



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Analysis of sediment series in torrential or semitorrential rivers in order to determine prioritization indicators

Jairo Guillermo Luna Caiza

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería Civil

Maestría en Ingeniería – Recursos Hidráulicos

Manizales, Caldas

2021



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Análisis de series de sedimentos en cauces torrenciales o semitorrenciales con el fin de determinar indicadores de priorización

Jairo Guillermo Luna Caiza

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería Civil

Maestría en Ingeniería – Recursos Hidráulicos

Manizales, Caldas

2021



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Análisis de series de sedimentos en cauces torrenciales o semitorrenciales con el fin de determinar indicadores de priorización

Jairo Guillermo Luna Caiza

Tesis de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magíster en Ingeniería- Recursos Hidráulicos

Directora: Jeannette Zambrano Nájera, Ph.D

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería Civil

Maestría en Ingeniería – Recursos Hidráulicos

Manizales, Caldas

2021

Agradecimientos

- ❖ Primero agradecer siempre a Dios, quien me ha dado el privilegio de recorrer este camino lleno de muchas experiencias y aprendizajes, y por permitirme llegar hasta el final de este.
- ❖ A mis padres y hermano, por brindarme siempre todo su apoyo y cariño incondicional, brindarme esta oportunidad, creer en mí y recordarme que con gran actitud puedo alcanzar logros importantes como éste.
- ❖ A mi hija, por llegar a mi vida y convertirse en el mayor impulso y motivación que cada día tengo a mi lado, el cual me llena de fuerzas para superarme y querer lograr grandes cosas.
- ❖ A mi cónyuge, por siempre estar ahí cada día a lo largo del camino de este proyecto, brindándome su apoyo y cariño incondicional en las buenas y malas, recordándome siempre que nunca debo rendirme.
- ❖ A mi tutora, por ser la guía de este largo camino acompañado de una gran calidad como persona, por su paciencia y dedicación a este proyecto de vida que logro culminar.

Resumen

Análisis de series de sedimentos en cauces torrenciales o semitorrenciales con el fin de determinar indicadores de priorización

La ocurrencia de inundaciones se ha convertido en un desafío creciente, dada la alta frecuencia con la que ocurren. Entre los muchos tipos de inundaciones, las inundaciones repentinas son de particular relevancia, porque ocurren repentinamente y causan serios estragos, incluidos daños económicos y muertes. Como tales, se han estudiado ampliamente y requieren estudios que puedan asociar las características de la cuenca con su comportamiento de lluvias torrenciales. El presente estudio propone la definición de indicadores que permitan identificar las cuencas con mayor susceptibilidad al comportamiento de lluvias torrenciales. Para ello, se propone un conjunto de indicadores estadísticos y geomorfológicos, con el fin de determinar cuáles son de mayor relevancia para la estimación de dicho comportamiento, de forma sencilla y rápida. Se utilizó un análisis de componentes principales para reducir las dimensiones y, en base a ello, se identificó un grupo de parámetros potencialmente útiles para el manejo de cuencas.

Palabras clave: Análisis estadístico de series, torrencialidad de corrientes, geomorfología.

Abstract

Analysis of sediment series in torrential or semitorrential rivers in order to determine prioritization indicators

The occurrence of flooding has become a growing challenge, given the high frequency with which it transpires. Among the many types of floods, flash floods are of particular relevance, because they occur suddenly, and wreak serious havoc, including economic damage and deaths. As such, they have been studied widely, and require studies that can associate basin characteristics with their torrential rainfall behavior. The present study proposes the definition of indicators that would permit the identification of basins with the greatest susceptibility to torrential rainfall behavior. For this, a group of statistical and geomorphological indicators is proposed, in order to determine which are of the greatest relevance for the estimation of said behavior, both simply and quickly. A principal component analysis was utilized to reduce dimensions, and based thereupon, a group of potentially useful parameters for basin management was identified.

Keywords: Statitstical analysis of series, torrential rivers, geomorphology.

Tabla de contenido

| | |
|--|-----------|
| Agradecimientos..... | I |
| Resumen | II |
| Abstract | III |
| 1 Introducción..... | 1 |
| 1.1 Antecedentes..... | 1 |
| 1.2 Descripción del problema..... | 3 |
| 1.3 Justificación..... | 5 |
| 1.4 Alcance..... | 6 |
| 2 Objetivos..... | 7 |
| 2.1 General..... | 7 |
| 2.2 Específicos..... | 7 |
| 3 Marco Teórico y Estado del Arte | 8 |
| 3.1 Transporte de Sedimentos | 8 |
| 3.2 Medición de sedimentos | 10 |
| 3.3 Ríos de alta montaña y avenidas torrenciales | 15 |
| 3.4 Revisión series de sedimentos..... | 18 |
| 3.5 Geomorfología de una cuenca..... | 19 |
| 3.5.1 Parámetros de forma | 19 |
| 3.5.2 Parámetros de relieve..... | 21 |
| 3.5.3 Parámetros de red de drenaje..... | 22 |
| 4 Metodología | 24 |
| 4.1 Datos e información disponible..... | 24 |
| 4.2 Descripción del área de estudio | 28 |
| 4.3 Caracterización estadística y geomorfológica en las áreas de estudio | 35 |
| 4.3.1 Análisis Estadístico de series históricas..... | 35 |
| 4.3.2 Análisis geomorfológico..... | 36 |
| 4.4 Evaluación de la torrencialidad en las áreas de estudio | 37 |
| 4.4.1 Serie sintética de caudal horario | 38 |
| 4.4.2 Indicadores de valores extremos..... | 39 |
| 4.5 Análisis de Componentes Principales (ACP) | 42 |
| 5 Resultados | 46 |

| | | |
|------------|---|------------|
| 5.1 | Análisis exploratorio y estadístico de series temporales | 46 |
| 5.1.1 | Caudales líquidos | 52 |
| 5.1.2 | Caudales sólidos..... | 58 |
| 5.2 | Evidencias del comportamiento torrencial en las áreas de estudio | 67 |
| 5.2.1 | Construcción de la serie sintética de caudales horarios | 67 |
| 5.2.2 | Indicadores de valores extremos de caudales líquidos y sólidos | 68 |
| 5.3 | Evaluación geomorfológica | 82 |
| 5.3.1 | Tamaño y forma de la cuenca..... | 83 |
| 5.3.2 | Relieve de la cuenca..... | 86 |
| 5.3.3 | Red de drenaje de la cuenca | 89 |
| 5.4 | Análisis de Componentes Principales ACP | 97 |
| 5.4.1 | Análisis por individuos | 98 |
| 5.4.2 | Análisis por variables | 101 |
| 6 | Conclusiones | 107 |
| 7 | Referencias bibliográficas | 114 |

Lista de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1. Zonas afectadas de Mocoa por la avenida torrencial. Fuente: Abu Shlhab (2017) | 2 |
| Figura 2. Puente destruido por la avenida torrencial en la cuenca del río Fraile. Fuente: González, Chavez, & Hermelin, (2005) | 3 |
| Figura 3. Modelaciones en donde se evidencian las submediciones en los datos registrados de caudales líquidos y sólidos para estaciones Puente Cabra y Nemizaque en la subzona del río Fonce (IDEAM, 2015). | 5 |
| Figura 4. Esquema de Sistema fluvial idealizado. (Niño, 2004) | 9 |
| Figura 5. Muestreador Helley Smith para muestreo de la carga de fondo (Posada, 1994) | 11 |
| Figura 6. Muestreador para carga de sedimento suspendido DH-48 (Posada, 1994) | 12 |
| Figura 7. Despliegue de muestreadores de sedimentos, distribución del perfil de velocidad y concentración (Dingman, 2009) | 13 |
| Figura 8. Curvas de duración de Flujo de sedimentos suspendidas en diferentes áreas de drenaje estudiadas. Tomado de: (Duvert et al., 2011) | 20 |
| Figura 9. Configuraciones de la curva hipsométrica. Tomado de (Zavoianu, 1985) | 22 |
| Figura 10. Red de estaciones de monitoreo de sedimentos en Colombia. Fuente: (IDEAM, 2015) . | 25 |
| Figura 11. Ubicación área hidrográfica Magdalena Cauca | 26 |
| Figura 12. Área hidrográfica Magdalena Cauca y subzonas de estudio (Elaboración propia) | 28 |
| Figura 13. Subcuencas de estudio en subzona de Río Nare (Elaboración propia) | 30 |
| Figura 14. Subcuencas de estudio en subzona de Río Fonce (Elaboración propia) | 31 |
| Figura 15. Estaciones de Estudio en la subzona del río Chicamocha (Elaboración propia)..... | 32 |
| Figura 16. Estaciones de Estudio en la subzona del río Saldaña (Elaboración propia) | 33 |
| Figura 17. Subcuencas de estudio en la subzona de Yaguará (Elaboración propia) | 34 |
| Figura 18. Coeficientes de amplificación asociados a la obtención del régimen intradiario de caudales líquidos..... | 38 |
| Figura 19. Relación Caudal horario/Caudal diario vs Tiempo de concentración de la cuenca | 39 |
| Figura 20. Caudales a utilizar en el cálculo de indicadores ubicados en la curva duración caudal...40 | |
| Figura 21. Interpretación geométrica de la construcción del plano principal en el ACP. Fuente: Meng et al. (2020)..... | 44 |
| Figura 22. Representación de variables en el círculo de correlaciones. Adaptado de: Buehler, Versteegh, Matson, & Tieleman (2011) | 44 |
| Figura 23. Gráficos de masa simple para las estaciones de monitoreo de caudal líquido | 50 |
| Figura 24. Gráficos de masa simple para las estaciones de monitoreo de caudal sólido | 52 |
| Figura 25. Series temporales de Caudal Líquido [m ³ /s]. Fuente: Elaboración propia..... | 55 |
| Figura 26. Boxplot correspondiente a Caudal líquido en todas las estaciones en escala logarítmica. Fuente: Elaboración propia | 56 |
| Figura 27. Histogramas de frecuencia correspondientes a caudal líquido en todas las estaciones. Fuente: Elaboración propia | 58 |
| Figura 28. Series temporales correspondientes a Caudal sólido [kg/s]. Fuente: Elaboración propia | 61 |

| | |
|--|-----|
| Figura 29. Boxplot correspondiente a Caudal Sólido en todas las estaciones en escala logarítmica. Fuente: Elaboración propia | 63 |
| Figura 30. Histogramas de frecuencia correspondientes a caudal sólido en todas las estaciones. Fuente: Elaboración propia | 64 |
| Figura 31. Series de Caudal (izquierda) y Series de Caudal sólido (derecha). Imagen superior: Estación 23087190 (Subzona Río Nare), Imagen media: Estación 22037010 (Subzona Río Saldaña), Imagen inferior: Estación 21087080 (Subzona río Yaguará) | 66 |
| Figura 32. Probabilidad de excedencia del indicador I_{1L} para caudal líquido | 73 |
| Figura 33. Probabilidad de excedencia del indicador I_{2L} para caudal líquido | 74 |
| Figura 34. Probabilidad de excedencia del indicador I_{2S} para caudal sólido..... | 75 |
| Figura 35. Probabilidad de excedencia del indicador I_{3L} para caudal líquido | 77 |
| Figura 36. Probabilidad de excedencia del indicador I_{3S} para caudal sólido..... | 78 |
| Figura 37. Probabilidad de excedencia para el indicador I_4 para caudal líquido y caudal sólido | 80 |
| Figura 38. Curvas hipsométricas correspondientes a las áreas de estudio | 88 |
| Figura 39. Perfiles longitudinales de las estaciones correspondientes a la subzona Fonce | 92 |
| Figura 40. Perfiles longitudinales de las estaciones correspondientes a la subzona Chicamocha..... | 93 |
| Figura 41. Perfiles longitudinales de las estaciones correspondientes a la subzona Nare | 94 |
| Figura 42. Perfiles longitudinales de las estaciones correspondientes a la subzona Yaguará | 94 |
| Figura 43. Perfiles longitudinales de las estaciones correspondientes a la subzona Saldaña | 95 |
| Figura 44. Ubicación de estaciones en el plano principal creado a partir de las componentes 1 y 2 | 100 |
| Figura 45. <i>Agrupamiento jerárquico obtenido mediante el ACP</i> | 101 |
| Figura 46. Círculo de correlaciones de las variables | 104 |
| Figura 47. Matriz de correlaciones entre variables geomorfológicas e indicadores de torrencialidad (azul para valores más positivos y rojo para más negativos)..... | 105 |

Lista de Tablas

| | |
|---|-----|
| Tabla 1. Subzonas del área hidrográfica Magdalena Cauca con las estaciones de estudio y su respectivo nombre | 26 |
| Tabla 2. Parámetros estadísticos a utilizar | 35 |
| Tabla 3. Descripción parámetros geomorfológicos | 36 |
| Tabla 4. Datos disponibles de caudal líquido para cada una de las estaciones analizadas..... | 46 |
| Tabla 5. Datos disponibles de caudal sólido para cada una de las estaciones analizadas | 47 |
| Tabla 6. Estadística descriptiva de la variable Caudal líquido (m^3/s)..... | 52 |
| Tabla 7. Estadística descriptiva correspondiente a la variable Caudal Sólido (kg/s) | 58 |
| Tabla 8. Tiempo de concentración para cada subcuenca obtenidos a partir de la ecuación de Kirpich | 68 |
| Tabla 9. Información estadística del régimen de caudal diario en cada subcuenca | 69 |
| Tabla 10. Caudales horarios líquidos y sólidos con probabilidad de excedencia 0.01% para cada subcuenca | 69 |
| Tabla 11. Caudales horarios líquidos y sólidos con probabilidad de excedencia 50% para cada subcuenca | 70 |
| Tabla 12. Resultados obtenidos para los indicadores de régimen de caudal I_1 , I_2 , I_3 e I_4 en cada estación | 71 |
| Tabla 13. Estaciones que superan el valor referencia del indicador I_{1L} | 73 |
| Tabla 14. Estaciones que superan el valor referencia del indicador I_{2L} para caudal líquido | 74 |
| Tabla 15. Estaciones que superan el valor referencia del indicador I_{2S} para caudal sólido | 76 |
| Tabla 16. Estaciones que superan el valor referencia del indicador I_{3L} para caudal líquido | 77 |
| Tabla 17. Estaciones que superan el valor referencia del indicador I_{3S} para caudal sólido | 78 |
| Tabla 18. Estaciones que superan el valor referencia del indicador I_4 | 80 |
| Tabla 19. Recopilación de indicadores de valores extremos para cada estación | 81 |
| Tabla 20. Evaluación geomorfológica de las subcuencas de estudio | 82 |
| Tabla 21. <i>Parámetros geomorfológicos correspondientes a la forma y geometría de la cuenca</i> | 83 |
| Tabla 22. Comparación indicadores de torrencialidad e Indicadores de forma | 85 |
| Tabla 23. Parámetros geomorfológicos correspondientes al relieve de la cuenca | 86 |
| Tabla 24. Comparación de indicadores de torrencialidad e indicadores de relieve de la cuenca | 88 |
| Tabla 25. Parámetros geomorfológicos correspondientes al drenaje de la cuenca | 90 |
| Tabla 26. Comparación indicadores de torrencialidad con indicadores de red de drenaje de las áreas de estudio | 95 |
| Tabla 27. Varianza contenida en cada componente del PCA | 97 |
| Tabla 28. Valores de las componentes principales para cada estación, cosenos cuadrados y porcentajes de contribución de información | 99 |
| Tabla 29. Componentes principales, cosenos cuadrados y porcentaje de contribución de información en el plano principal para cada variable..... | 102 |

1 Introducción

1.1 Antecedentes

Los constantes cambios en los patrones climáticos han provocado el aumento del riesgo de desastres naturales en Colombia (Daniels, 2017), en donde la presencia de eventos de alta intensidad y corta duración sumado a los terrenos montañosos predominantes ocasionan frecuentemente el movimiento de grandes volúmenes de tierra y escombros.

En Colombia se han presentado varios desastres naturales debido a la presencia de estos eventos torrenciales, entre ellos podemos mencionar los siguientes:

- Avalancha en Mocoa, Putumayo – 1 de abril de 2017

Ubicado en el departamento de Putumayo, en el municipio de Mocoa llovieron 130 mm entre las 7 p.m. del 31 de marzo y las 7 a.m. del 1 de abril de 2017 (correspondiente al 30 % de lo que precipita normalmente durante todo el mes) (Masters, 2017). Dicho evento torrencial aunado a otros elementos provocó el desbordamiento de 3 ríos aledaños (Mocoa, Mulato y Sancoyaco) donde flujos de lodos y escombros afectaron a más de la mitad de la población, dejando una cifra de más de 300 muertos (Daniels, 2017).



Figura 1. Zonas afectadas de Mocoa por la avenida torrencial. Fuente: Abu Shlhab (2017)

- **Avalancha Cuenca Río Fraile en Florida, Valle del Cauca (31 enero 1994)**

Las lluvias torrenciales ocurridas durante el 29 y 31 de enero, concentradas en la parte alta de la cuenca (alturas mayores a 2800 m.s.n.m.), se estima que superaron el umbral de 72 mm acumulables provocando desprendimiento de material sólido tanto de las laderas como de los márgenes del río Fraile, que sumado al incremento de los caudales en las corrientes favorecieron el transporte de grandes cantidades de sedimentos (González, Chavez, & Hermelin, 2005). Entre las principales consecuencias de esta avenida torrencial se tienen 19 personas fallecidas, 22 se reportaron como desaparecidas, 86 heridos, 68 viviendas destruidas y 428 afectadas, obstrucción de infraestructura de acueducto y destrucción de puente en la población (Hermelin, 2005).



Figura 2. Puente destruido por la avenida torrencial en la cuenca del río Fraile. Fuente: González, Chavez, & Hermelin, (2005)

En los casos mencionados anteriormente se encuentra un esquema general compuesto por la ocurrencia de un evento extremo de precipitación poco común, que sumado a las características geomorfológicas de la zona y el incremento de los caudales en las corrientes favorecen la ocurrencia de una avenida torrencial y con ello el transporte de gran cantidad de material sólido, causando en ambos casos daños a la población y su infraestructura. De aquí se da la importancia de evaluar las características geomorfológicas y el régimen de caudales en las corrientes de una cuenca, que favorecen el comportamiento torrencial.

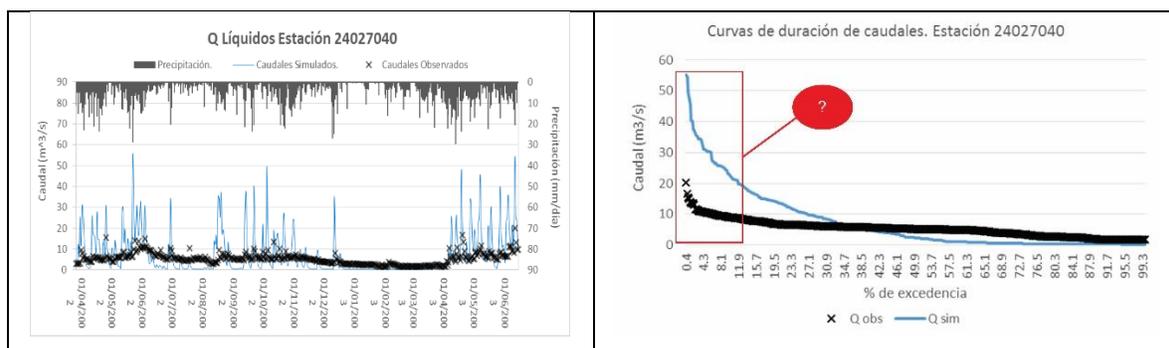
1.2 Descripción del problema

Las avenidas torrenciales se caracterizan por ser movimientos a gran velocidad conformados por una mezcla de agua y diferentes cantidades de material sólido sin clasificar (Abancó, Hürlimann, Moya, & Berenguer, 2016). Estos fenómenos tienen como principal factor desencadenante los eventos de precipitación, en especial aquellos que son de alta intensidad y corta duración sumado a las fuertes condiciones de los caudales en las corrientes generadas. Por lo que la descripción de estas avenidas

debe ser soportada por estudios e investigaciones que permitan conformar una base de datos sólida que contenga correctas mediciones de las condiciones fuertes de caudal, precipitación y de datos de transporte de sedimentos.

Las condiciones de riesgo que implica un evento torrencial plantean una gran dificultad para realizar las mediciones de las tasas de sedimentos, razón por la cual los datos que se tienen registrados en estos eventos son subestimados ya que las mediciones son hechas bajo condiciones normales; sumado a esto en Colombia el monitoreo del transporte de sedimentos es realizado por el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales) en escala diaria y estos eventos de baja frecuencia generalmente ocurren a escalas de tiempo menores (horarias). Por esta razón es común tener submediciones de la producción y transporte de los sedimentos. La subestimación de estos datos es considerable debido a que es durante estos eventos torrenciales donde se produce el mayor transporte de la carga del sedimento. Estas subestimaciones dificultan los estudios de planificación y gestión de dichas cuencas.

En la **Figura 3** se observan algunos ejemplos de los resultados de modelación llevados a cabo por el IDEAM en el marco del proyecto *“EVALUACIÓN DE LA DINÁMICA DE LOS PROCESOS DE SEDIMENTACIÓN (EROSIÓN, TRANSPORTE Y DEPÓSITO DE SEDIMENTOS) EN DIEZ SUBZONAS DE LA CUENCA MAGDALENA - CAUCA”* (IDEAM, 2015) que resaltan la sobreestimación los datos observados en el área de estudio de este trabajo (Área hidrográfica Magdalena Cauca), se observa la subestimación tanto del caudal líquido que es el principal agente transportador de los sedimentos, y también del caudal sólido.



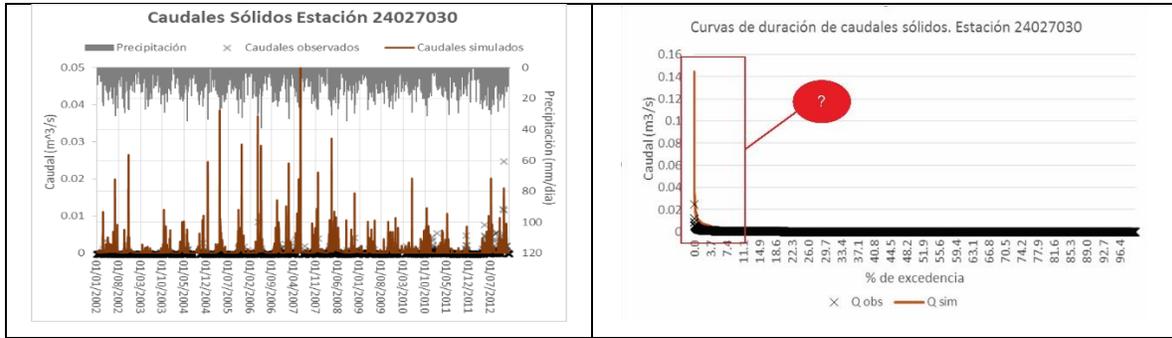


Figura 3. Modelaciones en donde se evidencian las submediciones en los datos registrados de caudales líquidos y sólidos para estaciones Puente Cabra y Nemizaque en la subzona del río Fonce (IDEAM, 2015).

La submedición de las tasas de sedimentos provoca que no se tenga un adecuado conocimiento del grado de magnitud de los eventos torrenciales ni del verdadero grado de riesgo que estos conllevan a los asentamientos humanos o a la infraestructura existente y no permite que se tomen correctas medidas de mitigación a tiempo.

1.3 Justificación

Debido a que en la actualidad aún no se ha podido establecer un acercamiento teórico que permita la descripción del comportamiento del transporte de los sedimentos, este proceso se ha convertido en un área de gran actividad en el ámbito de la investigación científica y tecnológica (Niño, 2004).

Según (Kettner, Restrepo, & Syvitski, 2010), comprender la dinámica y el comportamiento del transporte de sedimentos dentro de una cuenca es importante porque permite:

- Mejor comprensión de la redistribución de sedimentos a través de la erosión y la intemperie.
- Analizar las influencias antropogénicas (deforestación, minería, embalses, por ejemplo)
- Cuantificar factores de influencia (litología, clima).
- Mejorar los estudios de planificación y gestión de cuencas con base en mejores estimaciones de las tasas de sedimentos.
- Evaluar los escenarios futuros del comportamiento de sedimentos bajo diferentes condiciones de cambio climático y perturbaciones humanas.
- Cuestionar la calidad de los datos observados.

Desafortunadamente en la actualidad el transporte de sedimentos solo está medido en el 10% de los ríos del mundo y un número aún menor de ríos tiene estaciones de medición distribuidas en todas

sus cuencas (Kettner et al., 2010). Razón por la cual se tiene una considerable incertidumbre en la descripción del comportamiento de las cuencas.

