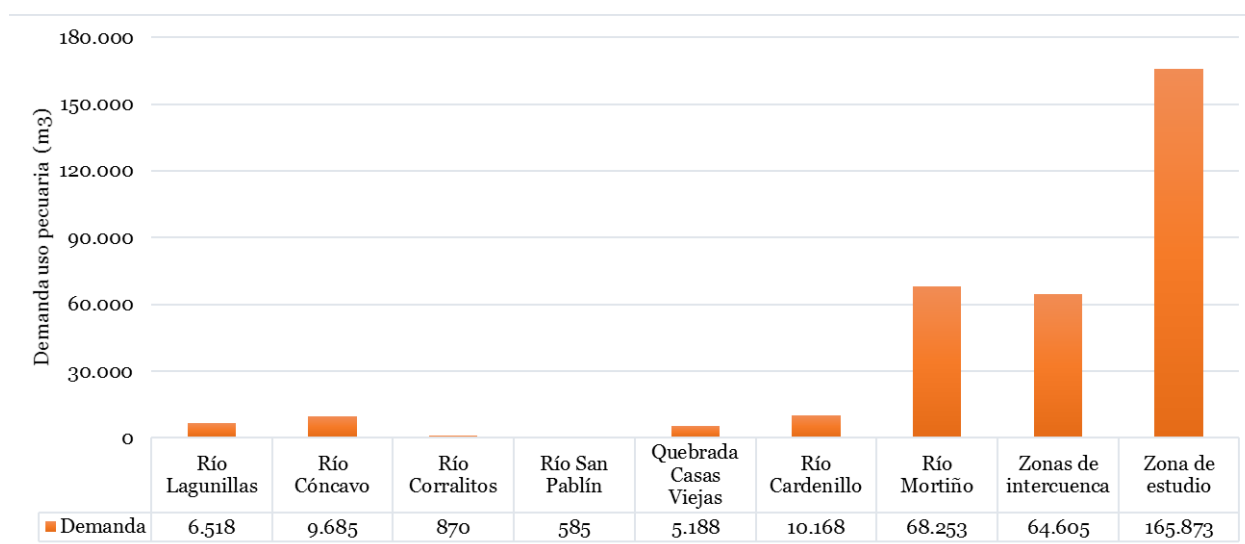


Figura 3.35 Demanda hídrica para uso pecuario

La demanda hídrica total, entendida como la integrada por los tres usos anteriormente presentados, es mostrada en la Figura 3.36 y la

Tabla 3.33. De manera general es presentada en la Figura 3.37 la distribución porcentual de usos en la zona de estudio.

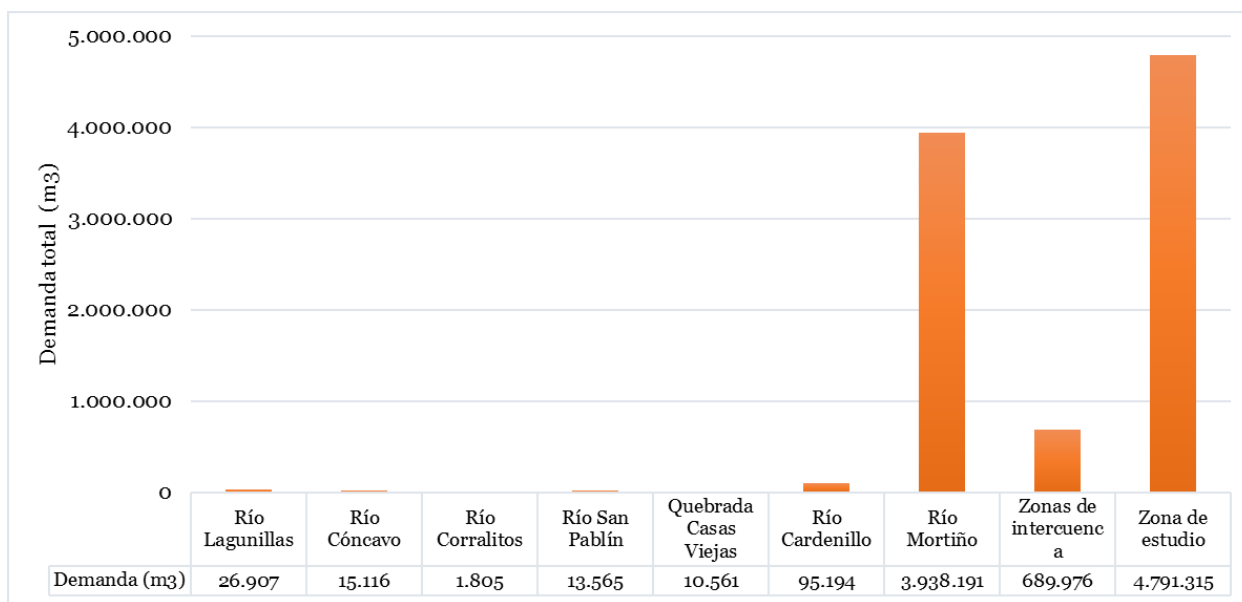


Figura 3.36 Demanda hídrica total

Tabla 3.33 Demanda hídrica total en ausencia de información de medición

MICROCUENCA	DEMANDA USO DOMÉSTICO (M³)	DEMANDA USO AGRÍCOLA (m³)	DEMANDA USO PECUARIO (m³)	DEMANDA TOTAL (m³)
Río Lagunillas	7.008	13.381	6.517,8	26.907
Río Cóncavo	5.431		9.684,5	15.116
Río Corralitos	934		870,2	1.805
Río San Pablín	1.226	11.753	585,5	13.565
Quebrada Casas Viejas	5.373		5.188,5	10.561
Río Cardenillo	7.066	77.960	10.168,2	95.194
Río Mortiño	62.838	3.807.100	68.252,8	3.938.191
Zonas de intercuencia	54.721	570.649	64.605,4	689.976
Zona de estudio	144.598	4.480.843	165.872,8	4.791.315

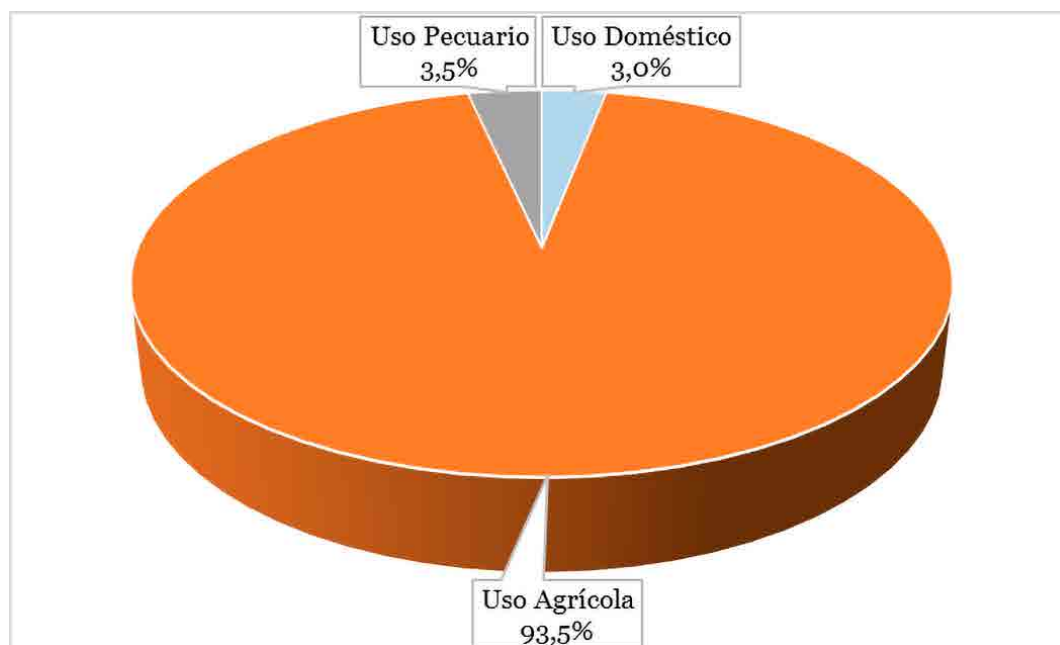


Figura 3.37 Demanda hídrica total en la zona de estudio en ausencia de información de medición

3.1.10.6 Integración de metodologías

Ambas metodologías poseen limitaciones relacionadas con la representatividad de las demandas reales.