Las mejoras en la estructura de redes de monitoreo de sedimentos proporcionarán un mejor conocimiento del comportamiento hidrológico-sedimentológico de las cuencas lo que ayudará a mejorar los estudios existentes en gestión y prevención de desastres y gestión del recurso hídrico.

Proponer criterios para la corrección de esta submedición permitirá identificar aquellas cuencas que presenten características de tipo torrencial y en donde se deberá implementar un sistema de monitoreo con datos a escala intradiaria, mejorando la red de monitoreo y las metodologías existentes con el fin de consolidar una base sólida y confiable de mediciones de sedimentos que permitan implementar estudios de modelación cuyos productos a obtener sean resultados representativos del comportamiento y particularidades de este tipo de cuencas.

1.4 Alcance

Este trabajo de investigación propondrá metodologías y criterios que permitan identificar y caracterizar a partir del régimen de caudales cuencas colombianas que presentan características torrencales del país con el propósito de que estas tengan priorización para ser abordadas con diferentes metodologías de monitoreo con resoluciones temporales menores para detallar de mejor forma el comportamiento de estos eventos torrencales.

Este estudio involucra los intereses de los sectores relacionados con el estudio de la dinámica de sedimentos en las cuencas y el cumplimiento de los objetivos está orientado a contribuir en la mejora de los estudios que desarrollan entidades del país relacionadas con esta temática como son por ejemplo las encargadas del monitoreo hidrológico y sedimentológico, los estudios de planificación de cuencas, estudios de gestión del riesgo de desastres, estudios de modelación sedimentológica, políticas de manejo de suelos, planeamiento de ordenamiento territorial entre otros.

2 Objetivos

2.1 General

Realizar la caracterización de cuencas susceptibles a presentar flujos torrenciales en ríos pendientes o de montaña.

2.2 Específicos

- Realizar un análisis estadístico y geomorfológico de la información disponible de series de sedimentos y caudales líquidos en cuencas andinas colombianas seleccionadas.
- Proponer indicadores que permitan dar una descripción del comportamiento de los cauces torrenciales.
- Recomendar medidas de corrección a la frecuencia de monitoreo de las series de sedimentos basadas en las características de las subcuencas con fines de modelación.

3 Marco Teórico y Estado del Arte

3.1 Transporte de Sedimentos

El transporte de los sedimentos puede ser definido como el movimiento discontinuo del mismo hacia un nivel base, producto de la erosión (Di Silvo & Basson, 2008). Este puede ser arrastrado, transportado, depositado y almacenado y formar parte del canal o de las llanuras de inundación. Los ríos constituyen la principal ruta mediante la cual los productos de la erosión continental son llevados a los océanos (Dingman, 2009).

Este transporte se constituye en una dinámica natural la cual se debe conservar para no afectar las ofertas ambientales de los ríos, pero que su desconocimiento puede traer problemas para la convivencia con los ríos y su aprovechamiento (Zambrano, 2015).

El transporte de sedimentos es un proceso que representa una alta dificultad para su estimación debido a los diferentes fenómenos que gobiernan su comportamiento entre los cuales se tienen de tipo hidrológico, climático, geológico y geográfico; en donde su comportamiento varía tanto espacial como temporalmente. En adición a la inherente complejidad de este problema hay que involucrar aspectos relacionados con flujos bifásicos, así como también fenómenos de interfaz, lo cual hace que un acercamiento teórico general al problema no sea posible en la actualidad (Niño, 2004).

La complejidad de este tema hace que aun en la actualidad no se haya podido establecer una ley general para caracterizar o predecir estos procesos o fenómenos en un río, por lo cual solo se han realizado estimaciones mediante ecuaciones o fórmulas empíricas; la desventaja de usar estos métodos es que son aplicables únicamente a las condiciones y características de la zona o río en la cual fueron desarrolladas e implementadas, además de que estas no proporcionan una comprensión de los procesos físicos que describen el comportamiento de este suceso.

El proceso de erosión se puede describir en tres etapas: producción (cuenca hidrográfica y red de drenaje), transporte y deposición (Merritt, Letcher, & Jakeman, 2003). La Figura 4 muestra un sistema fluvial idealizado descrito por las 3 etapas anteriormente mencionadas.

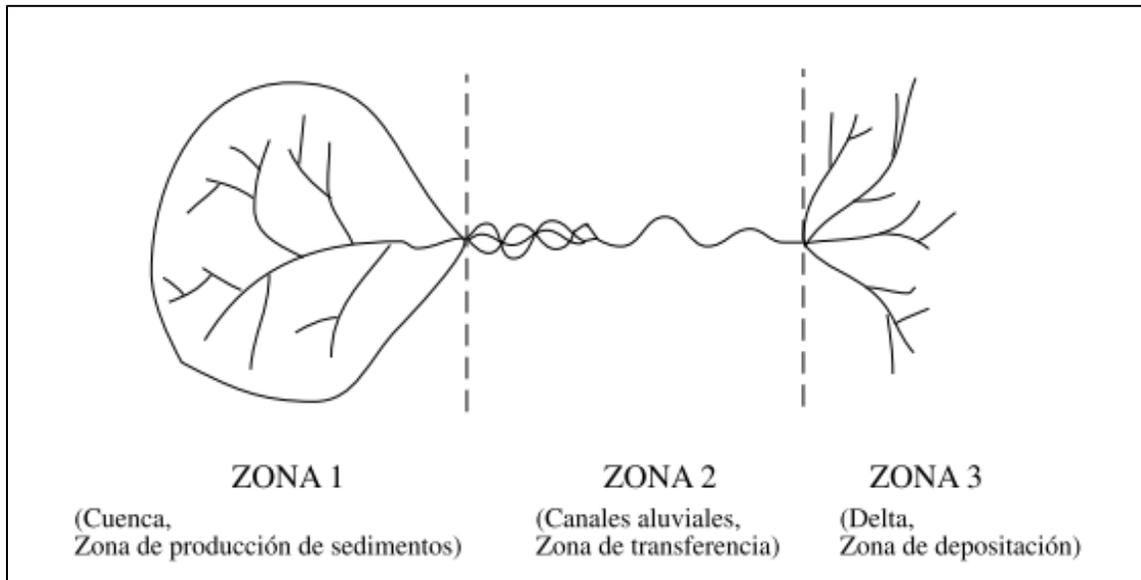


Figura 4. Esquema de Sistema fluvial idealizado. (Niño, 2004)

- **Zona de producción:** En esta zona predominan como procesos de producción de sedimentos los deslizamientos, flujos de escombros, flujos de lodos y la erosión de cárcavas. Se presentan algunos almacenamientos de sedimentos en las laderas y corrientes de primer orden; los ríos de montaña se encuentran encajados en lechos rocosos y no pueden expandirse lateralmente, presentan altas pendientes, grandes velocidades de flujo y presencia de depósitos aluviales. En esta zona el proceso de transporte de sedimentos es activado principalmente por la ocurrencia de un evento de crecida.
- **Zona de transporte o transferencia:** En esta zona se observan depósitos aluvio-coluviales en forma de abanicos coluviales y conos aluviales, los almacenamientos de sedimentos se dan en el cauce y las llanuras de inundación, los ríos de llanura no están encajados y pueden expandirse lateralmente, presentan patrones de trenzado y formación de barras e islas.
- **Zona de sedimentación o deposición:** En esta zona los ríos presentan características meándricas con flujo suave. Los ríos empiezan a llegar a su punto de más bajo de energía desembocando en un río tributario, lago, embalse o el mar. En esta zona se observa la presencia de deltas y conos aluviales.

Estos tres procesos ocurren en diferentes escalas espaciales y temporales dependiendo de las condiciones físicas de cada cuenca (clima, topografía, usos de la tierra, geología, geomorfología)

Hay que aclarar que los sedimentos son almacenados, erosionados y transportados en cada una de estas zonas en mayor o menor medida; pues al utilizar este sistema idealizado simplemente se busca dar a entender que dentro de cada zona uno de dichos procesos es dominante sobre los otros (Niño, 2004).

3.2 Medición de sedimentos

El transporte de sedimentos involucra varias variables que describen su comportamiento, razón por la cual los sistemas de monitoreo de sedimentos deben estar equipados con una cantidad apropiada de estaciones que estén continuamente monitoreando tanto características hidráulicas como de sedimentos, con el fin de que sean representativas del amplio rango de variables de tipo geográficos, hidrológicos y geomorfológicos que describen el proceso (MacDonald & Ingersoll, 2002).

Debido a la alta variabilidad espacial y temporal de los procesos de erosión resulta difícil la medición de los procesos que la describen en toda la extensión de la cuenca, además que también resultaría costoso; por lo que el monitoreo se implementa en la red fluvial teniendo en cuenta que el agua es el principal medio de transporte de los sedimentos producidos en la cuenca.

La caracterización del transporte de sedimentos en los ríos abarca el muestreo dividido en dos componentes: Carga de fondo y Carga en suspensión.

Carga de fondo

Las partículas más grandes que no pueden ser suspendidas por flujo, se movilizan por arrastre por el fondo del cauce. La obtención de una medida representativa de carga de fondo es extremadamente difícil debido a que cualquier dispositivo colocado en el fondo de la corriente puede alterar el flujo y la velocidad de movimiento de la carga del fondo y porque las velocidades en el lecho y las tasas de transporte en la carga de fondo varían fuertemente en el espacio y el tiempo (Dingman, 2009).

El método más común para realizar el muestreo de esta componente es el uso del muestreador Helley Smith el cual consta de un marco con una boquilla de entrada cuadrada, a la que se adjunta una bolsa de muestra de malla que es extraíble (**Figura 5**). También existen muestreadores para este

componente menos comunes como son los muestreadores Tipo plato y muestreadores tipo depresión, los cuales son apropiados para ser usados en corrientes poco profundas (Posada, 1994).

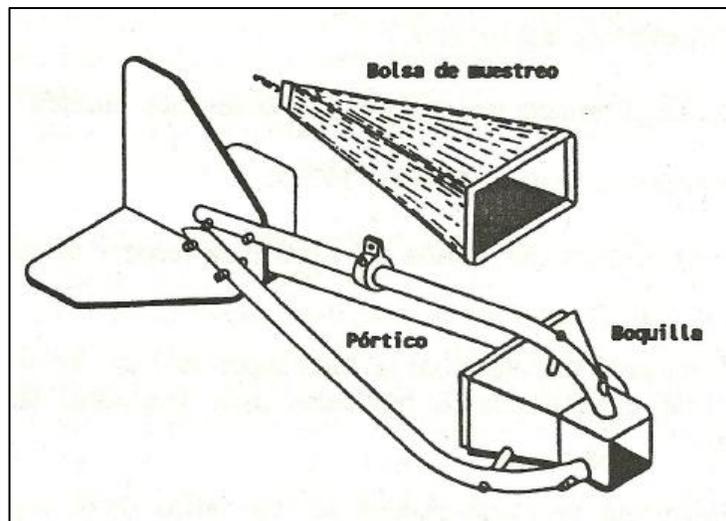


Figura 5. Muestreador Helley Smith para muestreo de la carga de fondo (Posada, 1994)

Evaluar la confiabilidad de las mediciones de la carga de fondo implica tener en cuenta los siguientes aspectos relacionados:

- La variabilidad espacio – temporal de las condiciones de velocidad y movimiento del material sólido.
- La perturbación en el flujo que puede ocasionar la introducción de un muestreador en el fondo o cerca de él.
- La representatividad de la distribución granulométrica de la muestra recolectada, ya que el diseño de los muestreadores no permite la recolección de todos los tamaños presentes en el fondo.

Carga en suspensión

Hace referencia al movimiento de las partículas más finas las cuales se encuentran suspendidas por el movimiento de la corriente y llegan a asentarse en el momento que la velocidad decrece.

Existen dos tipos de muestreadores de carga en suspensión utilizados:

- ***Muestreadores instantáneos***: Toman la muestra en un instante determinado y profundidad dada en el sitio donde se realiza el muestreo.

- **Muestreadores Integradores:** Permiten evaluar variaciones en la concentración de la carga suspendida al tomar la muestra sobre un periodo de tiempo y no solo en un instante determinado.

La concentración de sedimento en suspensión generalmente varía con la profundidad y con la distancia a las bancas, la toma de una muestra representativa requiere el uso de un muestreador integrador de profundidad (Dingman, 2009) como se observa en la **Figura 6**, que se baja y se sube a través del flujo a una velocidad constante lo cual permite obtener tales muestras integradas en profundidad en varios lugares en una sección transversal.

Los muestreadores integradores de profundidad vienen en una variedad de tamaños y pesos y pueden ser suspendidos en una varilla y operados a mano o suspendidos en un cable y elevados y bajados por una grúa o cabrestante (Dingman, 2009).

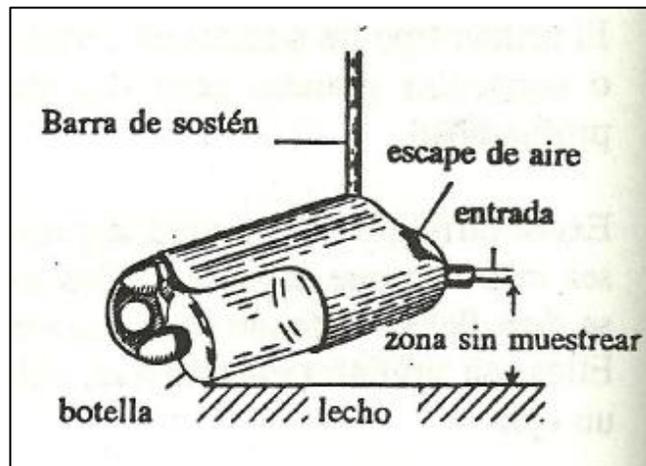


Figura 6. Muestreador para carga de sedimento suspendido DH-48 (Posada, 1994)

El muestreo de sedimentos generalmente subestima la cantidad de material en suspensión debido a que no se puede medir hasta el fondo porque el diseño de los muestreadores no lo permiten y también los muestreadores no pueden recoger material más grande que la abertura de su boquilla; y también debe tenerse en cuenta que en la muestra obtenida viene incluido tanto carga de lavado como carga de material de lecho.

Por ejemplo el uso del modelo DH-48 deja una zona no muestreada de 89 mm por encima del lecho del río (Dingman, 2009). En la Figura 7 se aprecia que la combinación del uso de un muestreador

Helley Smith y un muestreador de carga en suspensión por lo general deja una zona sin muestreo en donde la concentración de sedimentos no puede ser despreciable.

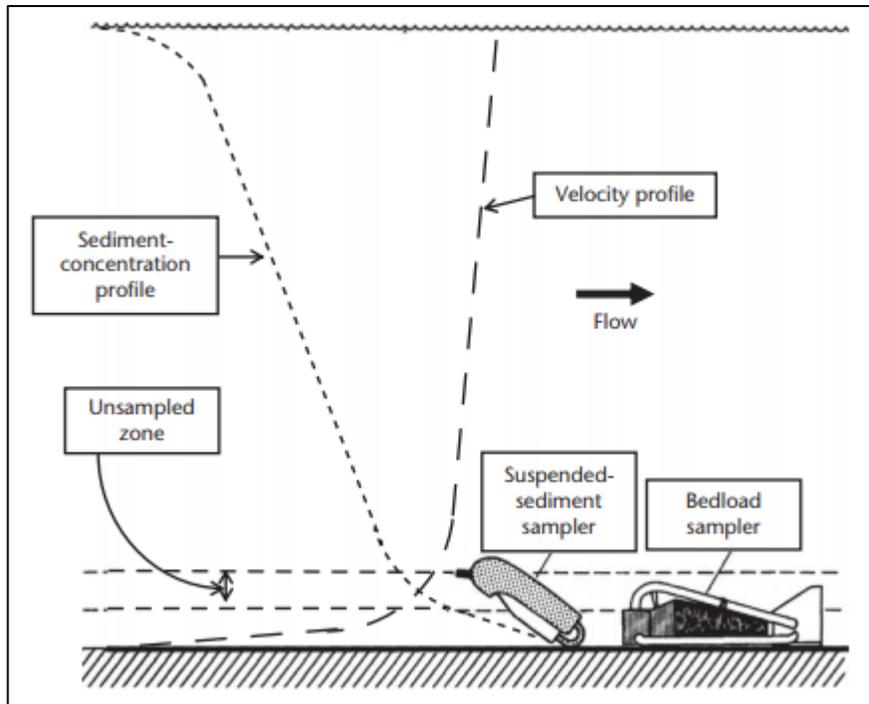


Figura 7. Despliegue de muestreadores de sedimentos, distribución del perfil de velocidad y concentración (Dingman, 2009)

Existe un movimiento intermedio en el que algunas partículas viajan saltando, algunas veces tocando el fondo y otras en suspensión, por lo que se denomina movimiento saltante y representa una parte importante del proceso de transporte por el viento, mientras que en los flujos líquidos el movimiento es tan pequeño que es difícil distinguirlo de la carga de fondo.

En Colombia la entidad encargada del monitoreo es el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales) la cual en su publicación "Protocolo de Monitoreo y Seguimiento del Agua" (IDEAM, 2007) establece en uno de sus literales la metodología de monitoreo de sedimentos implementada en el país. El protocolo resalta que la medición de sedimentos en el país se realiza a escala temporal diaria, además de describir los equipos y ecuaciones empleadas para la estimación de las tasas de sedimentos. Según se indica en el protocolo hay dos aspectos que están relacionados de forma directa a la subestimación de los datos de transporte de sedimentos en Colombia, los cuales se mencionan a continuación:

- Las mediciones se realizan con resolución diaria. Teniendo en cuenta que existen cuencas en donde sus crecidas ocurren en cuestión de horas y no de días, se tiende a subestimar los caudales de estas crecidas, siendo estas las principales transportadoras de la mayor parte de la carga de sedimento.
- Únicamente es medido el transporte de sedimentos en suspensión, de manera que la porción del sedimento transportado cerca del fondo no es registrada.

El rendimiento de sedimentos corresponde a los sedimentos que pasan por un punto de control en un tiempo determinado (generalmente un año) sobre el área aferente y da cuenta de los sedimentos erodados menos los sedimentos depositados en el área aferente al punto de control. Tiene unidades de masa sobre tiempo – por área $[M/T*A]$. El análisis del transporte y depósito de sedimentos se basa en este rendimiento de sedimentos, a partir de la información de transporte de sedimentos en suspensión obtenida con datos medidos de concentración en las estaciones del IDEAM. Con este producto es posible determinar sectores con valores altos de rendimiento de sedimentos y sectores en las cuales hay depósito neto de sedimentos (J. J. Montoya & Contreras, 2014).

En algunos lugares del mundo se han implementado varias metodologías particulares para el monitoreo sedimentos en este tipo de cuencas con el fin de caracterizar el comportamiento de los sedimentos, entre los cuales se mencionan estudios como el de Marchi, Arattano, & Deganutti (2002) que abarca el monitoreo durante 10 años de una cuenca torrencial localizada en Italia, utilizando como método la implementación de sensores ultrasónicos y sísmicos; resaltando la importancia de implementar un monitoreo más detallado temporalmente en este tipo de cuencas y su aplicación en la prevención de desastres. El mismo fundamento es resaltado y aplicado en el estudio similar de J. D. Milliman, Lee, Huang, & Kao (2017) que muestra la implementación de un monitoreo sistemático en este tipo de cuencas en Taiwán (país donde se encuentran varios de los ríos con mayor rendimiento de sedimentos del mundo) y Griffiths & Topping (2017) implementando una red de estaciones de monitoreo exclusiva en los pequeños afluentes del río Colorado, EE.UU. con el cual evalúan los impactos de un evento de inundación reflejados en la variabilidad de las tasas de sedimentos de este río.

3.3 Ríos de alta montaña y avenidas torrenciales

Estos ríos se localizan en las zonas montañosas de una cuenca caracterizados por presentar cauces con características de muy alta pendiente, altos valores de rugosidad en su lecho y una gran capacidad de transporte de sedimentos (Suarez, 2001).

En estos tipos de ríos se evidencia una alta variabilidad en sus caudales, presentándose caudales mínimos bastante pequeños o casi imperceptibles durante temporadas secas, pero con caudales máximos muy altos de corta duración durante temporadas de lluvia ante la ocurrencia de una avenida. Durante estos eventos intensos se presentan en los cauces altas velocidades de flujo y turbulencia de fondo que proporciona una alta capacidad de transportar materiales de gran tamaño (Suarez, 2001), por lo que analizar el régimen de caudales de un río (obtenida a partir de series históricas por ejemplo) puede proporcionar valiosa información para una preliminar clasificación del mismo.

Para este tipo de cauces susceptibles a desarrollar torrencialidad (Suarez, 2001) menciona algunas características que dificultan su análisis, entre los cuales se encuentran:

- Su análisis no incluye efectos de viscosidad debido a su alta rugosidad lo que indica que no es aplicable el análisis del número de Reynolds.
- Rugosidades de cauce muy superiores a las máximas analizadas con los criterios de la hidráulica tradicional
- Alta dificultad para definir los bordes de los cauces, pues ellos incluyen gran cantidad de caídas y curvas que impiden que pueda considerarse flujo uniforme sobre una determinada longitud.
- Alta dificultad para definir la pendiente del fondo, pues en este se presenta protuberancias hacia adentro del flujo formada por la presencia de elementos de gran escala.

Según el estudio de Cataño (2015) las características de los ríos de montaña se ven reflejados en la mayor variabilidad de su perfil longitudinal en relación a un río considerado aluvial; esto quiere decir que el perfil longitudinal de un río de montaña tiende a presentar puntos de quiebre de pendiente (conocidos en la literatura como “knickpoints”) en los cuales se concentran procesos erosivos importantes.

Las avenidas torrenciales se pueden definir como un tipo de movimiento en masa el cual moviliza a altas velocidades volúmenes importantes de mezclas caóticas de agua y diferentes cantidades de

material sólido sin clasificar, que pueden resultar de alto riesgo para los habitantes y la infraestructura ubicados en las zonas de acumulación (Caballero, 2011). El principal agente activador de este fenómeno es la precipitación (Abancó et al., 2016). Las cuencas ubicadas en la zona andina de Colombia presentan características topográficas que crean escenarios favorables para que estos fenómenos se presenten con una frecuencia relativamente mayor (L. Montoya, Silva, & González, 2009). Aristizábal, Arango, & García, (2018), quienes realizaron en Colombia estudios de impacto y clasificación entre los diferentes tipos de eventos torrenciales basados en información contenida en bases de datos, concluyen que dentro del territorio colombiano más de la mitad de estos eventos y sus correspondientes víctimas y daños se encuentran concentrados en la región andina y su ocurrencia se encuentra fuertemente correlacionadas a eventos hidroclimáticos ENSO en su fase La Niña.

El agua en rápido movimiento puede recoger, suspender y mover partículas más grandes con mayor facilidad que las aguas lentas. Esta es la razón por la cual los ríos tienen más aspecto fangoso durante las tormentas: transportan mucho más sedimento de lo que transportan durante un período de bajo flujo.

Las avenidas torrenciales ocurren principalmente en cuencas con las siguientes características (Caballero, 2011):

- Áreas pequeñas o medias.
- Ocurrencia de eventos de precipitación de gran intensidad y corta duración, los cuales son el principal agente activador.
- Cuencas que presentan altas pendientes.
- Cambios bruscos en las pendientes o ensanchamientos abruptos de sus cauces, que permiten la acumulación de los sedimentos.
- Usos del suelo predominantemente agrícolas con poca cobertura natural protectora, que en ocasiones se limita a las cabeceras de las fuentes de agua.
- Bajos tiempos de concentración y altas velocidades en los flujos de las corrientes.
- Altas fuentes de material fino granular para ser arrastrados por el agua que pueden ser materiales producidos por fuente antrópica (construcciones por ejemplo) o movimientos en masa dentro de la cuenca.

La resolución temporal durante la cual ocurren generalmente estas avenidas (minutos u horas) hace que su correcta caracterización requiera un estudio más detallado, ya que como se menciona en la sección 3.2 en Colombia el IDEAM tiene cobertura de mediciones de sedimentos realizadas en escala diaria mediante la cual no se capturan los efectos de los eventos activadores de estas avenidas.

Este tema ha sido abordado desde diferentes aspectos, por ejemplo en Colombia el estudio de González, Chavez, & Hermelin (2005) evaluó la incidencia de la geomorfología de la cuenca del río Fraile en la avenida torrencial ocurrida en 1994 en el municipio de Florida (Valle del Cauca), donde a partir de una caracterización geomorfológica e hidrológica de la zona se concluyó que aspectos tales como localización, la forma y tamaño, tiempos de concentración y altas variabilidades en el régimen de caudal favorecieron la ocurrencia de dicho desastre natural, y su evento activador corresponde a una precipitación con un periodo de retorno medido posiblemente en cientos de años. Similar al anterior también se desarrolló el estudio de Caballero (2011) en cuencas de la zona del Valle de Aburrá. Por otro lado el estudio de L. Montoya et al. (2009) presenta la evaluación de zonas de amenaza por avenidas torrenciales tomando como cuenca de estudio la quebrada Doña María en Antioquia y evalúa el nivel de amenaza de la zona por avenidas torrenciales mediante la caracterización geomorfológica de la zona y aplicación de técnicas de valoración cualitativas de las variables obtenidas.

En otras partes del mundo, por ejemplo el estudio Ozturk et al., (2018) analiza la combinación de eventos extremos con las características geomorfológicas de varias cuencas de tamaño similar en Alemania con el propósito de realizar comparaciones de susceptibilidad entre cuencas, estimaciones de los volúmenes de sedimentos producidos durante los flujos de escombros producidos e identificación de las fuentes principales de donde se desprende el sedimento; aplicando análisis de las características geomorfológicas de las cuencas de estudio y correlacionándolo con los eventos de lluvia, curvas de intensidad – duración y comparación de umbrales de inicio de movimientos con otras cuencas a nivel mundial. Por otra parte el estudio de Abancó et al. (2016) analiza las condiciones de los eventos de lluvia críticos desencadenantes de una avenida torrencial en una cuenca de estudio común a Francia y España, contribuyendo con información relevante obtenida mediante la aplicación de análisis estadísticos de las series a los estudios de definición de umbrales para la prevención y predicción de estos flujos torrenciales; su estudio evidencia la importancia de establecer una base de datos sólida de eventos extremos poco frecuentes que permita el fortalecimiento de acciones de predicción y prevención.

3.4 Revisión series de sedimentos

Análisis implementados con anterioridad en el área hidrográfica Magdalena Cauca (Restrepo & Restrepo, 2005) han demostrado que los parámetros físicos que más influyen en la producción de sedimentos en esta área hidrográfica corresponden a la esorrentía y el caudal máximo, análisis efectuado a partir de regresiones simples y múltiples entre varios parámetros seleccionados.

Las condiciones del caudal constituyen un factor de gran influencia en la variación de la cantidad y tamaño del sedimento que es transportado, por lo que cualquier revisión, estudio y control de calidad de series de sedimentos debe estar ligada también a establecer la correlación de estas con los datos de caudal en la corriente (Lee & Glysson, 2013). Es importante el estudio del flujo del agua el cual se constituye como el principal agente activador del transporte de sedimentos en las corrientes.

En la evaluación del comportamiento de las series es importante tener en cuenta factores que pueden ocasionar comportamientos erráticos en las series de sedimentos las cuales tienen que ver con la resolución temporal y espacial con la cual fueron registradas.

Al tener en cuenta el aspecto espacial se presenta un fenómeno de enmascaramiento del efecto real de los eventos de alta intensidad, el cual es proporcional al área de la cuenca. Cuando la cuenca analizada es más pequeña este fenómeno es bajo (Restrepo & Restrepo, 2005a) y el efecto de un evento de alta intensidad sobre el comportamiento hidrológico de la misma es más relevante; por lo que es importante estudiar con mayor detenimiento los eventos de alta intensidad en áreas pequeñas para estimar de manera adecuada su influencia en las series de caudal y de sedimentos.

Los caudales medios diarios dan pie a la tergiversación de las condiciones reales del flujo en el momento que se realiza la medición, especialmente en presencia de condiciones que cambian muy rápidamente (Lee & Glysson, 2010). Estos registros de caudal no representativos conllevan a la subestimación del evento activador de las avenidas torrenciales y por ende la subestimación de los datos de transporte de sedimentos. En Colombia se cuenta con registros de caudales con resolución diaria y no se mide la carga de fondo (IDEAM, 2015).

3.5 Geomorfología de una cuenca

La cuenca hidrográfica adquiere una gran relevancia al ser sus características las que determinan los caminos, las velocidades del movimiento del fluido y el tipo y cantidad de partículas sólidas que se encuentran mezcladas con él. Por lo tanto variables como la magnitud, el tiempo y la carga de sedimentos del caudal se encuentran reguladas por características referentes a la geología, la topografía y cobertura de la cuenca hidrográfica (Dingman, 2009).

3.5.1 Parámetros de forma

Área

Definida como la superficie dentro de la cual toda precipitación que cae dentro de ella abandone dicha superficie en forma de flujo concentrado por un solo punto (Posada, 1994) ubicado en la parte más baja de esta, trazada por una línea denominada “divisoria de aguas”. El agua que sale de esta área pasa a formar parte de una corriente de agua más grande.

El área de la cuenca se convierte en un parámetro importante a la hora de analizar la variabilidad de las tasas de producción de sedimentos. Varios estudios, por ejemplo el realizado por Restrepo & Restrepo (2005b), han demostrado que entre más grande sea el área de la cuenca analizada, los efectos producidos por eventos de alta intensidad son percibidos con menor claridad en el rendimiento de sedimentos a la salida de la cuenca, concordando con el estudio realizado por Milliman & Syvitski (1992) que evaluaron datos de descarga sedimentos en diferentes áreas de drenaje alrededor del mundo, concluyendo de su estudio que en las cuencas de menor tamaño hay mayor probabilidad de subestimación en los registros de los efectos extremos y su magnitud de impacto en las tasas de sedimentos si no se cuenta con un monitoreo adecuado.

Por otra parte, el área es un factor determinante en la variabilidad temporal del comportamiento de los sedimentos dentro de una cuenca; en ríos de montaña esta variabilidad es más acentuada y la mayor parte del sedimento es transportada en porcentajes menores o pequeñas porciones de tiempo; a manera de ejemplo se puede observar dicho comportamiento en la **Figura 8** correspondiente al estudio realizado por (Duvert, Gratiot, Némery, Burgos, & Navratil, 2011) en cuencas de diferente tamaño en México para sedimentos en suspensión.

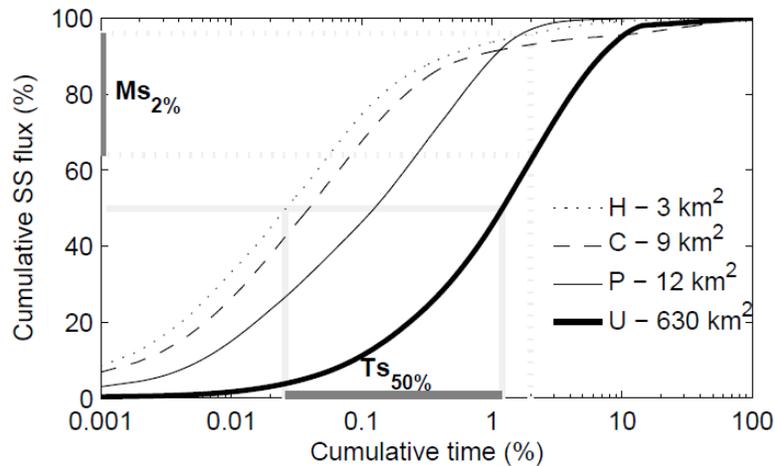


Figura 8. Curvas de duración de Flujo de sedimentos suspendidas en diferentes áreas de drenaje estudiadas. Tomado de: (Duvert et al., 2011)

Relación de elongación

Característica que proporciona una medida de la forma de la cuenca a partir de la relación entre el área de captación y la longitud denotada como:

$$Er = \frac{D}{L} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde **D** hace referencia al diámetro de un círculo con la misma área de la cuenca y **L** hace referencia a la longitud máxima de la cuenca. Valores cercanos a 1.0 indican que la forma de la cuenca se asemeja a la de un círculo, con terrenos de bajo relieve y pendientes poco pronunciadas; esta configuración de cuenca representa mayor efectividad en la descarga de escorrentía y presenta un hidrograma a la salida de la cuenca de respuesta rápida y un pico de inundación mucho más grande (Sukristiyanti, Maria, & Lestiana, 2017) en comparación a una cuenca alargada (Valores de 0.6 o menores) en la cual se presenta mayores retrasos en la llegada las porciones de flujo por el amplio rango de distancias a recorrer. Singh, Singh, & Haritashya (2011) mencionan que valores de este parámetro entre 0.6 y 0.8 indican alta presencia de relieve montañoso y pendientes fuertemente pronunciadas en el área de drenaje.

3.5.2 Parámetros de relieve

Las características hidrológicas de una cuenca están estrechamente condicionadas por sus condiciones de relieve (altitud, pendiente u orientación). Estas pueden crear condiciones que favorezcan la precipitación así como la concentración de esta misma en zonas de mayor altitud de la cuenca (Ybarra, Gil, & Campo, 2018).

Relación de relieve

Parámetro calculado como la relación entre el relieve total de la cuenca y la longitud de la misma a lo largo de su línea de drenaje principal (Schumm, 1956), valores alto de este parámetro podría indicarnos pendientes pronunciadas y correlacionarse de forma positiva al potencial erosivo de la cuenca y altas tasas de producción de sedimentos (Quiroga, Gil, & Coronato, 2014).

$$R_r = \frac{H_{max} - H_{min}}{L_{cuenca}} \quad Ec. 2$$

Integral hipsométrica

El análisis hipsométrico consiste en correlacionar el área de la cuenca y su elevación a partir de graficar en la abscisa las áreas y las ordenadas la altitud por encima y por debajo de donde se encuentran ubicadas, obteniendo el área bajo la curva conocido como la integral hipsométrica (HI) (Fryirs & Brierley, 2013). Los valores de la integral hipsométrica están relacionados con el grado de desequilibrio entre las fuerzas erosivas y tectónicas (Alhamed & Ahmad, 2017). La parte de la curva hipsométrica donde se muestra mayor porcentaje de áreas ubicadas en las zonas altas de la cuenca, es decir un mayor valor de HI (configuración tipo C en la **Figura 9**), hace referencia a una cuenca con condiciones propicias para la producción de sedimentos.

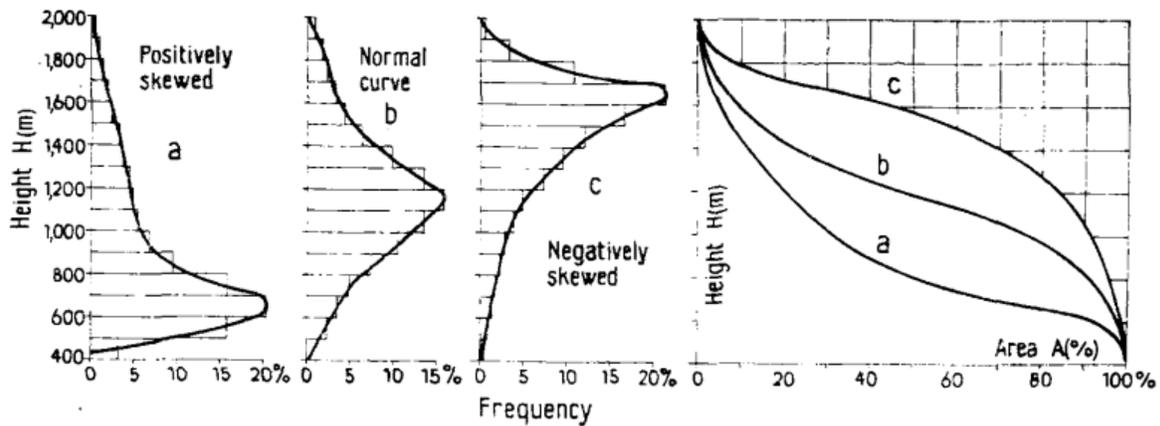


Figura 9. Configuraciones de la curva hipsométrica. Tomado de (Zavoianu, 1985)

Las configuraciones de las curvas hipsométricas dan un indicio del grado en que la masa ha sido transferida dentro de la cuenca por medio de procesos erosivos desde zonas con elevaciones más altas a elevaciones más bajas (Wohl et al., 2010).

3.5.3 Parámetros de red de drenaje

Densidad de Drenaje

Este parámetro caracteriza de forma cuantitativa la intensidad espacial de la red de drenaje o el grado de disección del terreno por las corrientes formadas, a partir del cual se puede conocer de manera preliminar la capacidad que tiene la cuenca para transportar y evacuar el sedimento producido en las zonas altas, además del estado de erosión de la cuenca (Dingman, 2009). La densidad de drenaje está definida por la relación entre la longitud total de las corrientes y el área de la cuenca:

$$D_a = \frac{\sum L_i}{Area} \quad Ec. 3$$

Valores altos de este parámetro puede indicar una cuenca que se encuentra bien drenada y que posee una rápida respuesta hidrológica, con suelos en donde se presentan litologías poco resistentes, ambientes semiáridos y tropicales (Wohl et al., 2010), con alto potencial de erosión o prácticamente impermeables, que no presentan alta vegetación y se caracterizan por un relieve montañoso con pendientes pronunciadas. Las condiciones mencionadas pueden hacer la cuenca susceptible a inundaciones y erosiones. Por otra parte valores bajos de este parámetro pueden indicar una lenta

respuesta hidrológica de la cuenca, con suelos muy permeables y resistentes a los procesos de erosión, de relieve poco montañoso (Posada, 1994).

Perfil longitudinal del cauce

Evaluar las características a lo largo de un río puede proporcionar una herramienta muy útil para analizar las interacciones entre varios atributos de sistemas fluviales, además de evidenciar la evolución del paisaje en cualquier cuenca (Fryirs & Brierley, 2013), tipos de sedimentos, evolución y estructura geológica de la misma. La configuración longitudinal general de un río corresponde a un perfil suave y cóncavo hacia arriba.

Generalmente los perfiles longitudinales de grandes ríos son lisos, sin embargo existen perfiles longitudinales en donde se observan cambios drásticos en su pendiente lo cual es conocido en la literatura como “knickpoints”, estos quiebres son característicos de perfiles de ríos de montaña (Wohl et al., 2010) en donde se acentúan los procesos erosivos.

La concavidad es definida en (Knighton, 1998) como:

$$C = \frac{2A}{H} \qquad \text{Ec. 4}$$

Siendo **A** la altura entre el perfil del río y la función lineal que une el punto más alto y el punto más bajo del perfil, evaluada en el punto medio del recorrido del río (m) y **H** la altura entre el punto más alto y el punto más bajo del perfil (m). Los perfiles tienden a una mayor concavidad en ríos donde la descarga aumenta con mayor rapidez en contraste a los perfiles de concavidad reducida que presentan ríos de zonas áridas donde la descarga disminuye aguas abajo (Knighton, 1998).

4 Metodología

4.1 Datos e información disponible

Se partió de la revisión del estudio de modelación hidrosedimentológica de algunas subzonas del área hidrográfica Magdalena Cauca denominado “EVALUACIÓN DE LA DINÁMICA DE LOS PROCESOS DE SEDIMENTACIÓN (EROSIÓN, TRANSPORTE Y DEPÓSITO DE SEDIMENTOS) EN DIEZ SUBZONAS DE LA CUENCA MAGDALENA – CAUCA” (IDEAM, 2015) llevado a cabo entre el IDEAM y la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales. En este se realizó modelación hidrosedimentológica de tipo conceptual y distribuida en dicha zona, en subzonas con diferentes escenarios de información (aforadas y no aforadas).

Dentro de los resultados de la modelación distribuida se obtuvieron curvas de duración del caudal sólido de las subcuencas, mediante las cuales se evidenció una sobrestimación de los resultados simulados con respecto a los datos observados en las series históricas en algunas de las subcuencas objeto de estudio, sobreestimaciones correspondientes a caudal líquido y transporte de sedimentos que son causados por la ocurrencia de eventos extremos de alta intensidad y corta duración que no alcanzan a ser registrados en la resolución diaria registrada por IDEAM. De este estudio se obtuvo información de referencia como las características geológicas que describen cada una de las subzonas de estudio.

Para el presente estudio la información recopilada corresponde a series históricas tanto para caudal líquido y caudal sólido en resolución diaria para varias subzonas del área hidrográfica Magdalena Cauca, información que ha sido suministrada por IDEAM, el cual presenta una cobertura de 360 estaciones de monitoreo de sedimentos alrededor del territorio colombiano (Figura 10), dentro de las cuales 210 estaciones son de medición de transporte y 150 estaciones de medición de concentración.

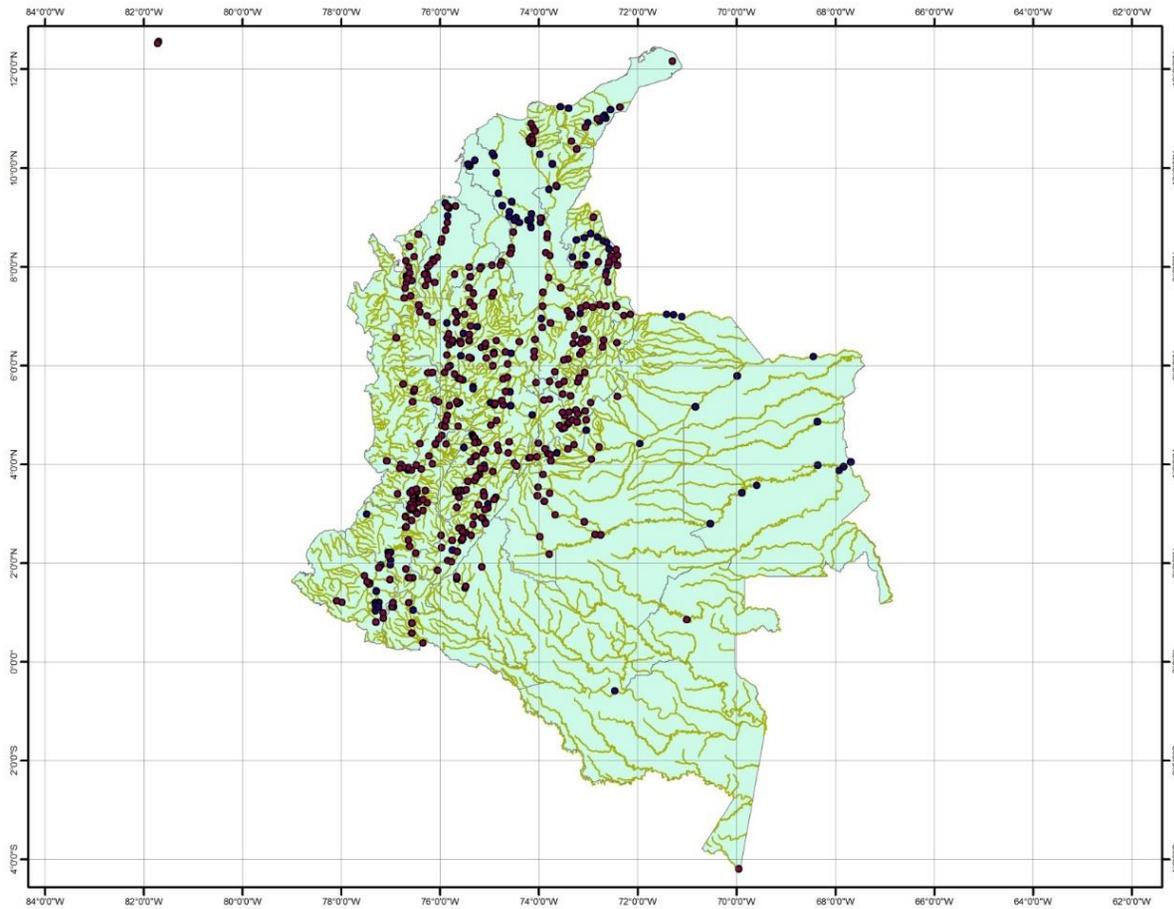


Figura 10. Red de estaciones de monitoreo de sedimentos en Colombia. Fuente: (IDEAM, 2015)

Para escoger las estaciones que fueron objeto de este estudio, se tomó el área hidrográfica Magdalena Cauca (**Figura 11**) la que se encuentra muy bien instrumentada y con amplia información disponible para ser estudiada (IDEAM, 2015) .

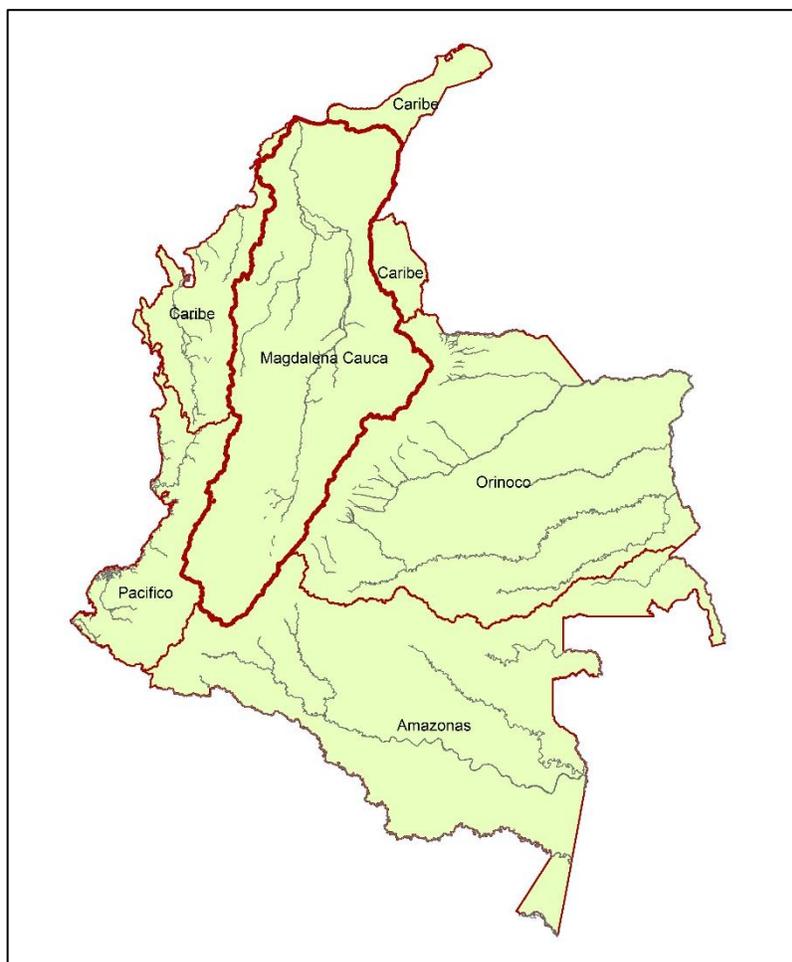


Figura 11. Ubicación área hidrográfica Magdalena Cauca

Dentro de esta área hidrográfica se seleccionaron estaciones con la mayor cantidad de información tanto para caudal líquido como para caudal sólido disponible, criterio con el cual se escogieron las subzonas Fonce, Chicamocha, Nare, Yaguará y Saldaña. Dentro de estas subzonas se escogieron las estaciones descritas en la **Tabla 1** con base en la mayor cantidad de información disponible.

Tabla 1. Subzonas del área hidrográfica Magdalena Cauca con las estaciones de estudio y su respectivo nombre

| Subzona | Código estación | Nombre |
|----------------|------------------------|---------------|
| Chicamocha | 24037030 | El palo |
| | 24037040 | Guaicán |
| | 24037130 | La Reforma |
| Fonce | 24027060 | Puente Arco |
| | 24027040 | Puente Cabra |
| | 24027030 | Nemizaque |
| | 24027050 | Puente Llano |
| | 24027070 | Mérida |
| Nare | 23087150 | Puente Real |

| Subzona | Código estación | Nombre |
|----------------|------------------------|--------------------|
| | 23087180 | Los Sirpes |
| | 23087190 | La Garrucha |
| | 23087160 | Caramanta |
| Saldaña | 22027020 | Gaitania |
| | 22017010 | Bocas |
| | 22057050 | Puente La hamaca |
| | 22027010 | El cóndor |
| | 22037010 | La esperanza |
| | 22067010 | Puente Ortega |
| Yaguará | 21087070 | Hacienda El Jardín |
| | 21087080 | Hacienda Venecia |
| | 21087050 | Bocatoma |
| | 21087040 | Hidroeléctrica |

Los periodos que registran datos de las variables mencionadas en cada una de las subzonas corresponden a los mencionados a continuación:

- Fonce: 1984 – 2010 (26 años)
- Chicamocha: 1981-2012 (31 años)
- Nare: 1983-2013 (30 años)
- Saldaña: 1973-2013 (40 años)
- Yaguará: 1983-2013 (30 años)

También se contó con información cartográfica para ser analizada mediante herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), la cual fue analizada para llevar a cabo una adecuada caracterización geomorfológica respecto a su forma, relieve y red de drenaje de las cuencas de estudio. En la información de mapas suministrada se contó con información correspondiente a:

- Mapas de elevación digital (DEM) con una resolución de celda de 30x30 m
- Localización e información de estaciones de monitoreo
- División hidrológica de Colombia (Áreas hidrográficas, Zonas, subzonas, cuencas)
- Recorridos de ríos principales y secundarios

4.2 Descripción del área de estudio

El presente estudio se realizó en subcuenca o cuencas intermedias localizadas en el área hidrográfica Magdalena – Cauca (**Figura 12**), la cual se encuentra muy bien monitoreada e instrumentada por el IDEAM. El área está delimitada al occidente por el lado oriental de la cordillera occidental y al oriente por el lado occidental de la cordillera oriental. Cuenta con los dos principales ríos del país los cuales drenan sus aguas a la mega cuenca del mar Caribe, que son el Magdalena y el Cauca de los cuales deriva su nombre y que tienen su nacimiento en el macizo colombiano. El río Cauca se encarga de drenar un área aproximada de 66750 Km² y desemboca en el río Magdalena cerca de la población de Pinillos, Bolívar; mientras que el río Magdalena drena un área de aproximadamente 250000 Km² y desemboca sus aguas en el mar Caribe.