En primer lugar, no todas las obras de toma asociadas con los diferentes usos se encuentran operando legalmente y aunque sí lo estén, no existe control riguroso de los caudales extraídos, permitiendo inferir que en la mayoría de casos existe la posibilidad de una sobre-captación, a partir de casos puntuales observados.

En segundo lugar, aunque se tiene una gran representatividad de los grandes usuarios (acueductos y distritos de riego) en la información recopilada, existen muchos aprovechamientos menores que operan y no son visibles (no existen) en las bases de datos de Corpoboyacá y las Alcaldías Municipales, haciendo que la información sea difícil de

levantar en su totalidad, como sucede en microcuencas como la del Río Mortiño.

En tercer lugar, existe un fenómeno de trasvase de agua entre cuencas, como sucede en el caso de los Ríos Lagunillas y San Pablín, en los cuales los caudales captados corresponden a demanda de gran parte de otras microcuencas, aspectos muy difíciles de detallar espacialmente.

Las anteriores razones nos permitieron proponer la integración de información de las dos metodologías (ver Tabla 3.34), de acuerdo con información general de las veredas y zonas que abastecen las obras de captación (ver Figura 3.38).

Estos resultados introducen ajustes que tienden a reducir las limitaciones individuales de las dos metodologías. En este caso las microcuencas con gran extracción de caudales evidencian una mayor demanda hídrica (ver Figura 3.39).

Tabla 3.34 Integración de metodologías y demanda estimada

MICROCUEENCA	MÉTODO 1		METODO 2	DEMANDA FINAL		
	CANTIDAD BOCTOMAS	DEMANDA BOCATOMAS (l/s)	DEMANDA USOS (l/s)	l/s	m3/s	(m ³)
Río Lagunillas	4	8,4	0,853	8,4	0,0084	264.902
Río Cóncavo	2	133,6	0,479	133,6	0,1336	4.213.210
Río Corralitos	2	2,02	0,057	2,02	0,00202	63.703
Río San Pablín	2	189,76	0,430	189,76	0,18976	5.984.271
Quebrada Casas Viejas	0	0	0,335	0,335	0,000335	10.565
Río Cardenillo	4	7,25	3,019	7,25	0,00725	228.636
Río Mortiño	8	7,38	124,878	124,88	0,12488	3.938.216
Zonas de intercuenca	6	19,24	21,878	21,88	0,02188	690.008
Zona de estudio	28	367,65	151,93	488,13	0,488125	15.393.510