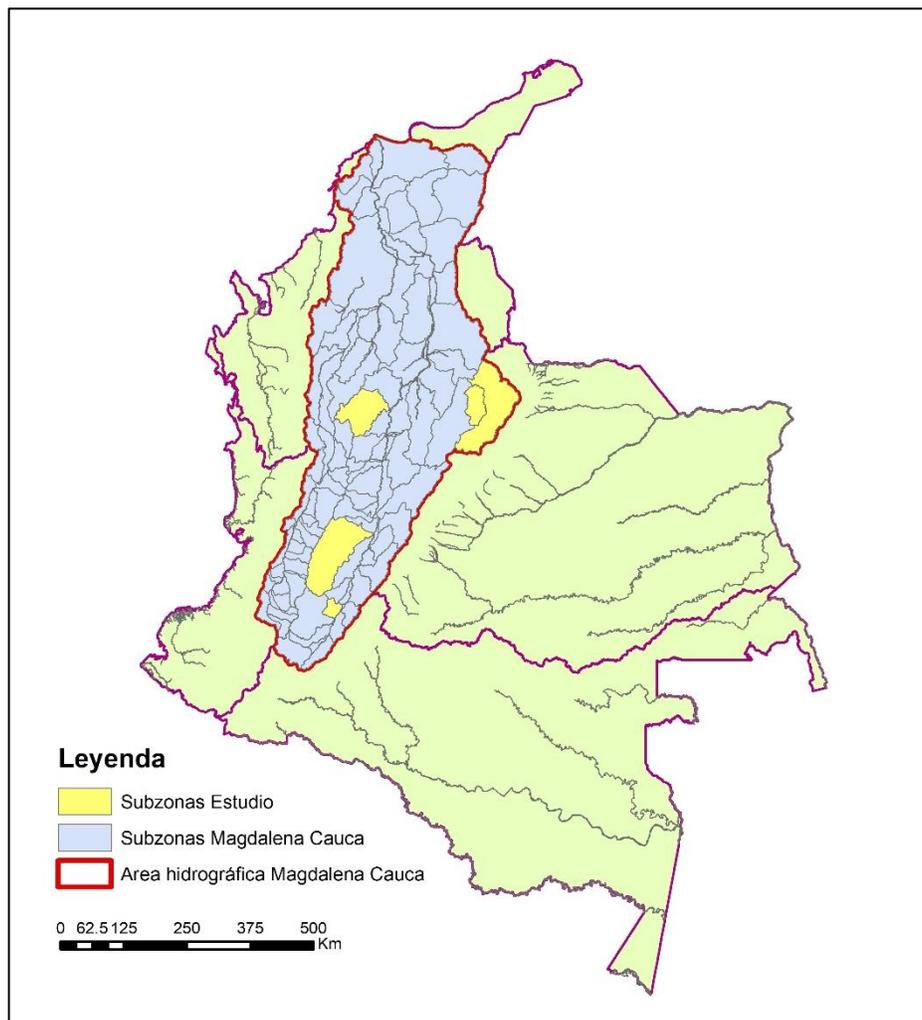


Figura 12. Área hidrográfica Magdalena Cauca y subzonas de estudio (Elaboración propia)

La zona hidrográfica Magdalena Cauca presenta una gran diversidad morfológica y climatológica con grandes llanuras de inundación, altas montañas en donde se evidencia una diversidad de influencias antropogénicas que incluyen deforestación, baja conservación del suelo, prácticas mineras y aumento de tasas de urbanización todo lo cual influye en el aumento del rendimiento de los sedimentos (Kettner et al., 2010).

Teniendo en cuenta que la zona está altamente instrumentada y cuenta con series de sedimentos de cerca de 40 años, se seleccionó dicha área como zona de estudio porque presenta uno de los mayores rendimientos de sedimentos en Suramérica ($560 \text{ ton/Km}^2/\text{año}$) (Restrepo et al. 2006), con valores máximos por encima de los $2000 \text{ ton/Km}^2/\text{año}$ (Restrepo & Restrepo, 2005a).

A continuación, se realiza una descripción más detallada de cada subzona.

Río Nare (2308)

Subzona ubicada en el Magdalena Medio Antioqueño (ver **Figura 13**), correspondiente a la zona geomorfológica homogénea de vertientes de la cordillera central ubicada en la parte norte de la misma en donde se observan macizos aplanados con ambiente plutónico terciario y sin actividad volcánica reciente (IDEAM, 2015). Vertientes medias en paisaje de colinas y lomerío con erosión superficial difusa y concentrada es el sistema morfogénico predominante; observándose en la parte media franjas de montaña alto andina inestable y escarpes con pendientes cóncavas y deslizamientos rotacionales (IDEAM, 2015); mientras que en su parte baja se observan llanuras aluviales asociadas a su llegada al río Magdalena donde predomina la depositación de sedimentos.

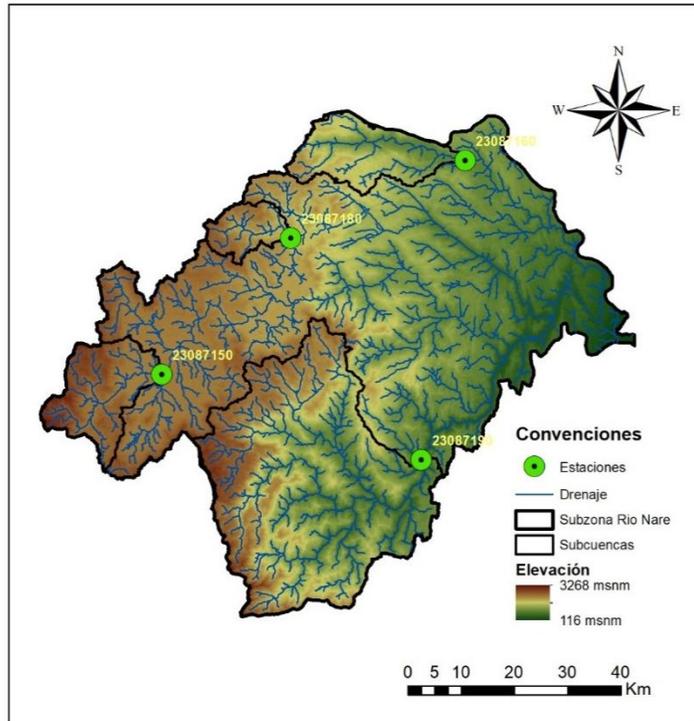


Figura 13. Subcuencas de estudio en subzona de Río Nare (Elaboración propia)

Río Fonce (2402) y Chicamocha (2403)

Subzonas ubicadas en la zona geomorfológica homogénea correspondiente a los altiplanos de la cordillera oriental de los andes sobre rocas sedimentarias terciarias y cuaternarias (IDEAM, 2015). Las partes altas de sus cuencas se encuentran influenciadas por los sistemas glacial, periglacial y glacial heredado (ver **Figura 14** y **Figura 15**).

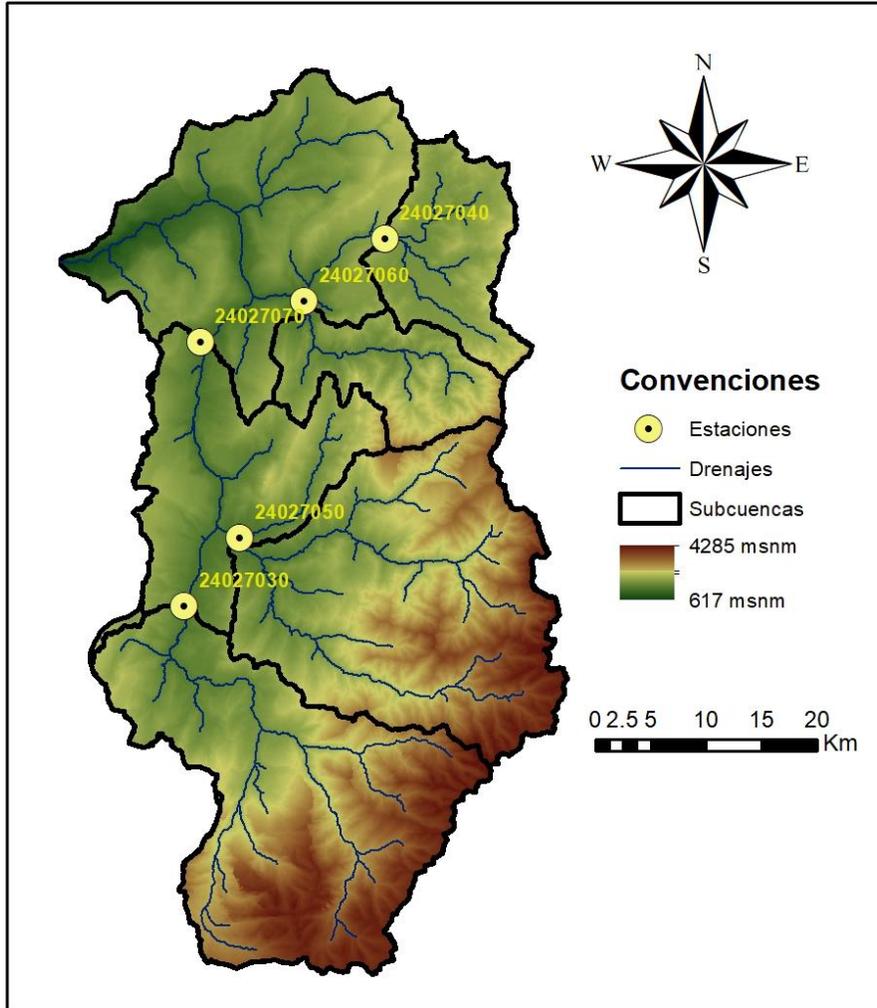


Figura 14. Subcuencas de estudio en subzona de Río Fonce (Elaboración propia)

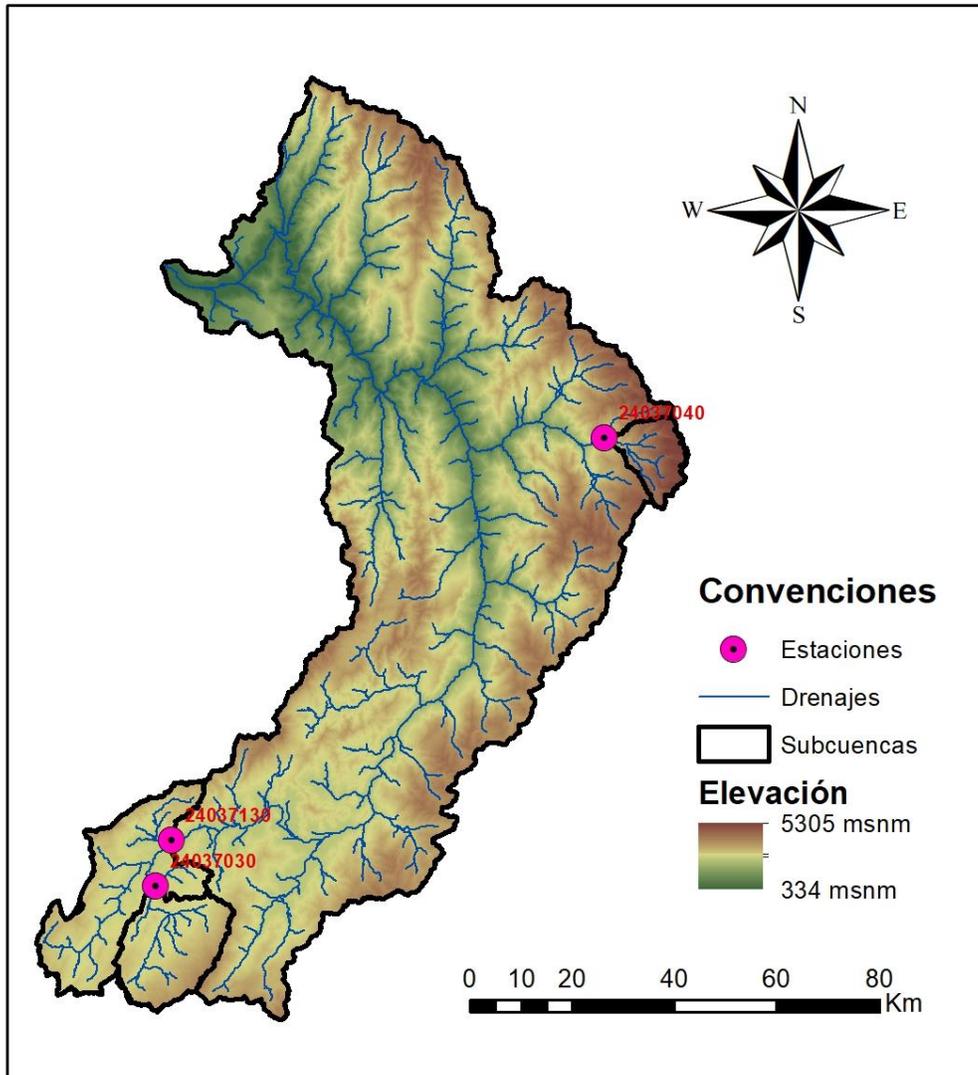


Figura 15. Estaciones de Estudio en la subzona del río Chicamocha (Elaboración propia)

En las partes altas hay influencia de los sistemas glacial, periglacial y glacial heredado. Las parte medias se encuentran en los sistemas de altiplano, vertientes medias y franjas de montaña alto andina inestable con movimientos en masa generalizados y disección profunda. La presencia de llanuras aluviales se restringe a la parte baja de las subzonas de los ríos Bogotá, Negro y Sumapaz.

Río Saldaña (22)

Ubicado en el departamento del Tolima, con desembocadura en el río Magdalena. La cuenca de este río presenta las siguientes subzonas: Alto Saldaña, Medio Saldaña y Bajo Saldaña (ver Figura 16). La

subzona de Alto Saldaña (2201) forma parte de la zona geomorfológica homogénea correspondiente a las vertientes de la cordillera central en ambiente volcánico. Su parte alta corresponde a sistemas glaciales, periglaciales o glacial heredado; sus partes medias altas presentan una franja del sistema de montaña alto andina inestable (IDEAM, 2015) en donde se presentan movimientos en masa generalizados y una red de drenaje diseccionada a profundidad considerable. Se observan flujos torrenciales, deslizamientos rotacionales y disección acelerada en su parte media. Finalmente en su parte baja se observan piedemontes con depósitos aluvio-torrenciales, fluvio - glaciales y fluvio – volcánicos.

Las subzonas de Bajo Saldaña (2208) y Medio Saldaña (2203) forman parte de la zona geomorfológica homogénea del Alto Magdalena, dentro de la cual sus subzonas presentan vertientes medias con control estructural donde se observan frecuentemente deslizamientos y derrumbes; mientras que en su parte baja se observan piedemontes con depósitos aluvio torrenciales y sedimentos epicontinentales que son asociados al río Magdalena (IDEAM, 2015).

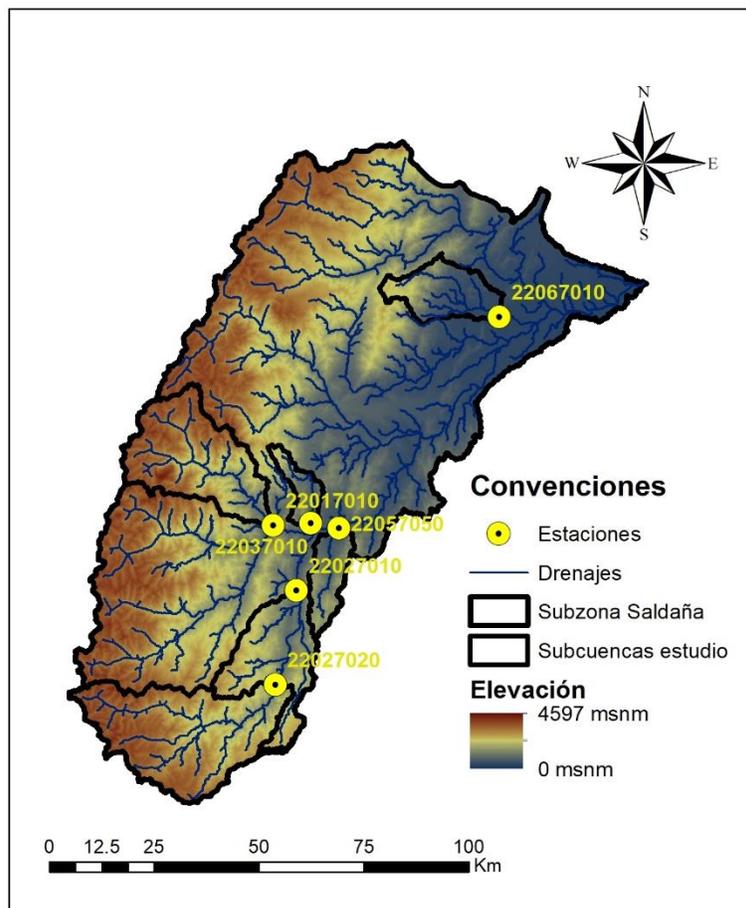


Figura 16. Estaciones de Estudio en la subzona del río Saldaña (Elaboración propia)

Río Yaguará (2108)

Subzona que forma parte de la zona geomorfológica homogénea del Alto Magdalena (en el departamento del Huila), dentro de la cual sus subzonas presentan vertientes medias con control estructural donde se observan frecuentemente deslizamientos y derrumbes; mientras que en su parte baja se observan piedemontes con depósitos aluvio-torrenciales y sedimentos epicontinentales que son asociados al río Magdalena (ver **Figura 17**) (IDEAM, 2015).

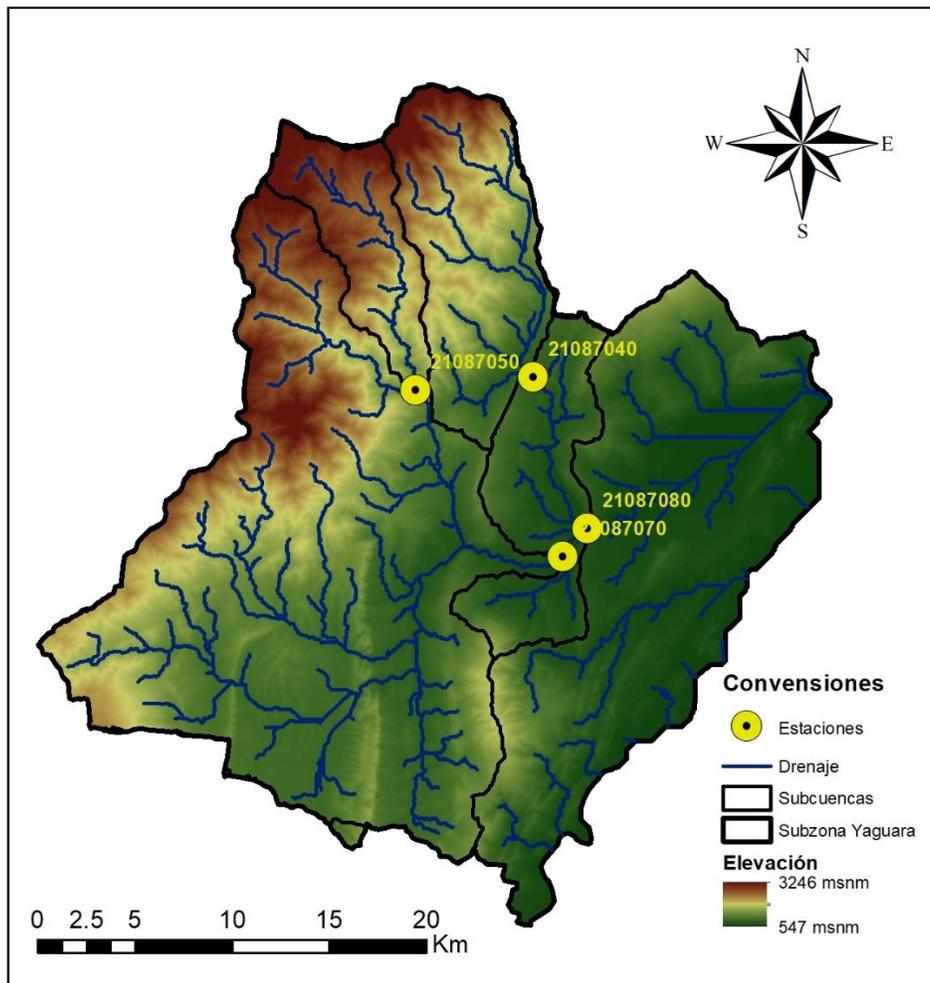


Figura 17. Subcuencas de estudio en la subzona de Yaguará (Elaboración propia)

4.3 Caracterización estadística y geomorfológica en las áreas de estudio

Esta consistió en caracterizar las estaciones de estudio, tanto en su régimen hidrológico como en sus características físicas; el objetivo es que dicha caracterización pueda explicar y predecir el comportamiento torrencial.

4.3.1 Análisis Estadístico de series históricas

Partiendo de la base de información que fue recopilada, que corresponde a las series de datos en cada estación de estudio tanto para caudal líquido como para caudal sólido, se realizó un análisis exploratorio y estadístico en cada una de las series. El análisis permitió entender el régimen de caudales en cada estación.

En primer lugar se obtuvo la estadística descriptiva, en donde se calcularon diferentes tipos de parámetros que representan la tendencia central, dispersión de datos y posición, los cuales permitieron conocer el comportamiento de sus series (**Tabla 2**).

Tabla 2. Parámetros estadísticos a utilizar

| TIPO | PARÁMETRO |
|--------------------------|--|
| Tendencia central | - Media |
| | - Mediana (2do cuartil) |
| Dispersión | - Desviación estándar |
| | - Varianza |
| | - Coeficiente de variación |
| | - Valor máximo y mínimo |
| | - Asimetría |
| | - Curtosis |
| Posición | - 1er cuartil |
| | - 3er cuartil |
| | - Rango intercuartil IQR (3er cuartil – 1er cuartil) |

La estadística descriptiva se complementa con análisis exploratorios gráficos en cada estación tanto para caudal líquido como para caudal sólido, dentro de estos análisis están incluidos las gráficas de las series de datos durante el periodo analizado, los diagramas de caja o “boxplot” en donde se representa la información de la serie en cuartiles y los histogramas de frecuencia relativa que representan la distribución de la serie de datos.

Después de haber realizado este análisis se elaboraron curvas de duración caudal CDC con las que se obtuvo los indicadores en las siguientes secciones del documento. Con este análisis se buscaba resumir en forma de parámetros fáciles de interpretar toda la gran cantidad de información que está contenida en las series de datos, tanto para caudal líquido como caudal sólido.

4.3.2 Análisis geomorfológico

Aplicando Sistemas de Información Geográfica (SIG) a la información suministrada en formato de mapas se obtuvieron las características geomorfológicas de cada área de drenaje las cuales permiten tener información de su geometría o forma, relieve y configuración de las redes de drenaje; información que incide de manera directa en el régimen de caudales. Los parámetros geomorfológicos obtenidos corresponden a los incluidos en la Tabla 3 con su respectiva clasificación y descripción.