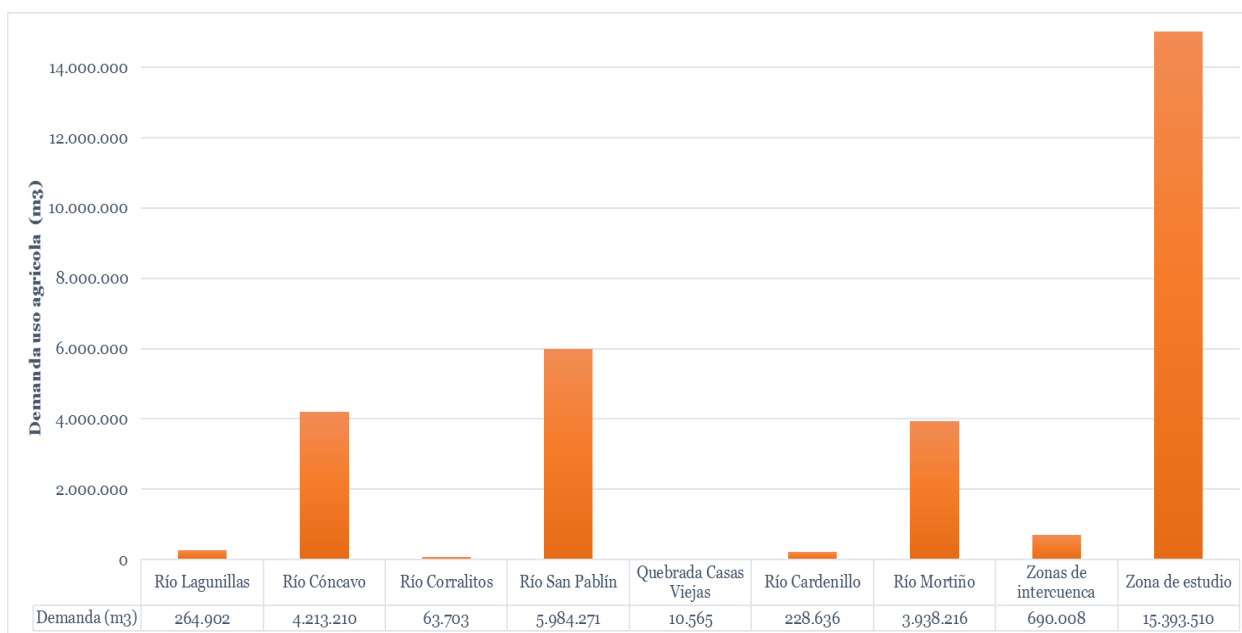


Figura 3.38 Demanda final estimada para las microcuencas y la zona de estudio

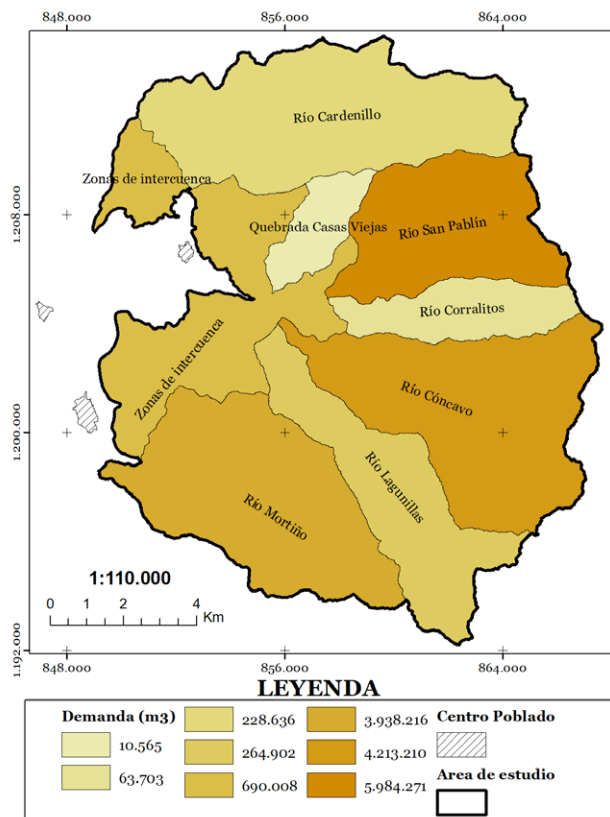


Figura 3.39 Mapa de demanda hídrica a escala de microcuenca

3.1.11 Disponibilidad hídrica

En la Tabla 3.35 y en la Figura 3.40 se presentan los resultados obtenidos para el índice de escases. Las magnitudes obtenidas indican un bajo porcentaje de la demanda utilizada, menor al 10% (ver Figura 3.41). Puede interpretarse que las microcuencas no experimentan presiones importantes sobre el recurso hídrico en términos de cantidad.

Tabla 3.35 Resultados obtenidos para el índice de escasez

MICROCUECNA	OFERTA HÍDRICA NETA (M ³)	DEMANDA HÍDRICA (M ³)	ÍNDICE DE ESCASEZ EN PORCENTAJE (Ie)
Río Lagunillas	13.171.338	264.902	0,50
Río Cóncavo	23.584.938	4.213.210	4,47
Río Corralitos	7.501.353	63.703	0,21
Río San Pablín	16.965.874	5.984.271	8,82
Quebrada Casas Viejas	3.667.031	10.565	0,07
Río Cardenillo	28.942.969	228.636	0,20
Río Mortiño	19.589.621	3.938.216	5,03
Zonas de Intercuenca	11.983.680	690.008	1,44
Zona de estudio	135.424.711	15.393.510	2,84

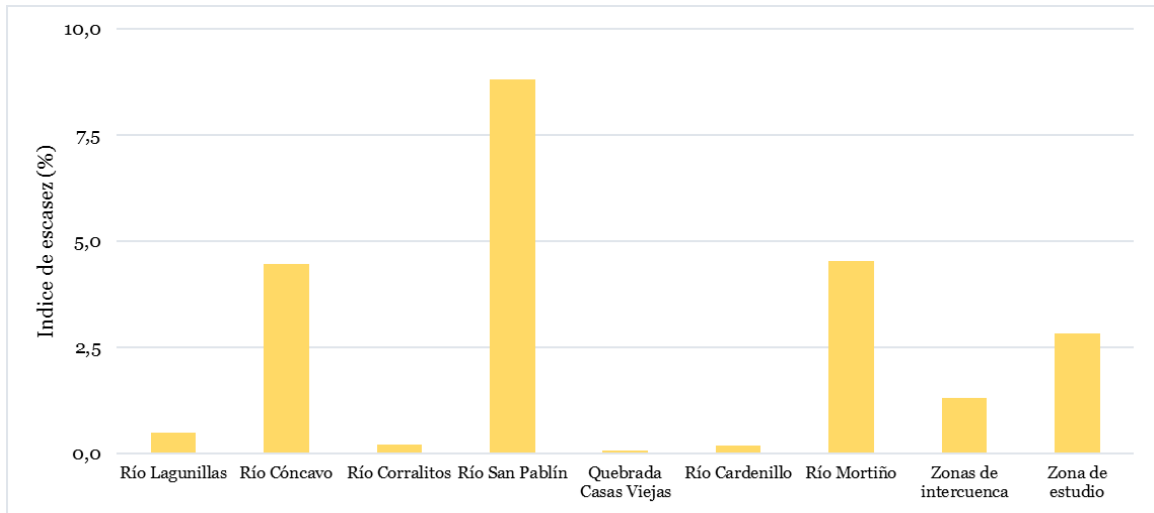


Figura 3.40 Índice de escasez de las microcuencas y la zona de estudio

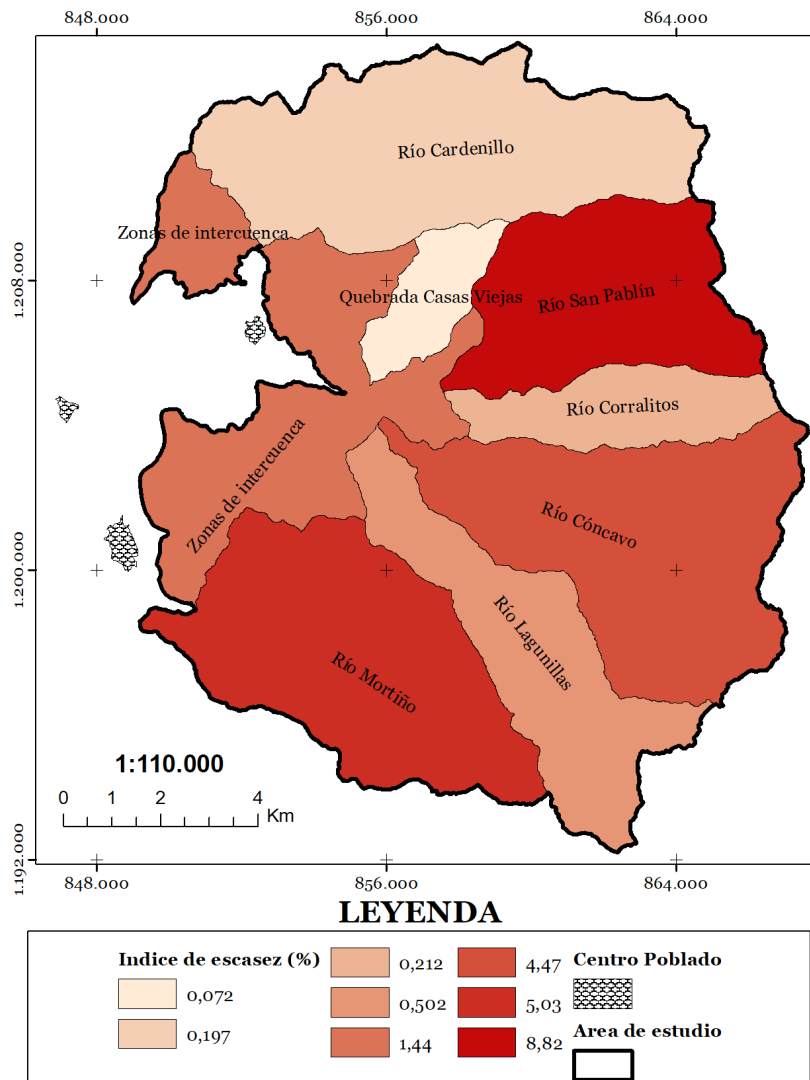


Figura 3.41 Mapa de índice de escasez a escala de microcuencia

3.2 SÍNTESIS

Las diferentes metodologías empleadas para analizar la calidad de la información hidroclimatológica fueron efectivas en la depuración de los registros. Aunque son evidentes las señales de variabilidad climática a diferentes escalas temporales en otros casos fue necesario remover registros de las series una vez verificada la confirmación de anomalías.

La homogeneidad de las series evaluada por diferentes metodologías permitió identificar series temporales que poseen problemas en sus registros. En casos específicos han existido falencias posiblemente asociadas con la captura de la información, lo cual permitió anticipar el empleo de otras series de mejor calidad, como sucedió con las estaciones de medición de caudal fuera de la zona de estudio.

Los resultados obtenidos con los variados índices y parámetros de forma indican que la mayoría de microcuencas de la zona de estudio son moderadamente susceptibles a las crecidas, excepto la microcuenca del Río San Pablín (semejante a formas circulares), con una menor capacidad de atenuación de crecientes las microcuencas de los Ríos Lagunillas y Corralitos son menos susceptibles a la concentración de crecientes, seguidas por la microcuenca de la quebrada Casas Viejas. Microcuencas como las de los Ríos Cóncavo, Cardenillo y Mortiño presentan una capacidad intermedia de concentración de crecientes.

La zona de estudio presenta dos períodos de lluvia al año, que popularmente se denominan “invierno” (período húmedo), y dos períodos de menos lluvia (períodos secos) que se conocen popularmente como verano. El primer período de lluvias, se inicia en marzo y dura todo abril y mayo; el segundo, empieza en septiembre y dura todo octubre y noviembre. Existen meses de transición entre los diferentes períodos húmedos como son los meses de marzo y septiembre, los cuales se presentan con días alternados de lluvias y tiempo seco. Los meses considerados más secos en orden ascendente de magnitud de precipitación, corresponden a