Tabla 3. Descripción parámetros geomorfológicos

| Variable (símbolo, unidad) | Descripción |
|---------------------------------------|---|
| <i>Forma</i> | |
| Área de drenaje (A, km ²) | Área de la cuenca sobre la estación de monitoreo |
| Longitud de la cuenca (L, Km) | Distancia medida en línea recta entre el punto más lejano de la divisoria de aguas hasta la salida de la cuenca. |
| Relación de elongación (Er, -) | Dado por $Er = \frac{D}{L}$, donde D corresponde al diámetro de un círculo con la misma área de la cuenca y L la longitud de la cuenca |
| Factor de Forma (Ff, -) | Dado por $Ff = \frac{A}{L^2}$ |
| Relación de Circularidad (Cr,-) | Dado por $Cr = \frac{A}{A_c}$, donde Ac corresponde al área de un círculo con el mismo perímetro de la cuenca. |
| <i>Relieve</i> | |
| Diferencia de elevación (H, m) | Diferencia entre las elevaciones máxima y mínima de la cuenca |
| Altura media (Hm, m) | Elevación media dentro del área de drenaje de la cuenca |
| Pendiente media de la cuenca (Sc, %) | |
| Relación de relieve (Rr, -) | Dado por $Rr = \frac{H}{L}$ |
| Integral hipsométrica (HI,-) | Área bajo la curva hipsométrica de la cuenca |
| <i>Drenaje</i> | |

| | |
|---|--|
| Longitud cauce (Lc, km) | Longitud de la corriente principal de la cuenca |
| Concavidad (C,-) | Concavidad del perfil longitudinal de la corriente principal de la cuenca. |
| Pendiente media cauce (So, %) | |
| Longitud total drenajes (Lt, km) | Sumatoria de las longitudes de todas las corrientes de drenaje dentro de la cuenca |
| Densidad de drenaje (Dd, km/km ²) | Dado por $D_d = \frac{L_t}{A}$ |

Estos parámetros obtenidos de la caracterización geomorfológica fueron comparados con la definición de torrencialidad que es planteada en el literal 4.4.

4.4 Evaluación de la torrencialidad en las áreas de estudio

Para evaluar la torrencialidad en cada subcuenca, a continuación, se propone una serie de indicadores a partir de factores o comportamientos físicos de la cuenca. Los indicadores se construyeron a partir de las series hidrológicas y de las características fisiográficas de la cuenca y se evaluaron en cada área de drenaje.

Una de las principales características de una cuenca torrencial corresponde a la alta variabilidad de su régimen de caudales; por lo tanto, se plantearon para el presente estudio 4 condiciones del régimen de caudales para clasificar una cuenca como torrencial:

- **Condición 1:** Relación caudales máximos a caudales mínimos muy alta, lo que implicaría una gran distancia entre los primeros y los segundos.
- **Condición 2:** Valores de caudales máximos muy alejados de su comportamiento medio.
- **Condición 3:** Alta dispersión en el régimen intradiario de caudales, en este caso caudales máximos alejados de su comportamiento medio.
- **Condición 4:** Alto diferencia entre el caudal máximo del régimen diario y el caudal máximo del régimen intradiario.

Los límites para evaluar el cumplimiento o no de cada una de las condiciones planteadas serán definidos con base en el comportamiento de gráfica de la probabilidad de excedencia de indicadores que representan cada condición, obtenidos para cada una de las cuencas de estudio.

4.4.1 Serie sintética de caudal horario

Se propone emplear los caudales horarios para el cálculo de los indicadores, ya que al realizar mediciones diarias puede que no se alcance a registrar los caudales extremos que ocurren durante intervalos de tiempo inferiores al diario (minutos u horas, por ejemplo).

Para la obtención del régimen intradiario de caudales se empleará la metodología empírica propuesta por (Cataño, 2015) a partir de la curva de duración de caudales diarios de las series. Cataño (2015) indica que se puede estimar en cada probabilidad de excedencia de la CDC un factor amplificador en función de los coeficientes α y β que dependen de la probabilidad de excedencia (solo aplicable a probabilidades menores al 2.5%) y del tiempo de concentración de la cuenca como se indica en la siguiente ecuación:

$$\left(\frac{Q_h}{Q_d}\right)_p = f(t_c, p) = \alpha_p t_c^{\beta_p} \quad \text{Ec. 5}$$

Donde α y β son coeficientes de amplificación hallados mediante una función potencial y su valor depende de cada probabilidad de excedencia en la curva de duración de caudal diaria, t_c corresponde al tiempo de concentración. Los coeficientes de amplificación del caudal α y β se obtienen a partir de la **Figura 18** según la probabilidad de excedencia de la curva de duración de caudal diaria.

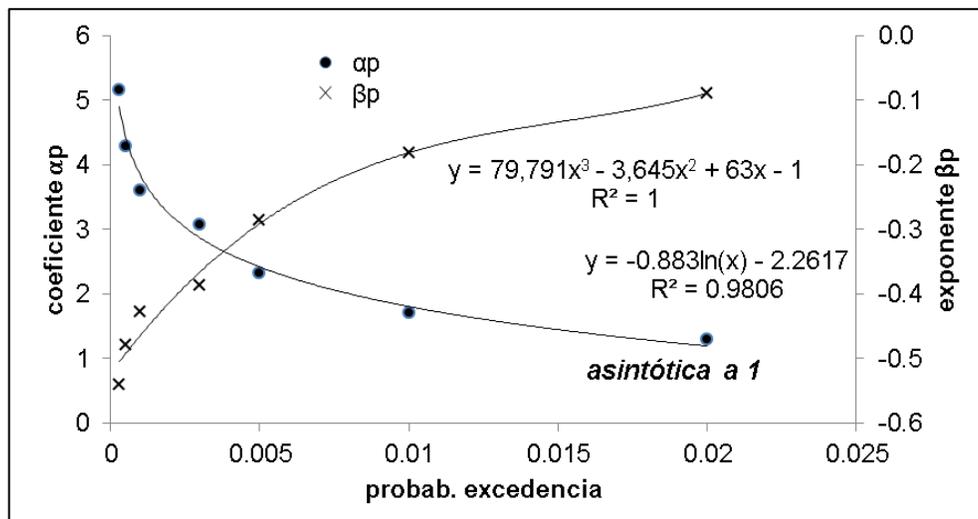


Figura 18. Coeficientes de amplificación asociados a la obtención del régimen intradiario de caudales líquidos
Fuente: (Cataño, 2015)

Según este método el tiempo de concentración es el factor dominante en la estimación de la torrencialidad, pues los caudales horarios máximos serán mayores cuanto menor sea el tiempo de concentración de una cuenca, como se puede observar en la **Figura 19**.

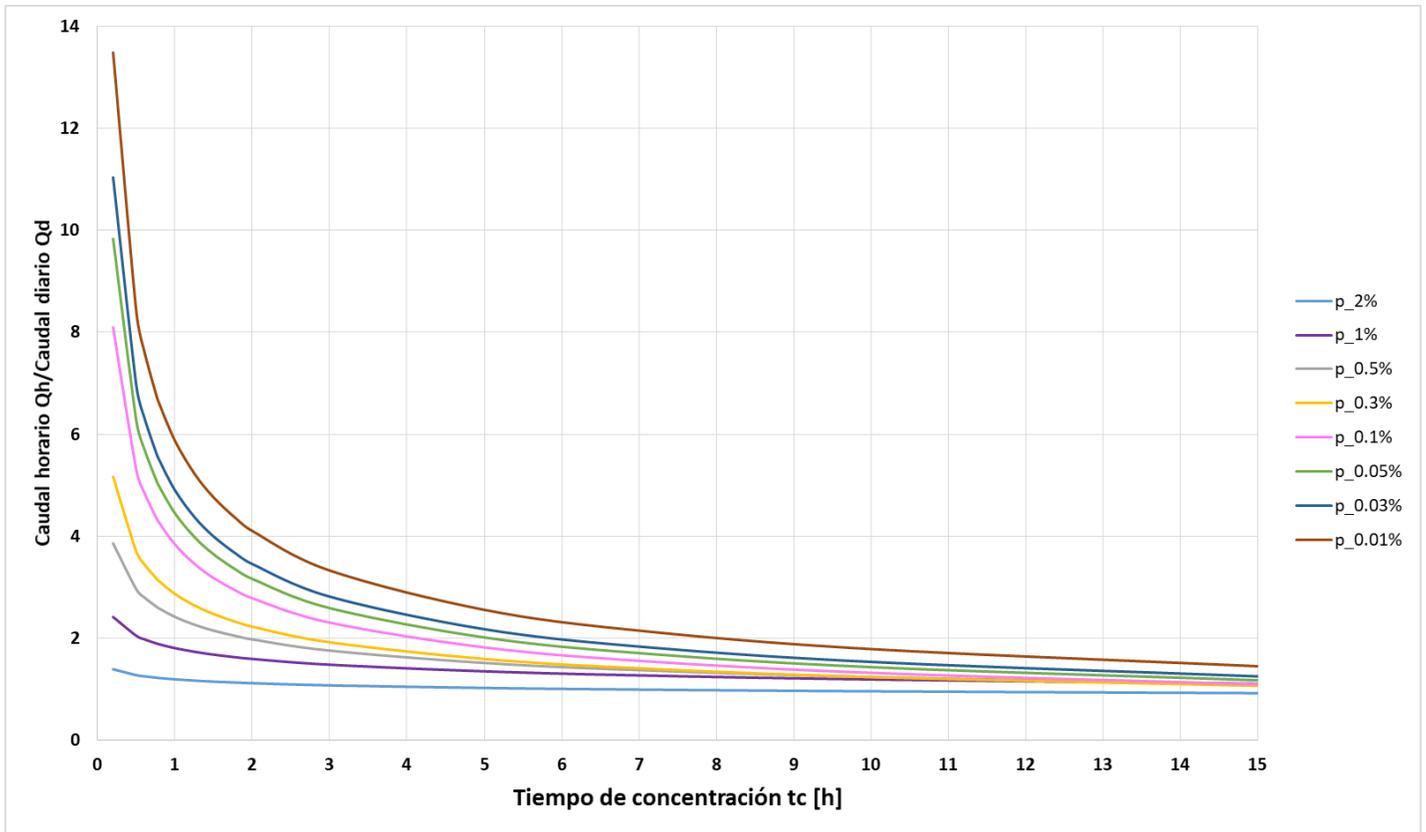


Figura 19. Relación Caudal horario/Caudal diario vs Tiempo de concentración de la cuenca

4.4.2 Indicadores de valores extremos

A partir de la CDC diaria de cada estación se obtienen los caudales Q_{95} (caudal con probabilidad de excedencia del 95%) y $Q_{0.01}$ (caudal con probabilidad de excedencia del 0.01%) los cuales se proponen como representativos de los valores mínimo y máximo respectivamente de los caudales líquidos y sólidos de la cuenca (Ver **Figura 20**). Estos indicadores fueron utilizados como representativos de los valores extremos con el objetivo de eliminar la incertidumbre que puede encontrarse en valores extremos registrados de manera errónea. Así mismo a partir de la CDC se obtiene el Q_{50} (caudal con probabilidad de excedencia del 50%) que representará el valor medio (Ver **Figura 20**). Los indicadores planteados en este estudio se basan en el estudio de Balbin et al. (2019) en donde son usados para evaluar la respuesta hidrológica a partir de series históricas.

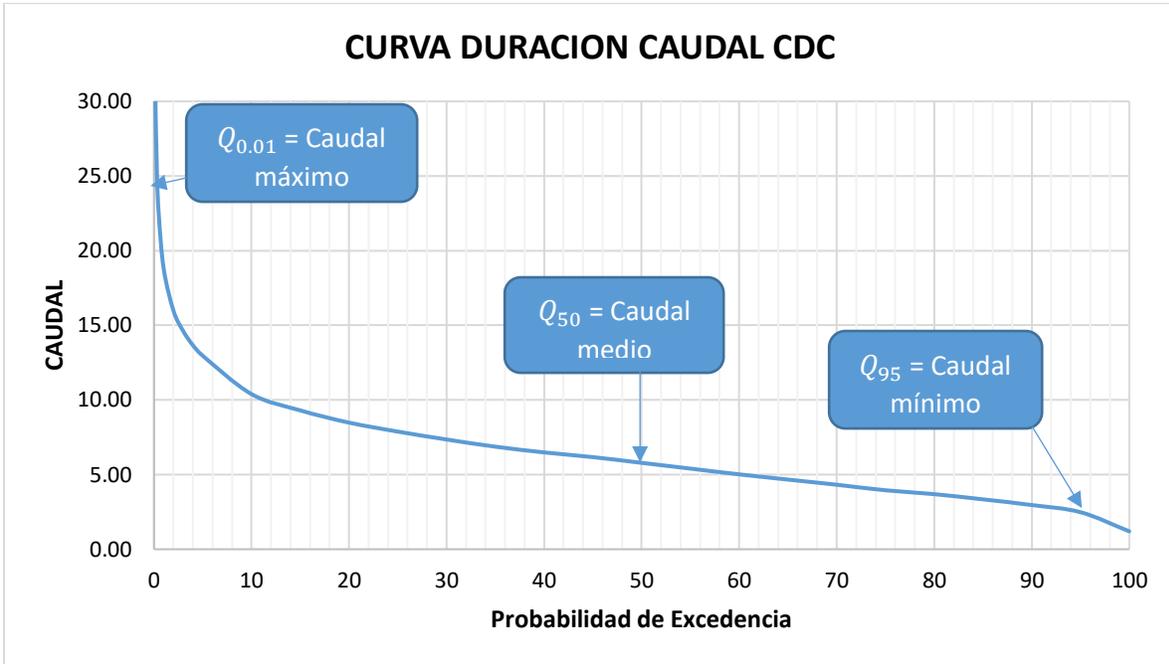


Figura 20. Caudales a utilizar en el cálculo de indicadores ubicados en la curva duración caudal

Indicador I_1 : Relación Caudal máximo diario – Caudal mínimo diario

Este indicador evalúa la variabilidad del régimen de caudales líquidos a partir de los datos extremos de las series diarias (mínimos y máximos) de cada subcuenca, relacionando el caudal máximo con el caudal mínimo, como se indica en la Ec. 6. Este indicador se calculará solamente para caudales líquidos.

$$I_1 = \frac{\text{Caudal máximo diario}}{\text{Caudal mínimo diario}} = \frac{Qd_{0.01}}{Qd_{95}} \quad \text{Ec. 6}$$

Indicador I_2 : Relación Caudal máximo diario – Caudal medio diario

Similar al indicador anterior, mediante éste evalúa la variabilidad del régimen de caudales líquidos y sólidos a partir de los datos máximos y medios de las subcuencas de estudio, relacionando el caudal máximo registrado en función del caudal medio, como se indica en la Ec. 7.

$$I_2 = \frac{\text{Caudal máximo diario}}{\text{Caudal medio diario}} = \frac{Qd_{0.01}}{Qd_{50}} \quad \text{Ec. 7}$$

Indicador I_3 : Relación Caudal máximo horario – Caudal medio horario

Mediante este indicador se evalúa la variabilidad del régimen intradiario de caudales relacionando los caudales máximos con los caudales medios tanto para caudal líquido como caudal sólido. Los caudales medios y máximos horarios líquidos se calculan a partir de la metodología de Cataño, indicada en el ítem anterior.

$$I_3 = \frac{\text{Caudal máximo horario}}{\text{Caudal medio horario}} = \frac{Qh_{0.01}}{Qh_{50}} \quad \text{Ec. 8}$$

Para la obtención del caudal sólido en régimen intradiario, se propone estimarlo a partir de la proporción entre el caudal sólido y el líquido correspondientes a la probabilidad de excedencia del 0.01 % y la probabilidad de excedencia del 50% de la curva de duración en régimen diarios, como se define a continuación:

$$\text{Factor}_{0.01} QL/QS = \frac{\text{Caudal sólido máximo diario}}{\text{Caudal líquido máximo diario}} = \frac{QS_{d\ 0.01}}{QL_{d\ 0.01}} \quad \text{Ec. 9}$$

$$\text{Factor}_{50} QL/QS = \frac{\text{Caudal sólido máximo diario}}{\text{Caudal líquido máximo diario}} = \frac{QS_{d50}}{QL_{d50}} \quad \text{Ec. 10}$$

Se multiplica este factor por el caudal líquido correspondiente a la probabilidad de excedencia del 0.01 % y 50 % de la curva de duración intradiaria (obtenida según la metodología del ítem 4.4.1) para estimar el caudal sólido correspondiente a las probabilidades de excedencia mencionadas, con el cual se podrá obtener el indicador I_3 para caudal sólido.

Indicador I_4 : Relación Caudal máximo horario – Caudal máximo diario

Este indicador relaciona los caudales máximos instantáneos estimados con los caudales máximos diarios de las series históricas de cada subcuenca, es decir es un indicador que refleja el porcentaje de submedición de eventos máximos al pasar de una curva de duración de caudales diarios a una curva de duración de caudales intradiarios.

$$I_4 = \frac{\text{Caudal máximo horario}}{\text{Caudal máximo diario}} = \frac{Qh_{0.01}}{Qd_{0.01}} \quad \text{Ec. 11}$$

Para cada tipo de indicador se construye una gráfica de probabilidad de excedencia y en ella se representa cada estación de medición con su indicador con lo que se evaluó su tendencia y de esa manera se determinó un punto de referencia.

Después de obtener los indicadores planteados, se propone que una cuenca torrencial sea aquella que cumple como mínimo la condición en donde se cumplen un indicador para caudal líquido y la vez un indicador de caudal sólido por encima del umbral propuesto, basado en el comportamiento de los indicadores propuestos dentro de una gráfica de probabilidad de excedencia que definirán los límites de torrencialidad correspondientes a cada indicador.

4.5 Análisis de Componentes Principales (ACP)

El análisis de componentes principales (ACP) consiste en una técnica estadística multivariable en la cual se analiza una matriz de datos en la que las variables se describen mediante varias variables dependientes cuantitativas interrelacionadas (Abdi & Williams, 2010). Este método estadístico ha sido usado ampliamente en economía, demografía y análisis matemático (Meng, Shi, Wang, & Wu, 2020), y también ampliamente aplicado en hidrología cuando se trabajan matrices con gran cantidad de datos, con el propósito de determinar o identificar variables geomorfológicas que tienen influencia significativa en el comportamiento de una cuenca hidrográfica, e interrelaciones entre estas variables (Sharma, Gajbhiye, & Tignath, 2014); por lo que se considera una gran herramienta estadística multivariable para el desarrollo del presente estudio.

Los objetivos principales del ACP corresponden a (Abdi & Williams, 2010):

- Extraer la información más relevante de la matriz de datos analizada.
- Comprimir el tamaño del conjunto de datos manteniendo únicamente esta información relevante (Reducción de dimensionalidad).
- Simplificar la descripción de los datos
- Analizar estructura de las observaciones y variables.
- Mostrar la información relevante como un conjunto de nuevas variables ortogonales llamadas componentes principales.
- Evidenciar patrones de similitud entre observaciones y variables mediante mapas.

El ACP se basa en el cálculo de nuevas variables, denominadas componentes principales que son obtenidas a partir de combinaciones lineales de las variables originales y extrayendo de ellas la mayor cantidad de información relevante de una matriz de datos. La primera componente contendrá la mayor varianza posible la cual explicará o extraerá la mayor parte de la información contenida en la matriz. El segundo componente se obtiene bajo la condición de que debe ser ortogonal al primer componente y tener la mayor información contenida posible. Los valores correspondientes a estas nuevas variables o componentes se pueden interpretar de forma geométrica como las proyecciones de las observaciones sobre las componentes principales representadas en un plano principal.

Mediante esta técnica se buscará encontrar que parámetros geomorfológicos representan mejor el comportamiento torrencial en las cuencas hidrográficas de estudio. Este método será implementado en el software R Statistics.

En la aplicación del Análisis de Componentes Principales (ACP) en el presente estudio se realizará el análisis de resultados tanto por individuos (estaciones o cuencas) y por variables (indicadores de torrencialidad y parámetros geomorfológicos).

En el primer análisis que corresponde al análisis por individuos se construye el plano principal el cual presenta como ejes ortogonales las dos primeras componentes principales que representan la mayor la varianza contenida en la matriz de datos y en las cuales se ubican o representan las estaciones de monitoreo (individuos) como una nube de puntos; esto se hace con el propósito de identificar si hay conformación de grupos de cuencas que se encuentren representadas por alguna característica especial.

En la Figura 21 se muestra una representación de la construcción del plano principal que consiste en una rotación de ejes donde la nube de puntos pasa de estar representado en coordenadas de los ejes ortogonales F1 y F2 (Figura 21a) a representarse en los ejes también ortogonales Y1 y Y2 que corresponden a las componentes principales (Figura 21b). El eje Y1 será la primera componente principal y se obtiene de realizar la regresión lineal a la nube de puntos original y es la componente que tendrá la mayor varianza contenida. El eje Y2 es el correspondiente eje ortogonal de Y1 y será la segunda componente principal.

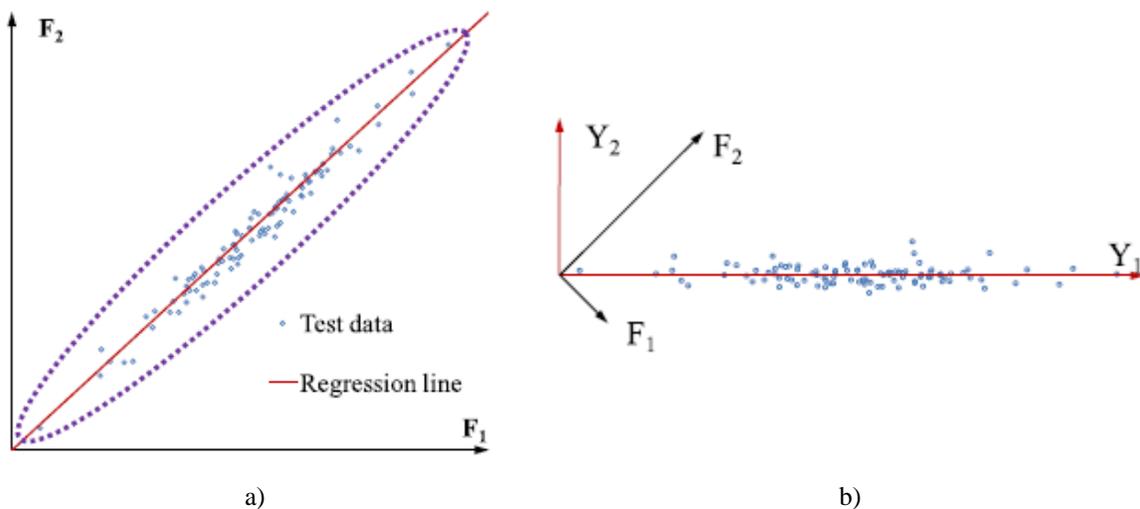


Figura 21. Interpretación geométrica de la construcción del plano principal en el ACP. Fuente: Meng et al. (2020)

Para el segundo análisis que corresponde al análisis por variables se construye el círculo de correlaciones, en el cual se presenta de forma similar al anterior análisis como ejes ortogonales las dos primeras componentes principales que representan la mayor varianza contenida en la matriz de datos. En la Figura 22 se muestra diferentes representaciones de las variables en el círculo de correlaciones y se interpreta de la siguiente manera: a) Dos vectores con ángulos similares o iguales de orientación indican 2 variables estrechamente correlacionadas, b) Dos vectores con direcciones opuestas indican 2 variables inversamente correlacionadas y c) Dos vectores que forman un ángulo recto indican 2 variables que no presentan algún tipo de correlación.

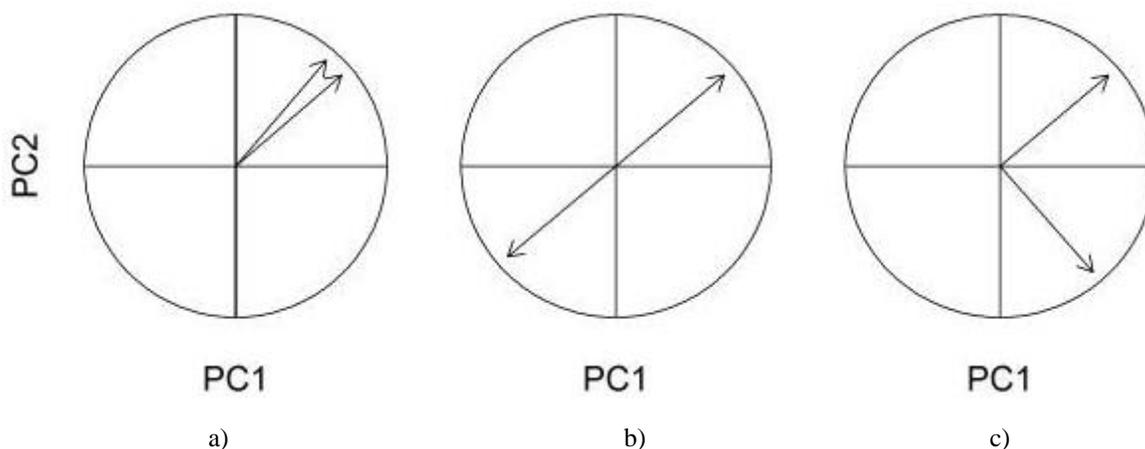


Figura 22. Representación de variables en el círculo de correlaciones. Adaptado de: Buehler, Versteegh, Matson, & Tieleman (2011)

En el círculo de correlaciones se encuentran representadas las variables (indicadores de torrencialidad y parámetros geomorfológicos) y su ubicación en el círculo depende de que tan bien

representada se encuentre una variable en las componentes principales, es decir que entre más cerca se encuentre una variable de la circunferencia o su vector posea una mayor longitud dentro del gráfico significa que esta variable está mejor representada por las componentes en el ACP.