enero, febrero y diciembre; seguidos por los de mitad de año, junio, julio y agosto.

El caudal medio mensual presenta un régimen bimodal en las dos estaciones del año analizadas, indicando que los caudales poseen una mayor magnitud durante los meses de abril, mayo y junio, durante la primera temporada de lluvias del año; mientras para la segunda temporada, los máximos corresponden con los meses de julio, septiembre, octubre y noviembre. Sobresalen meses como enero y febrero con los caudales medios más bajos del año, seguidos por los de marzo, diciembre y agosto.

La oferta hídrica no glaciaria de la zona de estudio y de las diferentes microcuencas fue estimada considerando el empleo de dos modelos matemáticos hidrológicos. Los resultados de un modelo simple como lo es el balance hidrológico a nivel mensual, han permitido conocer la demanda promedio anual. Por otra parte, el empleo de un modelo más elaborado como el modelo lluvia escorrentía HEC-HMS, en conjunto con la metodología del número de curva del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos, ha ofrecido un mayor nivel de detalle, no solo a nivel anual sino estacional (mensual).

Las microcuencas no cuentan con una buena densidad de estaciones hidrometeorológicas. En algunos casos es nula la instrumentación, por lo cual el ejercicio de modelación hidrológica es difícil de corroborar en términos hidrométricos. No obstante, la consistencia de los resultados obtenidos con el modelo más elaborado (a nivel estacional), son validados por el modelo simple (balance hidrológico) al encontrarse que a nivel medio anual son equivalentes. La anterior comparación es muy importante, considerando que los dos modelos matemáticos hidrológicos tienen parámetros de entrada muy diferentes.