En cada una de estas componentes principales es importante evaluar parámetros que indiquen como estas representan la información contenida en los datos de la matriz original; para la aplicación del ACP en el presente trabajo se obtendrán los siguientes:

Contribución de una observación a una componente (ctr)

A partir de la contribución se puede evaluar el porcentaje de información que está aportando una observación a la componente principal, la cual está denotada por la ecuación (Abdi & Williams, 2010):

$$ctr_{i,l} = \frac{f_{i,l}^2}{\sum_i f_{i,l}^2} \quad Ec. 12$$

Donde $f_{i,l}$ corresponde al valor de la componente l para la observación i ; la suma de todas las contribuciones de una misma componente debe ser igual al 100 %.

Coseno cuadrado de una componente con una observación (\cos^2)

Este parámetro representa la importancia de una componente para una observación dada, corresponde al cuadrado del coseno del ángulo del triángulo rectángulo formado con el origen. La observación y su proyección sobre la componente principal se obtienen a partir de la ecuación (Abdi & Williams, 2010):

$$\cos_{i,l}^2 = \frac{f_{i,l}^2}{\sum_i f_{i,l}^2} \quad Ec. 13$$

Los componentes con un alto valor de este parámetro para determinada observación indican que en esta componente está contenida una cantidad importante de información de esa observación.

5 Resultados

5.1 Análisis exploratorio y estadístico de series temporales

Inicialmente se evaluó la cantidad de información disponible recopilada en las estaciones analizadas como se observa en la **Tabla 4** y **Tabla 5** dentro de cada subzona.

Para caudal líquido se observa en general una adecuada cantidad de información para llevar a cabo el estudio, pues 20 de las 22 estaciones presentan un porcentaje de datos faltantes menor al 15 %, las otras dos estaciones no superan el 37 %.

Tabla 4. Datos disponibles de caudal líquido para cada una de las estaciones analizadas

| Subzona | Estación | Periodo registro | Total datos (N) | Datos Faltantes | % Datos faltantes |
|-------------------|----------|-------------------------|-----------------|-----------------|-------------------|
| Fonce | 24027060 | 1984-01-01 - 2010-12-31 | 9862 | 36 | 0.4 |
| | 24027040 | 1984-01-01 - 2010-12-31 | 9862 | 46 | 0.5 |
| | 24027030 | 1984-01-01 - 2010-12-31 | 9862 | 145 | 1.5 |
| | 24027050 | 1984-01-01 - 2010-12-31 | 9862 | 291 | 3.0 |
| | 24027070 | 1984-01-01 - 2010-12-31 | 9862 | 305 | 3.1 |
| Chicamocha | 24037030 | 1981-03-25 - 2012-03-24 | 11323 | 427 | 3.8 |
| | 24037040 | 1981-03-25 - 2010-11-10 | 10823 | 742 | 6.9 |
| | 24037130 | 1981-03-25 - 2012-03-24 | 11323 | 1250 | 11.0 |
| Nare | 23087150 | 1983-01-01 - 2013-12-31 | 11323 | 93 | 0.8 |
| | 23087180 | 1983-01-01 - 2011-12-29 | 10590 | 181 | 1.7 |
| | 23087190 | 1983-01-01 - 2013-12-31 | 11323 | 1289 | 11.4 |
| | 23087160 | 1983-01-01 - 2013-12-31 | 11323 | 1303 | 11.5 |
| Yaguará | 21087070 | 1983-07-01 - 2013-12-31 | 11142 | 33 | 0.3 |
| | 21087080 | 1983-07-01 - 2013-12-31 | 11142 | 172 | 1.5 |
| | 21087050 | 1983-07-01 - 2013-12-31 | 11142 | 1653 | 14.8 |
| | 21087040 | 1983-07-01 - 2013-12-31 | 11142 | 4068 | 36.5 |
| Saldaña | 22027020 | 1973-01-01 - 2013-12-31 | 14975 | 81 | 0.5 |
| | 22017010 | 1976-01-01 - 2013-12-31 | 13880 | 210 | 1.5 |
| | 22057050 | 1980-01-01 - 2013-12-31 | 12419 | 296 | 2.4 |
| | 22027010 | 1973-01-01 - 2013-12-31 | 14975 | 478 | 3.2 |
| | 22037010 | 1982-05-01 - 2013-12-31 | 11568 | 608 | 5.3 |
| | 22067010 | 1973-01-01 - 2013-12-31 | 14975 | 4195 | 28.0 |

Para caudal sólido se observa en general una adecuada cantidad de información para llevar a cabo el estudio, pues 18 de las 22 estaciones presentan un porcentaje de datos faltantes menor al 15 %, el resto de estaciones no superan el 40 %.

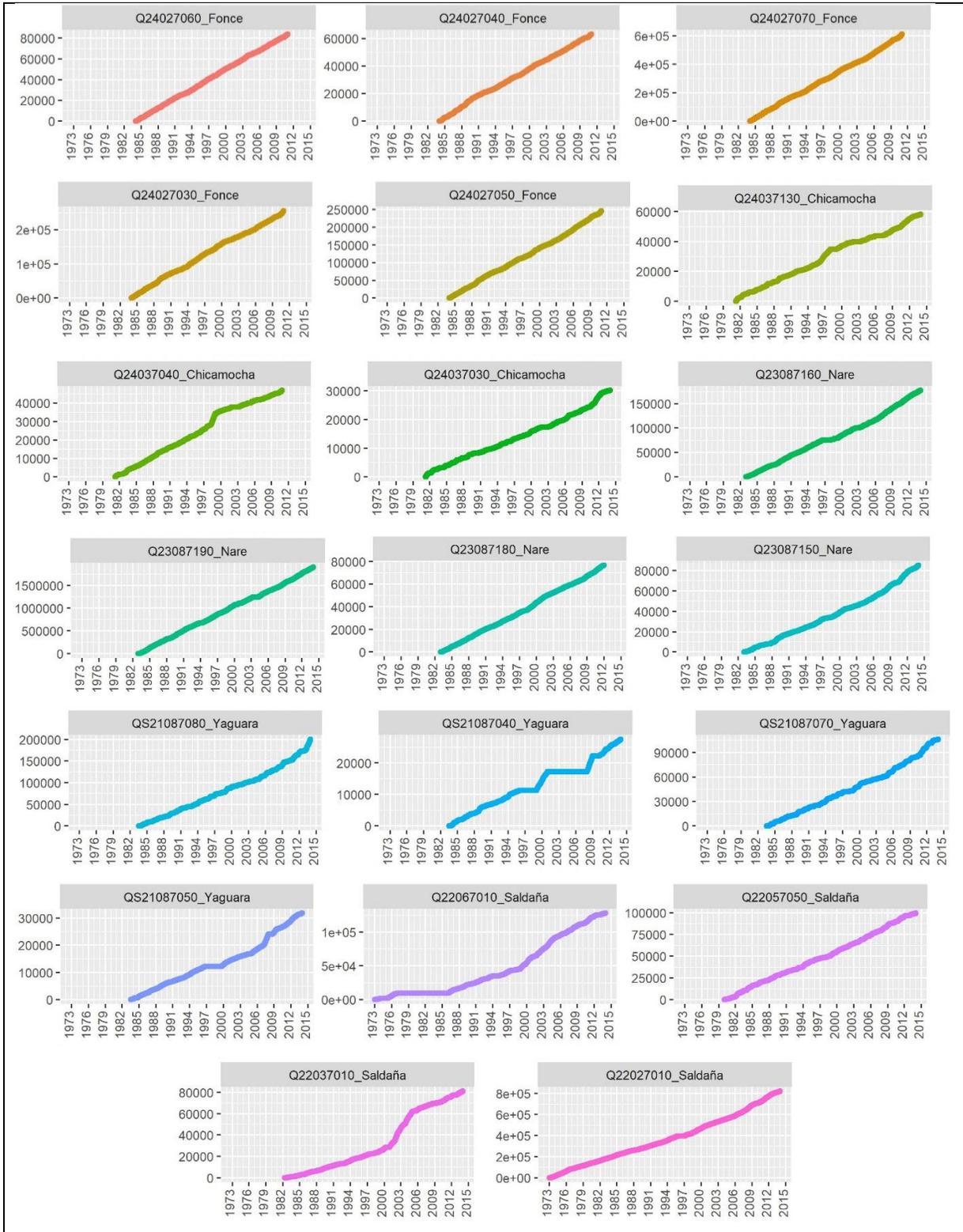
Tabla 5. Datos disponibles de caudal sólido para cada una de las estaciones analizadas

| Subzona | Estación | Periodo registro | Total datos (N) | Datos Faltantes | % Datos faltantes |
|-------------------|----------|-------------------------|-----------------|-----------------|-------------------|
| Fonce | 24027060 | 1984-01-01 - 2010-12-31 | 9862 | 0 | 0.0 |
| | 24027040 | 1984-01-01 - 2010-12-31 | 9862 | 0 | 0.0 |
| | 24027070 | 1984-01-01 - 2010-12-31 | 9862 | 0 | 0.0 |
| | 24027030 | 1984-01-01 - 2010-12-31 | 9862 | 0 | 0.0 |
| | 24027050 | 1984-01-01 - 2010-12-31 | 9862 | 0 | 0.0 |
| Chicamocha | 24037040 | 1984-01-01 - 2010-11-10 | 9811 | 989 | 10.1 |
| | 24037030 | 1984-01-01 - 2012-03-24 | 10311 | 1160 | 11.3 |
| | 24037130 | 1986-01-01 - 2012-03-24 | 9580 | 1983 | 20.7 |
| Nare | 23087150 | 1990-01-01 - 2013-12-31 | 8766 | 457 | 5.2 |
| | 23087190 | 1983-01-01 - 2013-12-31 | 11323 | 1527 | 13.5 |
| | 23087180 | 1984-01-01 - 2009-12-31 | 9497 | 2331 | 24.5 |
| | 23087160 | 1983-01-01 - 2013-12-31 | 11323 | 3433 | 30.3 |
| Yaguará | 21087070 | 1983-07-01 - 2013-12-31 | 11142 | 33 | 0.3 |
| | 21087080 | 1983-07-01 - 2013-12-31 | 11142 | 185 | 1.7 |
| | 21087050 | 1983-07-01 - 2013-12-31 | 11142 | 1409 | 12.7 |
| | 21087040 | 1983-07-01 - 2013-12-31 | 11142 | 4415 | 39.6 |
| Saldaña | 22027020 | 1980-01-01 - 2013-12-31 | 12419 | 78 | 0.6 |
| | 22027010 | 1973-01-01 - 2013-12-31 | 14975 | 110 | 0.7 |
| | 22017010 | 1980-01-01 - 2013-12-31 | 12419 | 210 | 1.7 |
| | 22057050 | 1982-01-01 - 2013-12-31 | 11688 | 296 | 2.5 |
| | 22037010 | 1981-01-01 - 2013-12-31 | 12053 | 959 | 8.0 |
| | 22067010 | 1990-01-01 - 2013-12-31 | 8766 | 791 | 9.0 |

Para evaluar el comportamiento de las series a lo largo del tiempo se construyó la gráfica de masa simple que permite detectar inconsistencias en las series, tanto para caudal líquido como para caudal sólido.

En la **Figura 23** se observa el análisis de masa simple para cada estación de monitoreo de caudal líquido. De forma general se observa un buen comportamiento de las series, pues el comportamiento de las gráficas se asemeja al comportamiento lineal a lo largo de los periodos de análisis de cada estación. En algunas estaciones como son Hidroeléctrica (21087040) en Yaguará, La esperanza (22037010) y Puente Ortega (22067010) en Saldaña se observa en sus gráficas de masa algunos

periodos significativos, en comparación al resto de estaciones, en los cuales el comportamiento se asemeja a una línea horizontal que puede corresponder a periodos donde no hubo registros de datos o periodos con datos de caudal líquido iguales a cero. No se observan puntos en las gráficas de tendencia semejante a la verticalidad que indique la presencia de algún dato extremo atípico inconsistente con la tendencia de la serie.



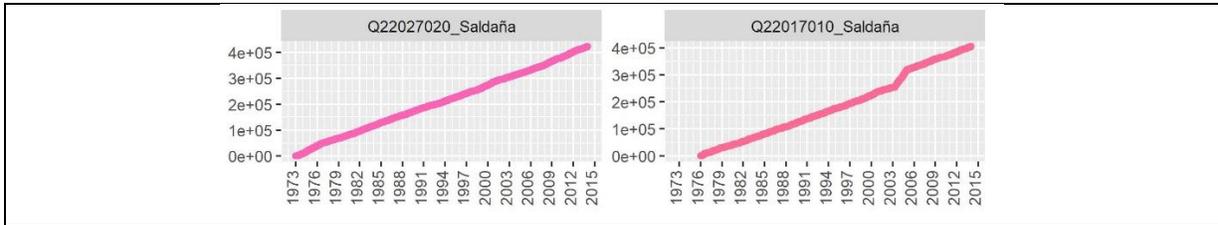
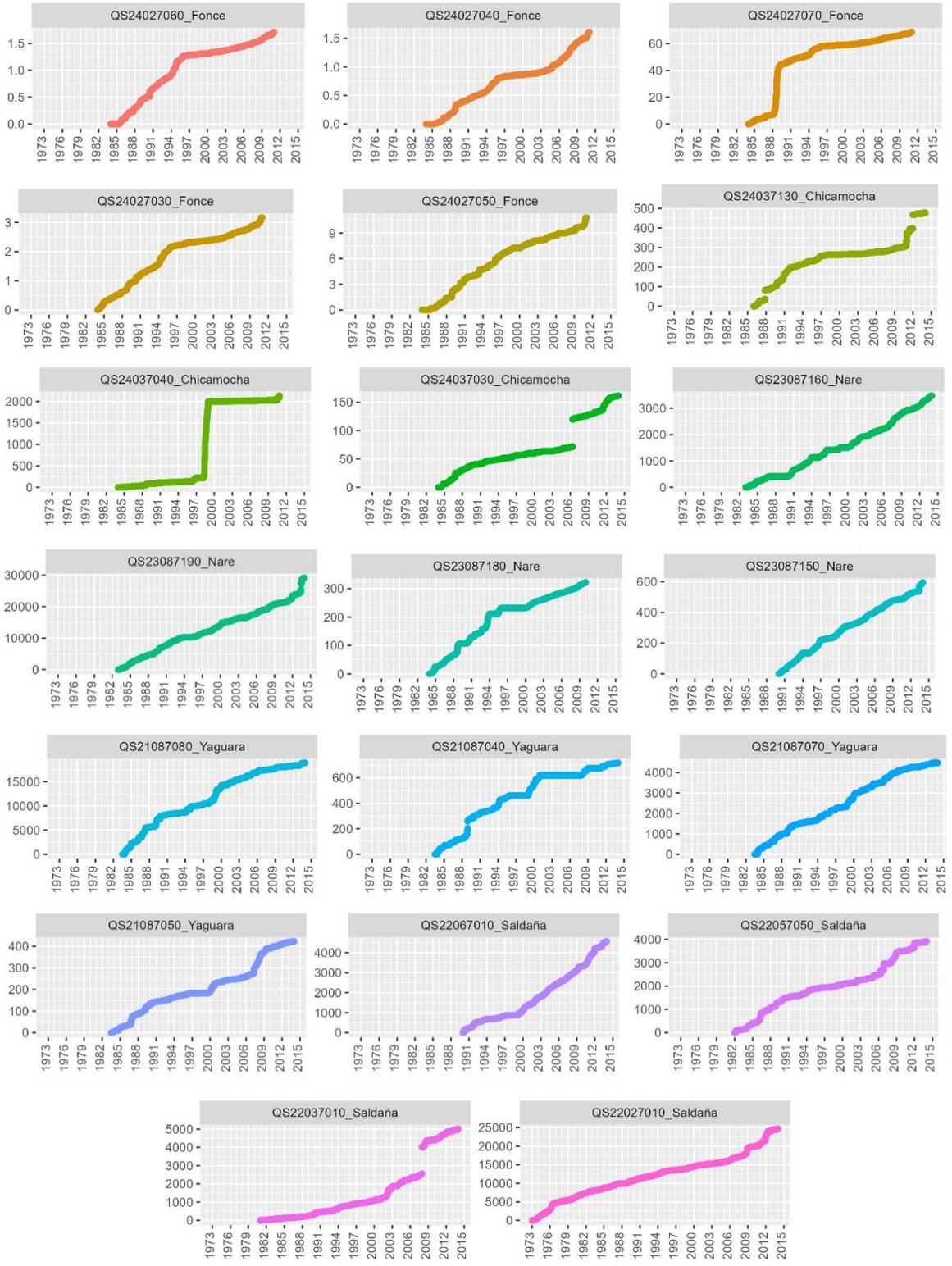


Figura 23. Gráficos de masa simple para las estaciones de monitoreo de caudal líquido

En la **Figura 24** se observa el análisis de masa simple para cada estación de monitoreo de caudal sólido. La mayoría de estaciones presentan un buen comportamiento en el gráfico de masa. Se observa en algunas estaciones incrementos abruptos en la pendiente de la gráfica en comparación al resto de estaciones como es el caso de las estaciones Mérida (24027070) en Fonce, La Reforma (24037130), Guaicán (24037040) y El palo (24037030) en Chicamocha, La esperanza (22037010) en Saldaña, pues esto corresponde a periodos en donde se ven registros de datos con un alto valor o datos atípicos que difieren mucho de la tendencia normal de la serie. Por otro lado en las estaciones Hidroeléctrica (21087040) en Yaguará y Los Sirpes (23087180) en Nare se observa en sus gráficas de masa algunos periodos significativos, en comparación al resto de estaciones, en los cuales el comportamiento se asemeja a una línea horizontal que puede corresponder a periodos donde no hubo registros de datos o periodos con datos de caudal sólido iguales a cero.

SMC Transporte Diaria



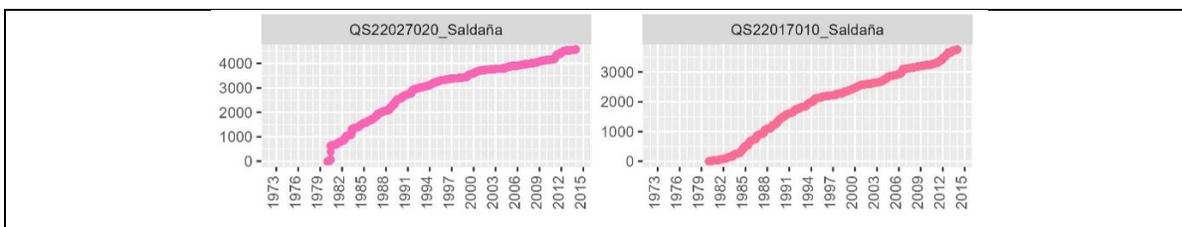


Figura 24. Gráficos de masa simple para las estaciones de monitoreo de caudal sólido

Después de evaluar la calidad de la información recopilada se procede a analizar la estadística descriptiva de las series de datos tanto en las estaciones de caudal líquido como de caudal sólido con el propósito de encontrar tendencias que permitan describir el comportamiento de las variables a lo largo del correspondiente periodo de análisis. El análisis estadístico se complementa con un análisis gráfico, lo que incluye la gráfica de series de datos, histogramas de frecuencia y diagramas de caja.

5.1.1 Caudales líquidos

Se muestra en la Tabla 6 los resultados de la estadística descriptiva correspondiente al régimen de caudal líquido para cada cuenca de estudio.

Tabla 6. Estadística descriptiva de la variable Caudal líquido (m^3/s)

| Subzona | Estación | Varianza | Desviación estándar | Coefficiente Variación | Asimetría | Curtosis | Mínimo | 1er Cuartil | Mediana | Media | 3er Cuartil | Máximo |
|------------|----------|----------|---------------------|------------------------|-----------|----------|--------|-------------|---------|--------|-------------|--------|
| Chicamocha | 24037030 | 9.82 | 3.13 | 119.74 | 3.34 | 18.54 | 0.00 | 0.84 | 1.71 | 2.62 | 2.94 | 42.10 |
| | 24037040 | 20.67 | 4.55 | 97.70 | 3.94 | 21.19 | 0.15 | 2.22 | 3.48 | 4.65 | 5.32 | 52.10 |
| | 24037130 | 27.21 | 5.22 | 94.64 | 3.22 | 18.56 | 0.26 | 2.48 | 3.72 | 5.51 | 6.78 | 66.99 |
| Fonce | 24027060 | 18.53 | 4.31 | 50.55 | 1.21 | 6.55 | 1.02 | 5.04 | 8.32 | 8.52 | 11.18 | 64.01 |
| | 24027040 | 12.65 | 3.56 | 55.42 | 2.27 | 10.91 | 1.20 | 3.95 | 5.79 | 6.42 | 7.88 | 43.94 |
| | 24027030 | 421.57 | 20.53 | 78.20 | 1.81 | 5.53 | 0.00 | 11.10 | 20.60 | 26.25 | 35.88 | 205.68 |
| | 24027050 | 276.42 | 16.63 | 64.66 | 1.88 | 5.91 | 3.99 | 13.80 | 21.08 | 25.71 | 33.4 | 158.88 |
| | 24027070 | 1787.7 | 42.28 | 66.07 | 1.74 | 5.56 | 7.20 | 33.10 | 53.8 | 64.00 | 84.1 | 499.28 |
| Nare | 23087150 | 52.33 | 7.23 | 95.40 | 3.05 | 18.21 | 0.24 | 2.80 | 5.38 | 7.58 | 9.93 | 95.89 |
| | 23087180 | 15.70 | 3.96 | 53.89 | 1.86 | 5.77 | 1.88 | 4.60 | 6.24 | 7.35 | 9.02 | 43.96 |
| | 23087190 | 6419.92 | 80.12 | 42.32 | 0.58 | 0.23 | 26.00 | 128.22 | 182 | 189.34 | 240.7 | 585.00 |
| | 23087160 | 134.03 | 11.58 | 65.37 | 2.09 | 5.78 | 4.00 | 10.30 | 14.01 | 17.71 | 21.13 | 114.30 |
| Saldaña | 22027020 | 213.09 | 14.6 | 51.53 | 1.71 | 6.22 | 5.27 | 17.93 | 25.4 | 28.33 | 35.32 | 168.00 |
| | 22017010 | 587.80 | 24.24 | 82.08 | 2.49 | 7.74 | 3.10 | 15.00 | 22.2 | 29.54 | 33.62 | 288.00 |
| | 22057050 | 82.93 | 9.11 | 110.91 | 4.82 | 48.91 | 0.42 | 3.07 | 5.43 | 8.21 | 10.12 | 183.10 |
| | 22027010 | 946.78 | 30.77 | 54.27 | 1.83 | 4.84 | 14.30 | 35.18 | 48.4 | 56.70 | 69.20 | 300.60 |
| | 22037010 | 86.19 | 9.28 | 125.58 | 3.27 | 15.34 | 0.15 | 2.28 | 4.24 | 7.39 | 8.65 | 132.10 |

| Subzona | Estación | Varianza | Desviación estándar | Coefficiente Variación | Asimetría | Curtosis | Mínimo | 1er Cuartil | Mediana | Media | 3er Cuartil | Máximo |
|---------|----------|----------|---------------------|------------------------|-----------|----------|--------|-------------|---------|-------|-------------|--------|
| | 22067010 | 197.17 | 14.04 | 118.46 | 7.33 | 132.62 | 0.54 | 4.40 | 7.93 | 11.85 | 15.06 | 458.00 |
| Yaguará | 21087070 | 241.29 | 15.53 | 162.56 | 6.54 | 101.47 | 0.10 | 2.08 | 4.32 | 9.56 | 10.25 | 465.40 |
| | 21087080 | 906.88 | 30.11 | 164.97 | 5.36 | 50.97 | 0.40 | 4.20 | 7.95 | 18.25 | 18.60 | 637.80 |
| | 21087050 | 7.03 | 2.65 | 79.14 | 3.01 | 11.18 | 0.54 | 1.89 | 2.53 | 3.35 | 3.76 | 28.60 |
| | 21087040 | 15.56 | 3.94 | 101.22 | 2.43 | 9.69 | 0.15 | 1.31 | 2.51 | 3.90 | 5.01 | 45.63 |

Los resultados mostrados en la **Tabla 6** son muy variables entre las estaciones, en ellos se representan estaciones muy caudalosas como por ejemplo Mérida (24027070) en Fonce, El Cóndor (22027010) en Saldaña y La Garrucha (23087190) en Nare los cuales presentan valores máximos del orden de 300 y 600 m³/s y su valor medio supera los 50 m³/s.

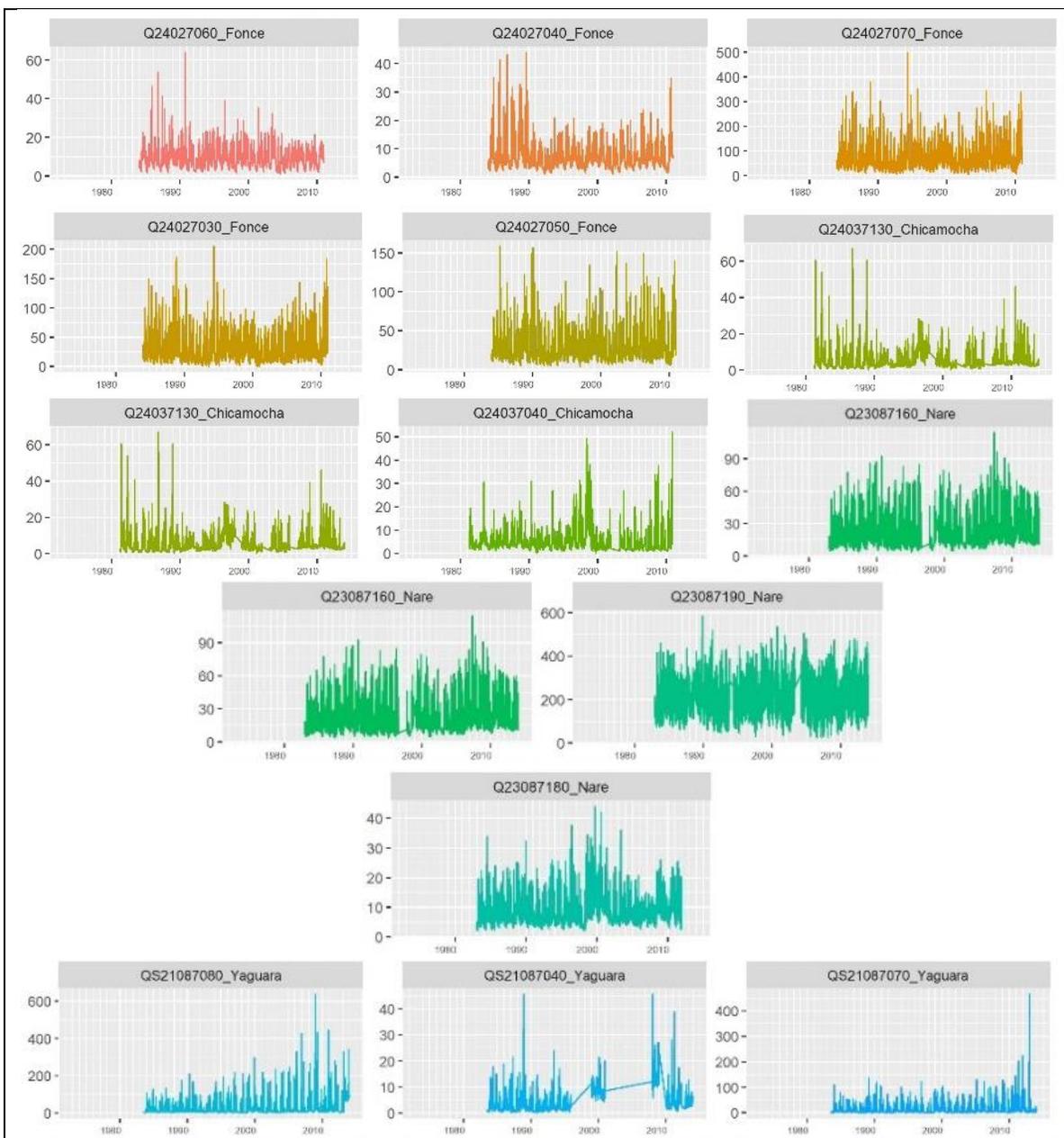
En contraste a lo mencionando anteriormente también se encuentran estaciones poco caudalosas que presentan valores máximos que no sobrepasan los 50 m³/s y su media no excede los 5 m³/s como lo son las estaciones El Palo (24037030) en Chicamocha y Bocatoma (21087050) e Hidroeléctrica (21087040) en Yaguará.

En lo correspondiente a la dispersión de los datos se observa en general altos coeficientes de variación en las estaciones de estudio cuyos valores varían entre 40 y 165, hay 7 estaciones que superan el valor de 100 para este coeficiente de las cuales 6 se encuentran en las subzonas de Saldaña y Yaguará. Las que presentan los valores más altos las estaciones Hacienda El Jardín (21087070) y Hacienda Venecia (21087080) en Yaguará y La esperanza (22037010) en Saldaña. Valores más altos de este coeficiente indican que los datos están alejados con respecto a su valor medio indicando que estas cuencas son más susceptibles a presentar cambios abruptos en su régimen normal de caudal y presentar eventos extremos con mayor frecuencia.

Los valores del coeficiente de asimetría varían entre 0.5 y 7.4, lo que indica que las series de todas las estaciones presentan datos más alejados hacia la derecha de la media (por encima) que hacia la izquierda (por debajo), es decir su mediana es siempre menor a la media y cuanto más grande es su valor, los valores máximos se encuentran más alejados del valor medio. Los mayores valores obtenidos para este coeficiente se observan en la estación Puente Ortega (22067010) en Saldaña y Hacienda El Jardín (21087070) en Yaguará con valores de 7.33 y 6.54 respectivamente.

En la **Figura 25** se presentan los gráficos correspondientes a las series históricas de caudal líquido reportado en cada estación; en los cuales se evidencian con mayor claridad los resultados de la

estadística descriptiva obtenidos en la **Tabla 6**, especialmente la dispersión de los datos. Se observa que en las estaciones Hacienda El Jardín (21087070) y Hacienda Venecia (21087080) en Yaguará y La esperanza (22037010) en Saldaña sus máximos están más alejados de la media en comparación al resto de estaciones, lo que indica mayores variabilidades o susceptibilidad a cambios bruscos en su régimen hidrológico.



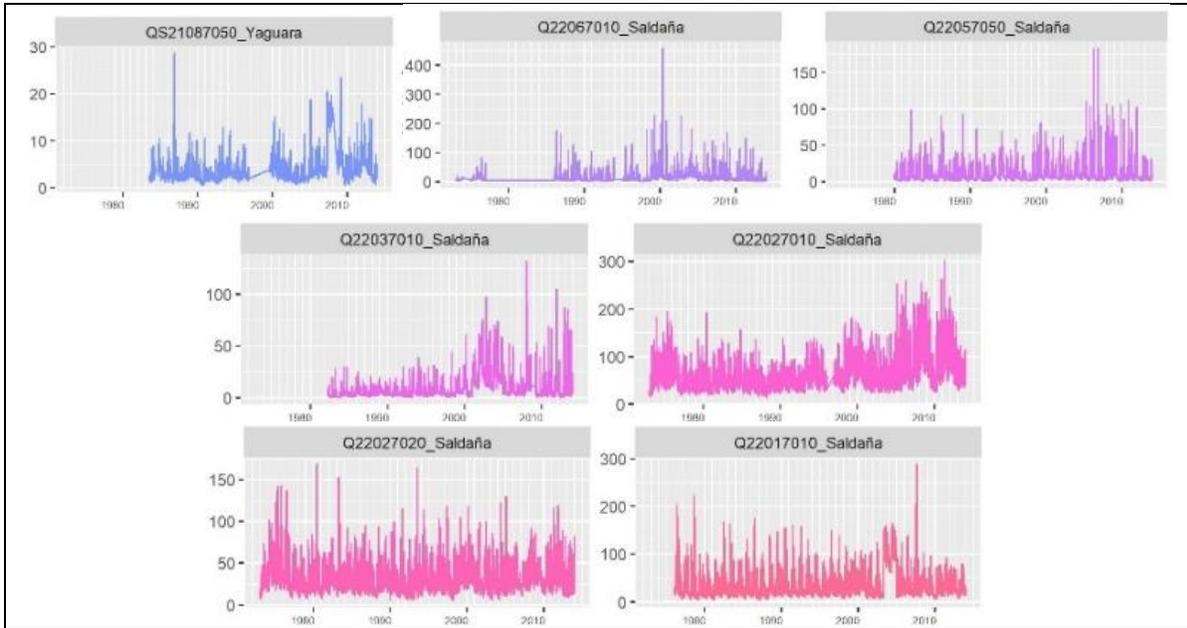


Figura 25. Series temporales de Caudal Líquido [m³/s]. Fuente: Elaboración propia

En la **Figura 26** se muestran los diagramas de caja que representan las estadísticas por cuartiles de los caudales líquidos. Allí se puede observar que las estaciones Hacienda El Jardín (21087070) y Hacienda Venecia (21087080) en Yaguará, y La esperanza (22037010) en Saldaña son las que presentan los valores extremos más alejados de su rango intercuartil, es decir se debe analizar la posibilidad de que estos puedan corresponder a valores anómalos dentro de la serie. Similar comportamiento a estas estaciones se puede apreciar en la estación Guaicán (24037040) en Chicamocha, ya que esta presenta valores extremos muy alejados de su rango intercuartil.

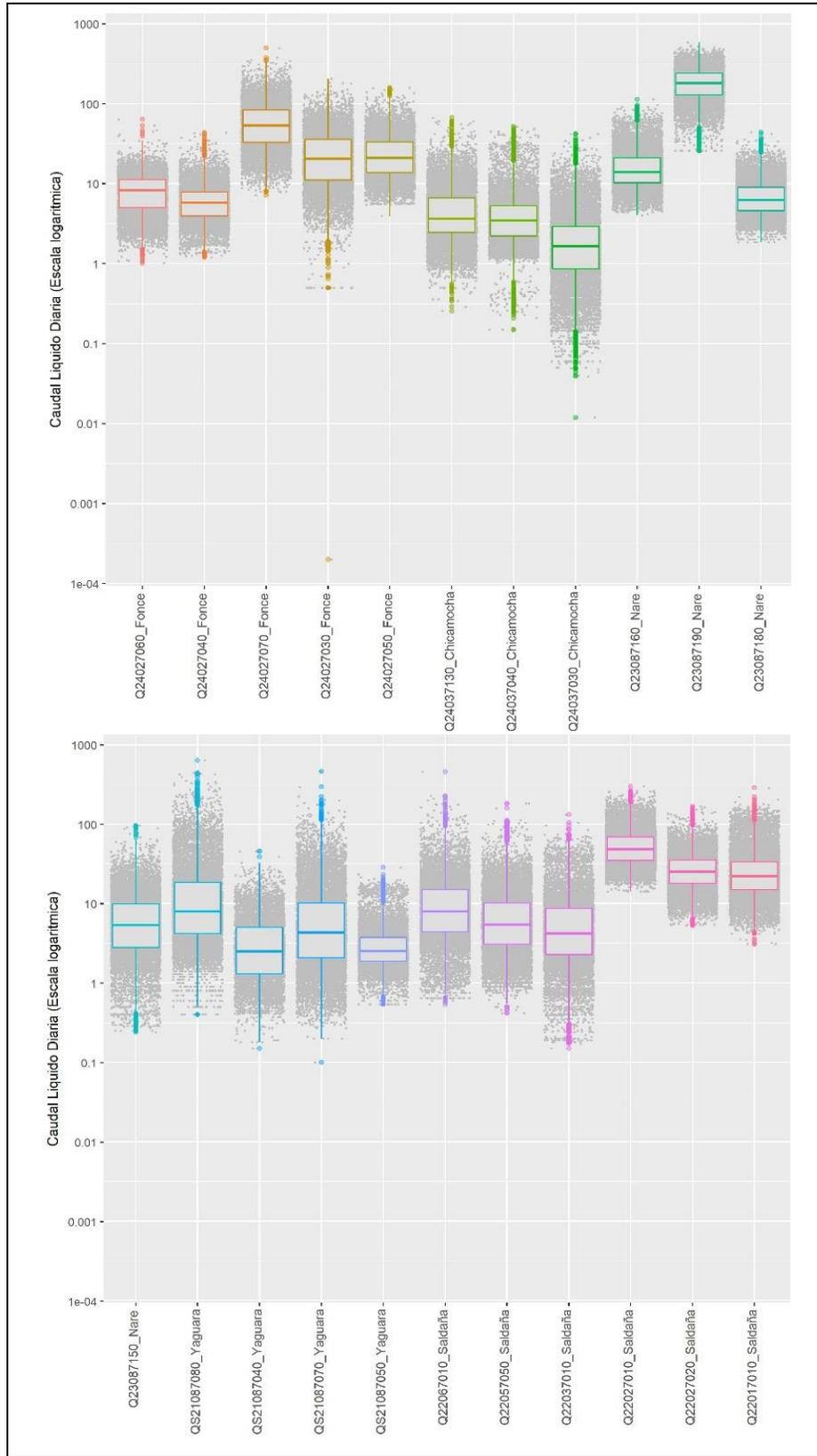
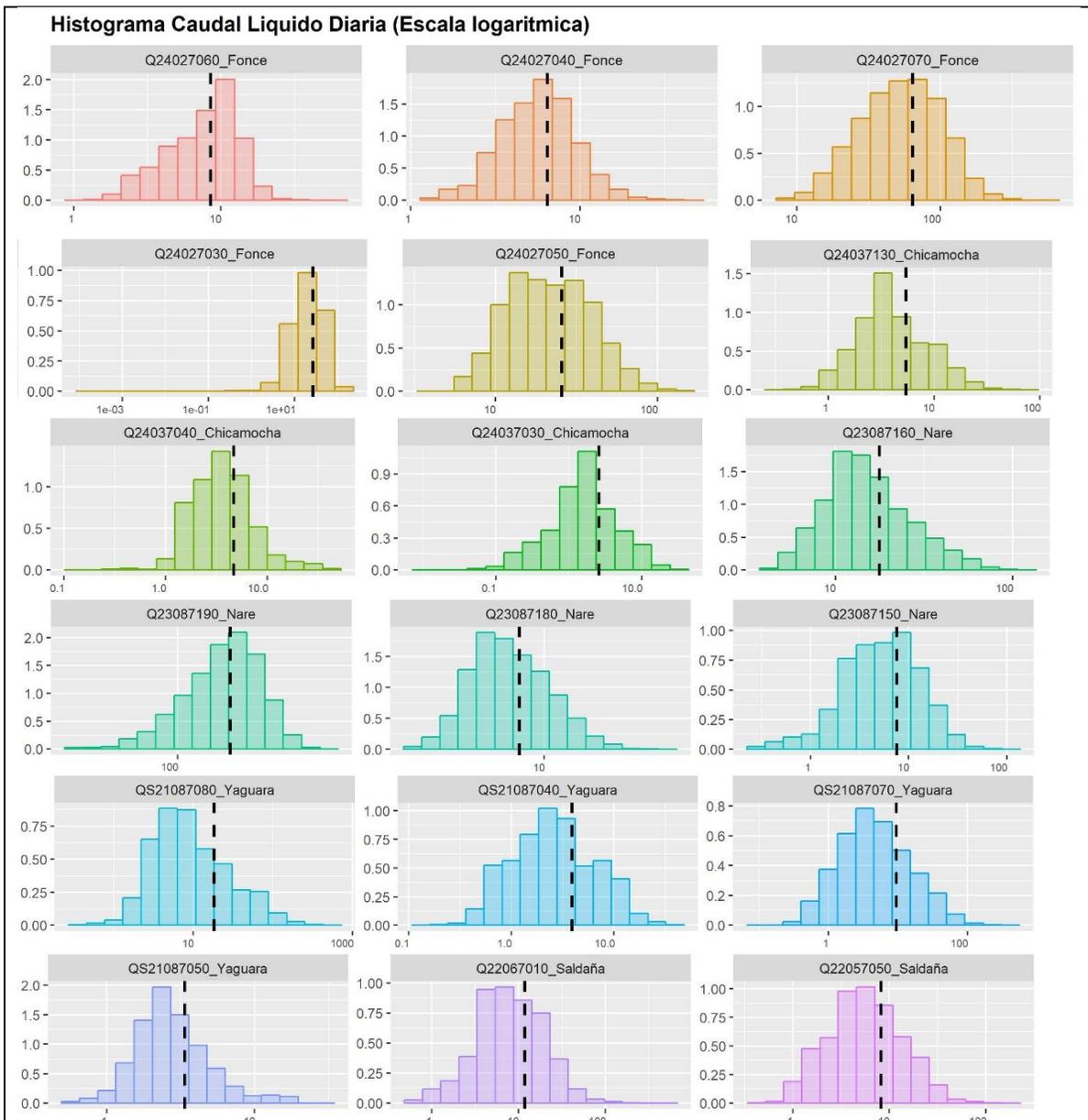


Figura 26. Boxplot correspondiente a Caudal líquido en todas las estaciones en escala logarítmica. Fuente: Elaboración propia

En la **Figura 27** se encuentran los histogramas de caudal líquido obtenidas para cada una de las estaciones de monitoreo en las cuales se puede observar de manera más clara la distribución de los datos en las series correspondientes. En esta figura se observa mejor el significado del coeficiente de asimetría, se observa que las estaciones Los Sirpes (23087180) en Nare y Hacienda Venecia (21087080) en Yaguara presentan máximos de caudal líquido mucho más alejados de su tendencia central que el resto de estaciones, indicando que estas estaciones presentan mayor susceptibilidad a los cambios abruptos en sus series.



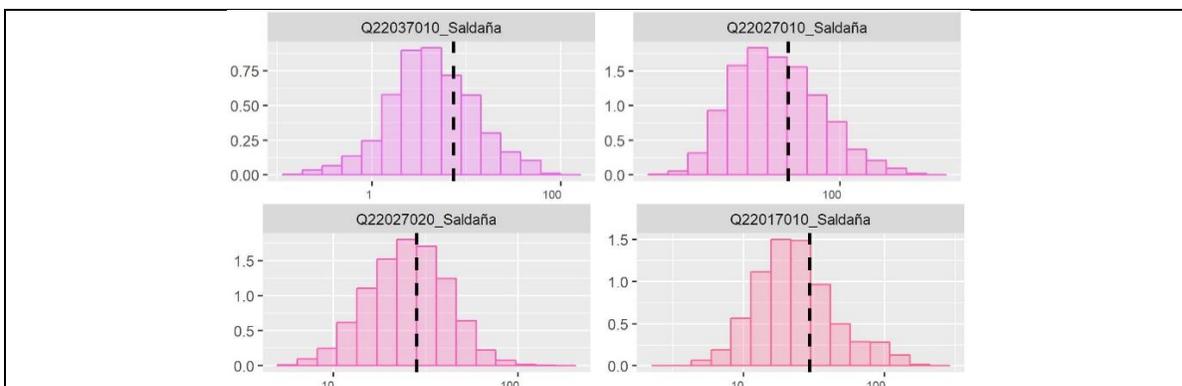


Figura 27. Histogramas de frecuencia correspondientes a caudal líquido en todas las estaciones. Fuente: Elaboración propia

5.1.2 Caudales sólidos

Se muestra en la **Tabla 7** los resultados de la estadística descriptiva correspondiente al régimen de caudal sólido para cada cuenca de estudio.

Tabla 7. Estadística descriptiva correspondiente a la variable Caudal Sólido (kg/s)

| Subzona | Estación | Varianza | Desviación estándar | Coficiente Variación | Asimetría | Curtosis | Mínimo | 1er Cuartil | Mediana | Media | 3er Cuartil | Máximo |
|------------|----------|----------|---------------------|----------------------|-----------|----------|--------|-------------|---------|-------|-------------|---------|
| Chicamocha | 24037040 | 3.88 | 1.97 | 816.01 | 15.06 | 286.93 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.24 | 0.02 | 54.06 |
| | 24037030 | 0.25 | 0.50 | 3025.27 | 94.47 | 8998.88 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.01 | 48.10 |
| | 24037130 | 1.14 | 1.07 | 1738.15 | 50.55 | 2912.06 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.06 | 0.03 | 70.10 |
| Fonce | 24027060 | 0.00 | 0.00 | 428.72 | 24.01 | 781.56 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.03 |
| | 24027040 | 0.00 | 0.00 | 243.53 | 9.89 | 159.78 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 |
| | 24027070 | 0.00 | 0.05 | 673.69 | 19.51 | 475.45 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 1.60 |
| | 24027030 | 0.00 | 0.00 | 323.87 | 16.28 | 411.22 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.04 |
| | 24027050 | 0.00 | 0.01 | 462.26 | 25.62 | 1115.53 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.28 |
| Nare | 23087150 | 0.09 | 0.30 | 415.53 | 39.38 | 1983.81 | 0.00 | 0.02 | 0.03 | 0.07 | 0.07 | 16.91 |
| | 23087190 | 610.01 | 24.70 | 830.44 | 56.58 | 3985.78 | 0.00 | 0.41 | 0.98 | 2.97 | 2.28 | 1926.00 |
| | 23087180 | 0.02 | 0.14 | 315.51 | 10.81 | 152.66 | 0.00 | 0.01 | 0.02 | 0.04 | 0.03 | 2.87 |
| | 23087160 | 1.12 | 1.06 | 240.74 | 7.04 | 74.46 | 0.00 | 0.05 | 0.13 | 0.44 | 0.34 | 17.97 |
| Saldaña | 22027020 | 14.75 | 3.84 | 1037.16 | 63.36 | 4538.85 | 0.00 | 0.04 | 0.10 | 0.37 | 0.24 | 309.30 |
| | 22027010 | 28.78 | 5.37 | 323.33 | 10.12 | 142.67 | 0.00 | 0.14 | 0.38 | 1.66 | 1.16 | 124.80 |
| | 22017010 | 0.90 | 0.95 | 307.81 | 14.37 | 324.50 | 0.00 | 0.04 | 0.10 | 0.31 | 0.25 | 34.29 |
| | 22057050 | 8.11 | 2.85 | 829.38 | 40.36 | 2231.04 | 0.00 | 0.01 | 0.03 | 0.34 | 0.14 | 188.10 |
| | 22037010 | 195.84 | 13.99 | 3095.06 | 103.55 | 10845.73 | 0.00 | 0.02 | 0.06 | 0.45 | 0.22 | 1466.00 |
| | 22067010 | 3.58 | 1.89 | 331.08 | 12.09 | 247.74 | 0.00 | 0.04 | 0.13 | 0.57 | 0.38 | 63.23 |
| Yaguará | 21087070 | 4.67 | 2.16 | 536.09 | 12.69 | 219.48 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.40 | 0.08 | 56.53 |
| | 21087080 | 130.01 | 11.40 | 660.68 | 20.06 | 691.75 | 0.00 | 0.01 | 0.04 | 1.73 | 0.22 | 569.60 |

| Subzona | Estación | Varianza | Desviación estándar | Coefficiente Variación | Asimetría | Curtosis | Mínimo | 1er Cuartil | Mediana | Media | 3er Cuartil | Máximo |
|---------|----------|----------|---------------------|------------------------|-----------|----------|--------|-------------|---------|-------|-------------|--------|
| | 21087050 | 0.07 | 0.27 | 627.70 | 25.53 | 884.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.04 | 0.02 | 13.10 |
| | 21087040 | 0.75 | 0.87 | 813.23 | 40.73 | 2273.75 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.11 | 0.04 | 53.74 |

Los resultados consignados en la **Tabla 7** muestran que el transporte de sólidos es muy variable entre las estaciones. Se pueden observar estaciones que registran valores de transporte de sedimentos muy altos en las estaciones La Garrucha (23087190) en Nare, La esperanza (22037010) en Saldaña cuyos valores máximos superan los 1000 kg/s con un valor medio de 2.97 kg/s y 0.45 kg/s; estos valores son bastante altos y están muy alejados de su comportamiento medio lo que podría corresponder a datos erróneos registrados; también se encuentra un valor máximo alto en la estación Hacienda Venecia (21087080) en Yaguará de 569.60 kg/s. En contraste, se observan estaciones que registran valores pequeños de transporte de sedimentos como por ejemplo las estaciones que corresponden a la subzona de Fonce ya que sus valores máximos no superan los 2 kg/s y su valor medio es muy pequeño, casi cero; lo que indica que las cuencas que componen esta subzona no se caracterizan por ser transportadoras de altas cantidades de sedimento.