Los caudales de aporte glaciario estimados consideran la variabilidad climática estacional, tomando como punto de partida la información de aforos levantada por el grupo de glaciología del IDEAM. Ante la ausencia de un gran número

de variables para analizar la fusión y ablación glaciaria en un modelo de derretimiento de nieve sofisticado, la información mencionada es muy útil al ser correlacionada con otras variables climatológicas como la precipitación y en particular el número total de días con lluvia al mes.

El caudal medio mensual incluido el aporte glaciario fue comparado con el caudal registrado en la Estación hidrométrica Güicán. Resultados consistentes fueron encontrados para los meses más lluviosos de las dos temporadas del año, así como para los meses del período seco de fin de año. Los meses de la temporada de seca de mitad de año difieren en magnitud, desconociéndose los factores reales que pueden incidir en dicho comportamiento.

La estimación del caudal ecológico a partir de los resultados obtenidos de oferta hídrica total, a nivel estacional, habilitaron el empleo del método hidrológico de estimación de caudal ecológico propuesto por la normatividad colombiana con propósitos de estimación de oferta hídrica neta. Estos resultados fueron obtenidos a escala de microcuenca y para la zona de estudio, permitiendo tener un indicador de gran importancia en la gestión integral de los recursos hídricos de la región.

La estimación de la oferta hídrica realizada por el componente hidrológico fue realizada a una escala espacial y nivel de detalle antes no

abordado en la zona de estudio, en particular teniendo en cuenta la ausencia de información espacial y temática de mayor resolución en estudios anteriores.

La demanda hídrica para uso doméstico evidencia un máximo en la microcuenca del Río Mortiño, asociada fundamentalmente a la gran concentración de población, seguida por las zonas de intercuenca ubicadas en la parte baja de las microcuencas y la zona de estudio. Las Microcuencas de los Ríos Corralitos y San Pablín presentan las demandas más bajas, mientras que las restantes presentan valores intermedios.

La demanda hídrica estimada mediante la integración de diferentes metodologías permitió obtener resultados razonables, permitiendo contrarrestar las limitaciones implícitas en su implementación.

Los resultados indican una mayor demanda hídrica para uso agrícola y pecuario en la parte baja de la zona de estudio, en particular de la microcuenca del Río Mortiño y de las zonas de intercuenca.

Los resultados obtenidos para el índice de escases indican un bajo porcentaje de la demanda utilizada, menor al 10%. Puede interpretarse que las microcuencas no experimentan presiones importantes sobre el recurso hídrico en términos de cantidad.

BIBLIOGRAFÍA

- Alcaldía del Cocuy (2010). Esquema de Ordenamiento Territorial Municipio del Cocuy.
- Alcaldía Municipal Güicán de la Sierra. (2016). Plan de Desarrollo Municipal “Construyendo Juntos Progreso y Bienestar 2016-2019.”
- Alcaldía de Güicán (2008). Esquema de Ordenamiento Territorial Municipio de Güicán.
- Corpoboyacá (2006). Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos Municipio de Güicán.
- Jiménez E. Henry, Materón M. Hernán. (1986). Hidrología Básica, Tomo I. (pp.10-61) Cali: Universidad del Valle.
- Monsalve, G. (1999). Hidrología en la ingeniería. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería, Alfomega.
- Racca, J. M. G. (2007). Análisis hipsométrico, frecuencia altimétrica y pendientes medias a partir de Modelos Digitales del Terreno. Boletín del Instituto de Fisiografía y Geología, 77, 31-38.
- Schumm, SA (1963). Sinuosidad de ríos aluviales en las Grandes Llanuras. Boletín de la Sociedad Geológica de América, 74 (9), 1089-1100.
- Rosgen, D. (1996). AppliedRiverMorphology. WildlandHydrology. Pagosa Springs, Colorado, USA.
- Strahler AN. (1952). Hypsometric (area-altitude) analisis of erosional topography. Bulletinofthe Geological SocietyofAmerica, 63: 1117 – 1142
- Viboral, E. (2012). El análisis morfológico de las cuencas fluviales aplicado al estudio hidrográfico. Ingeniería del Agua, 1(2), 55-69. <https://doi.org/10.4995/ia.1994.2637>
- Yulieth, A., & Suescún, S. (2015). Identificación de Riesgos y Factores de Contaminación del Río Cardenillo a su Paso por la Sierra Nevada de El Cocuy- Güicán.