Evaluando la dispersión de los datos dentro de las series, se observan altos valores del coeficiente de variación que varían entre 240 y 3030; se tienen 11 estaciones que superan el valor de 500 y de éstas 4 superan el valor de 1000 correspondientes a las estaciones El Palo (24037030) y La Reforma (24037130) en Chicamocha (valores de 3025.27 y 1738.15 respectivamente), y Gaitania (22027020) y La esperanza (22037010) en Saldaña (valores de 1037.16 y 3095.06). Lo mencionado anteriormente indica que, al tener mayores valores del coeficiente de variación, esta variable es más susceptible a presentar cambios abruptos.

El coeficiente de asimetría en todas las estaciones varía entre 7 y 105, lo cual indica que la distribución de las series presenta datos más alejados hacia la derecha de la media (por encima) que hacia la izquierda (por debajo), es decir su mediana es siempre menor a la media y cuanto más grande sea su valor, los valores máximos se encuentran más alejados del valor medio. Las estaciones con los mayores valores para este coeficiente se encuentran ubicadas en la subzona de Chicamocha y Saldaña, que corresponden a la estación El Palo (24037030) en la primera subzona y La esperanza (22037010) en la segunda con valores de 94.47 y 103.55 respectivamente.

En la **Figura 28** se presentan las series históricas de caudal sólido de cada estación; en los cuales se evidencian con mayor claridad los resultados de la estadística descriptiva obtenidos en la **Tabla 7**, en especial la dispersión de los datos, pues se observan series más dispersas con respecto al caudal sólido con picos que sobresalen más del comportamiento medio de la variable en cada serie. En esta figura se observa que las estaciones El Palo (24037030) en Chicamocha y La esperanza (22037010) en Saldaña presentan los picos más pronunciados de transporte de sedimentos, por lo que corresponden a las estaciones con los valores más altos del coeficiente de variación y el coeficiente de asimetría.

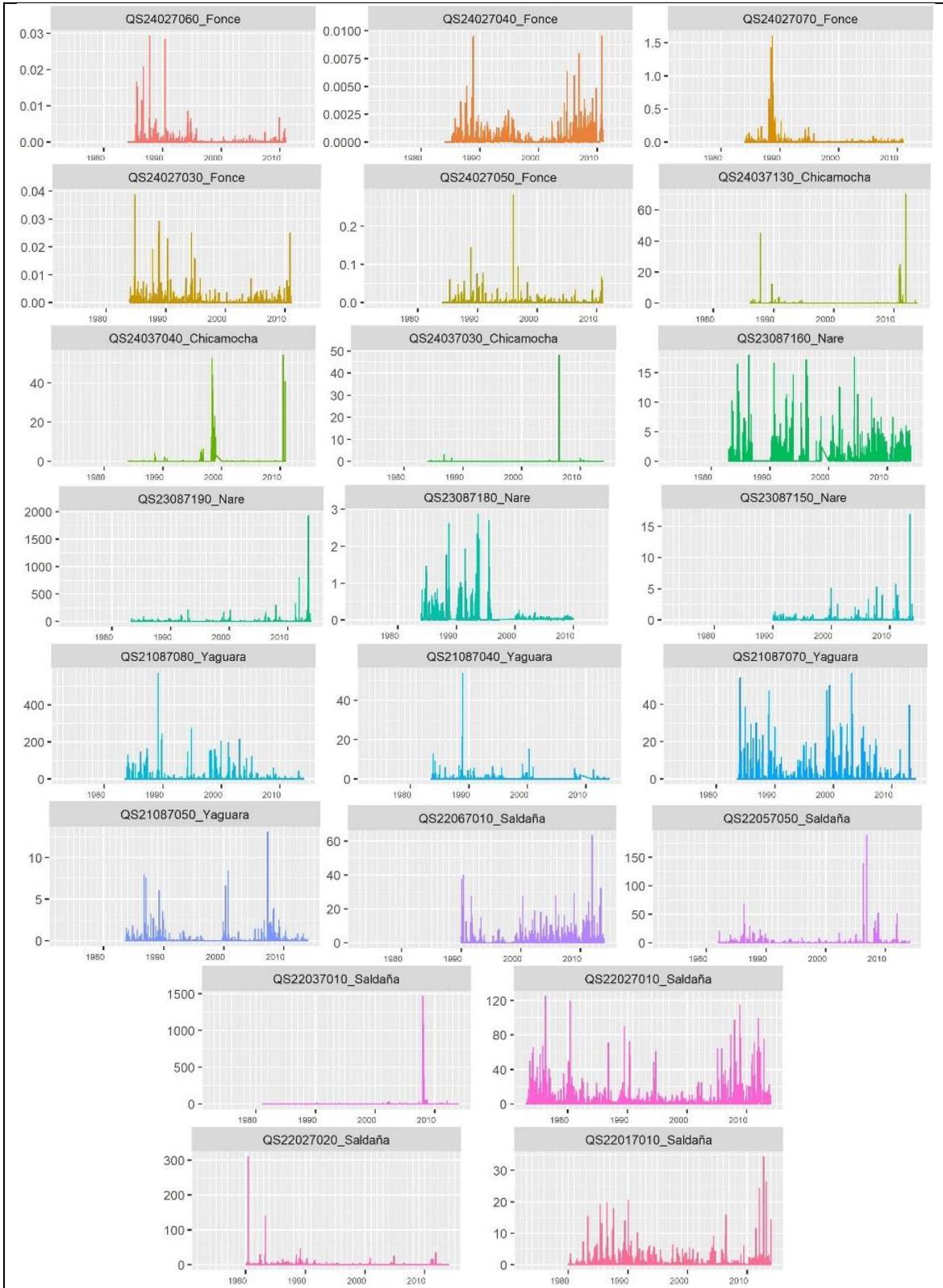
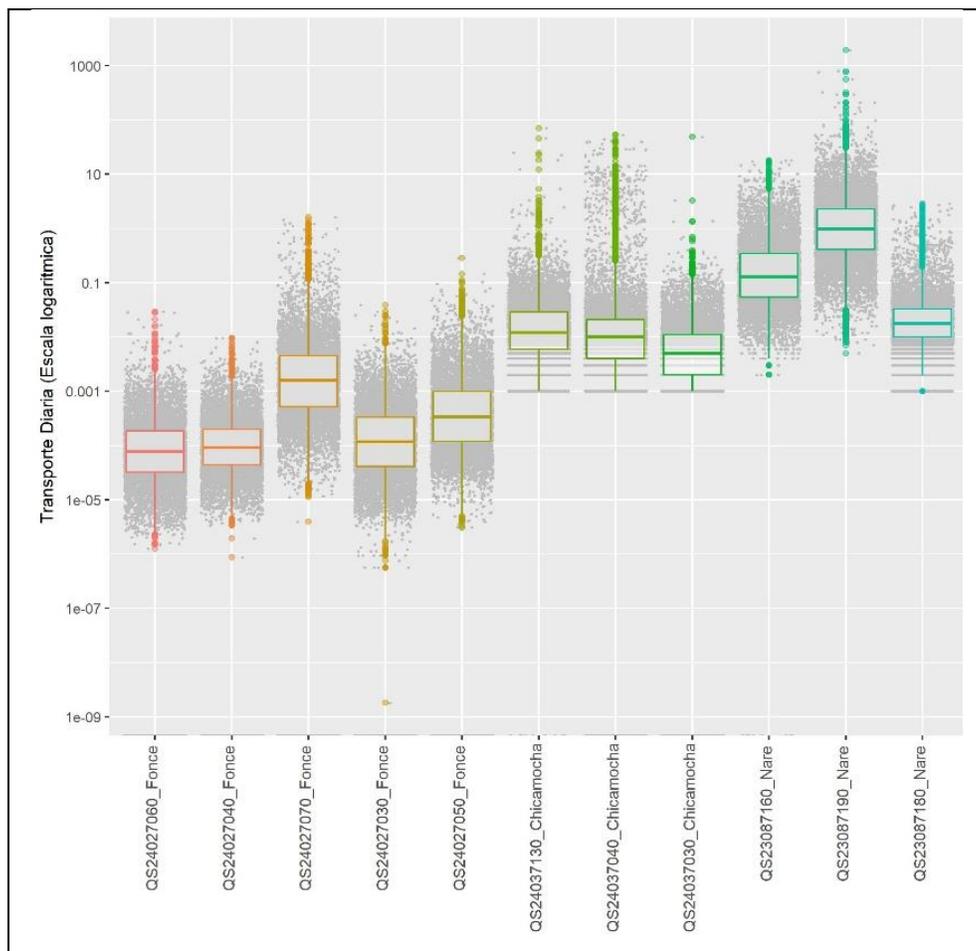


Figura 28. Series temporales correspondientes a Caudal sólido [kg/s]. Fuente: Elaboración propia

En la **Figura 29** se muestran los diagramas de caja que muestran las estadísticas de caudales sólidos representadas por cuartiles. En esta figura se puede observar que las estaciones pertenecientes a las subzonas de Chicamocha y Saldaña presentan la mayor cantidad de datos por encima de su tercer cuartil (es decir más alejados del rango intercuartil y sus datos medios), esto puede indicar que los caudales sólidos tienden a presentar incrementos abruptos de magnitud o alejarse de sus valores medios con mayor frecuencia que en el resto de estaciones. Las estaciones El Palo (24037030) en Chicamocha y La esperanza (22037010) en Saldaña son las que presentan valores extremos más alejados del rango intercuartil, es decir se debe analizar la posibilidad de que estos puedan corresponder a valores anómalos dentro de la serie. También se puede observar que las estaciones pertenecientes a Fonce presentan bajo transporte de sedimentos en comparación al resto de estaciones en las demás subzonas.



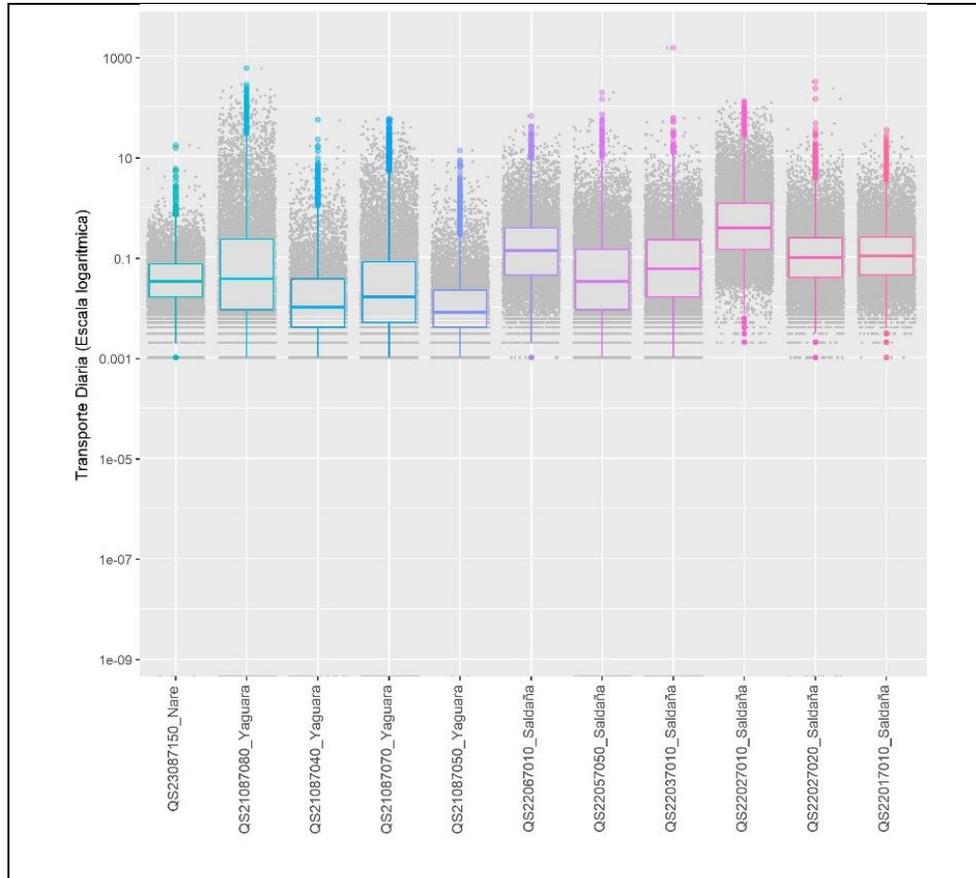


Figura 29. Boxplot correspondiente a Caudal Sólido en todas las estaciones en escala logarítmica. Fuente: Elaboración propia

En la **Figura 30** se encuentran los histogramas de frecuencia de cada una de las estaciones en donde se puede observar de manera más clara la distribución de los datos en sus series. En esta figura se aprecia el coeficiente de asimetría, y se observa que en las estaciones El Palo (24037030) en Chicamocha y La esperanza (22037010) en Saldaña sus datos máximos de caudal sólido están mucho más alejados de su media, lo que indica que se presentan cambios más abruptos en sus series.

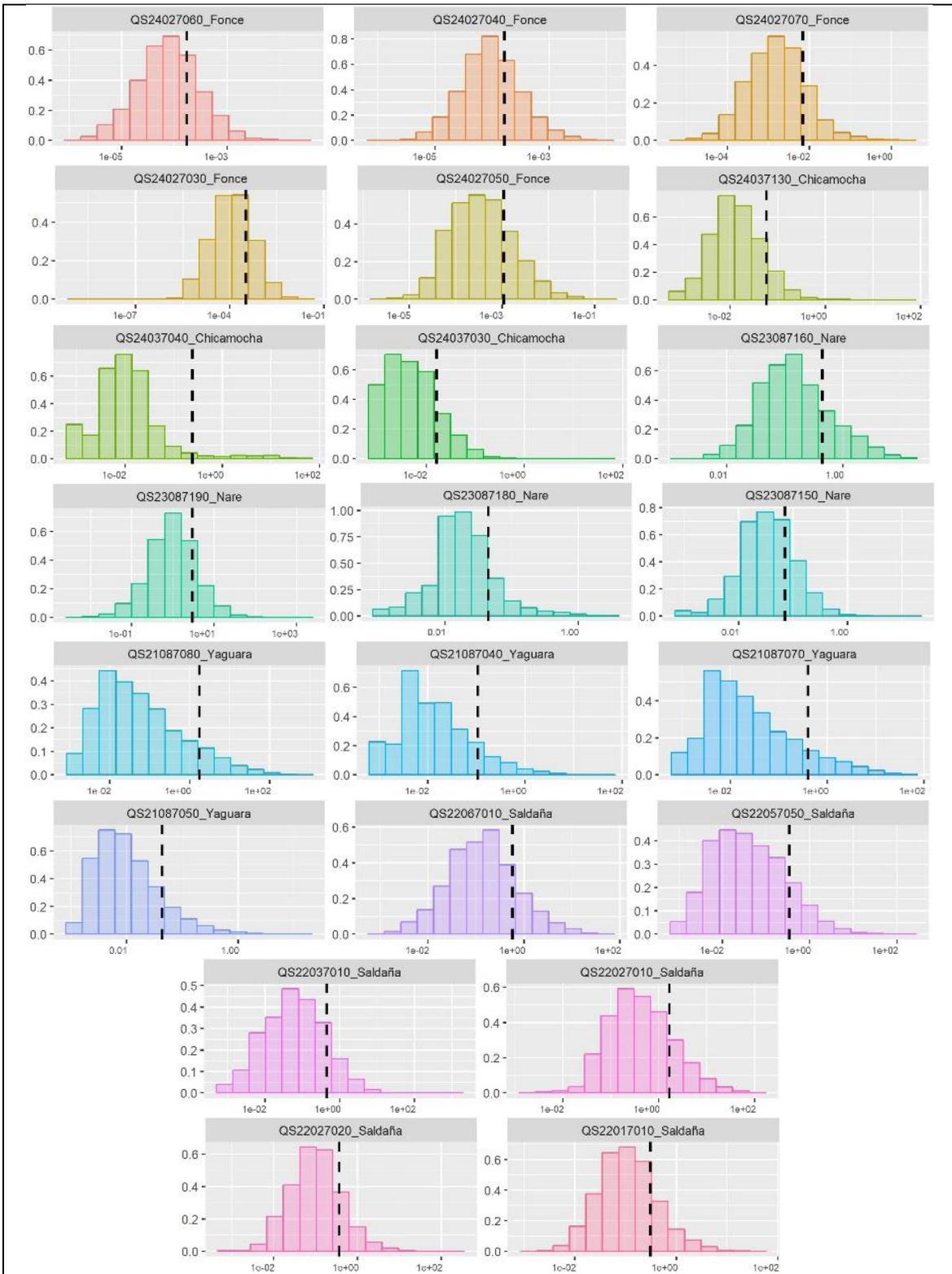


Figura 30. Histogramas de frecuencia correspondientes a caudal sólido en todas las estaciones. Fuente: Elaboración propia

Al comparar los resultados obtenidos tanto en caudal líquido como en caudal sólido se observa que las series de caudal sólido presentan una mayor susceptibilidad a los cambios más abruptos en su comportamiento, lo cual se ve reflejado en coeficiente de variación y asimetría mucho más altos que para caudal líquido. Para las estaciones en donde se observan coeficientes de variación y asimetría más bajos tanto para caudal líquido como para caudal sólido, se puede deducir que sus series presentan un comportamiento más estable o menos susceptible a cambios abruptos, o que la frecuencia de monitoreo no sea óptima para registrar los eventos extremos al ocurrir estos en escalas temporales mucho más pequeñas que la diaria y por lo tanto el efecto de estos eventos no quedan registrados en las series, lo que no permitiría observar claramente su variabilidad real, como puede ser el caso de las estaciones Puente Cabra (24027040) en Fonce, Bocas (22017010) en Saldaña y Los Sirpes (23087180) en Nare que presentan los valores más bajos de coeficientes de variación y asimetría para caudal sólido.

Se puede resaltar también que las estaciones de la subzona del río Chicamocha registran caudales líquidos pequeños en comparación al resto de subzonas lo que no se corresponde con los valores de transporte de sedimentos reportados; pues al ser comparada con Fonce presenta mayores valores medios y máximos de transporte, teniendo en cuenta que en las estaciones pertenecientes a Fonce se registran valores de caudal líquido mucho más altos y se observan valores medios y máximos de transporte de sedimentos muy bajos.

Por otro lado, se extraen las estaciones que presentan los máximos de caudal sólido más altos de la **Tabla 7**, los cuales corresponden a las estaciones La Garrucha (23087190) en Nare, La esperanza (22037010) en Saldaña, Hacienda Venecia (21087080) en Yaguará cuyos valores máximos son 1926.0, 1466.0, y 569.60 kg/s respectivamente. Se tiene la hipótesis de que pueden corresponder a errores en su registro, por lo que un primer análisis que se realizó es si estos valores altos corresponden con un incremento abrupto en la serie de caudal líquido ya que este actúa como un principal agente activador del transporte de sedimentos.

En la **Figura 31** se observa la comparación de las series tanto de caudal líquido (izquierda) como de caudal sólido (derecha) para las estaciones mencionadas anteriormente, en donde se resaltan los máximos en cada variable. En la estación La Garrucha (23087190) de Nare su valor máximo de caudal sólido coincide con un incremento de caudal líquido en el mismo día. En la estación La esperanza (22037010) en Saldaña se encontró que su valor máximo de caudal sólido coincide con el registro del valor máximo para caudal líquido en el mismo día y finalmente en la estación Hacienda Venecia

(21087080) de Yaguará se encontró que su valor máximo de caudal sólido no coincide con algún incremento significativo en la serie de caudal líquido, pues el mismo día se registra un valor bajo o dentro del comportamiento normal de la serie de caudal líquido; con esto se puede concluir que los valores máximos de las estaciones La Garrucha (23087190) de Nare y Hacienda Venecia (21087080) de Yaguará corresponden a valores registrados de forma errónea, mientras que el valor máximo de la estación La esperanza (22037010) de Saldaña debe ser analizado más cuidadosamente, pues a pesar de su coincidencia con el valor máximo de caudal líquido sigue siendo un valor muy alto y muy alejado de la tendencia.

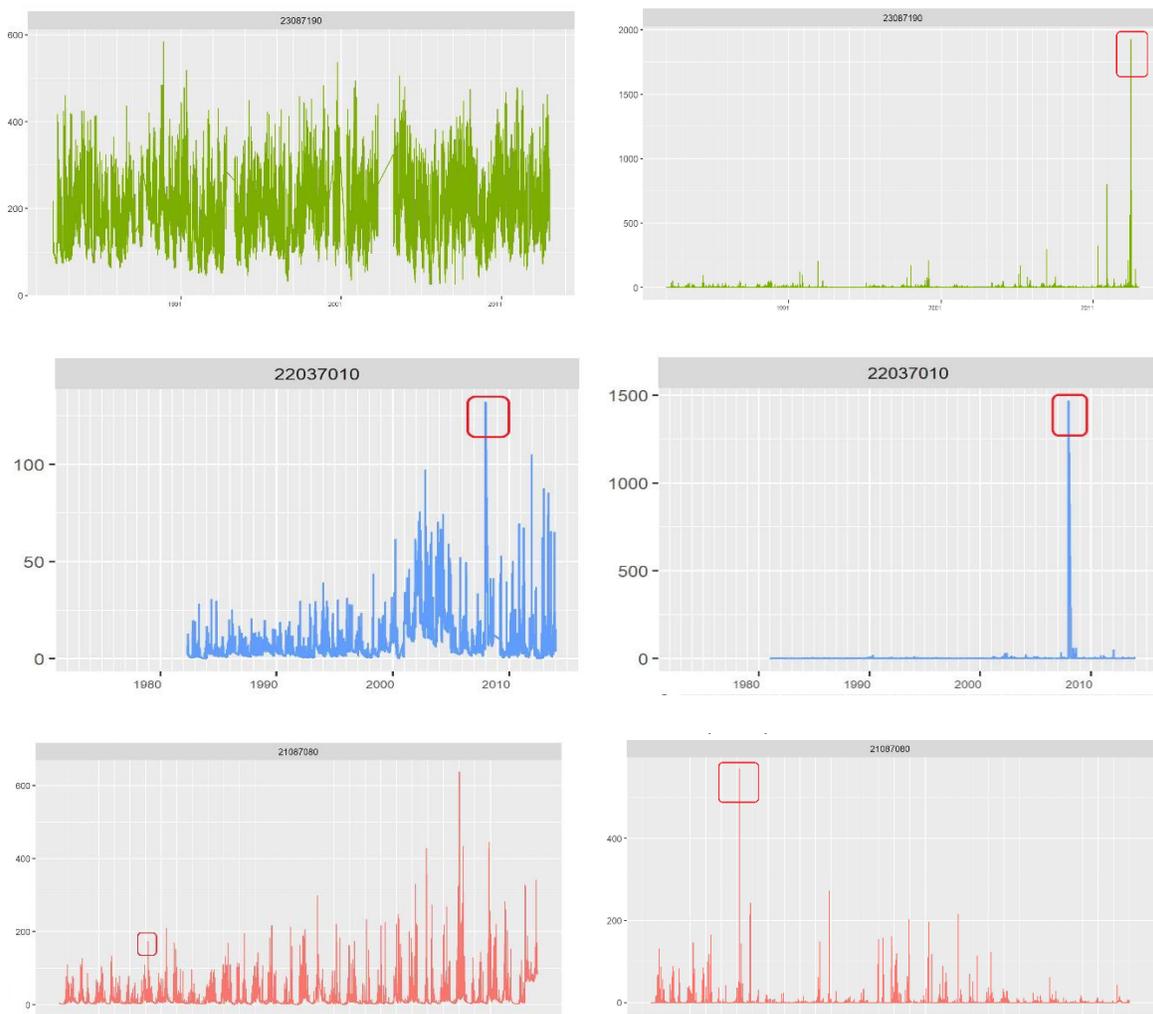


Figura 31. Series de Caudal (izquierda) y Series de Caudal sólido (derecha). Imagen superior: Estación 23087190 (Subzona Río Nare), Imagen media: Estación 22037010 (Subzona Río Saldaña), Imagen inferior: Estación 21087080 (Subzona río Yaguará)

Al observar el análisis estadístico realizado a las variables caudal líquido y caudal sólido se encuentra que la estación La esperanza (22037010) en Saldaña presenta alta dispersión para ambas variables, es decir es muy susceptible a cambios abruptos en el comportamiento normal de sus series de caudal líquido y sólido. En términos generales se observó que los caudales sólidos presentan una variabilidad temporal mucho más alta que la de caudal líquido reflejado en el comportamiento de sus series históricas, pues se observan para estos mayores valores para coeficientes de variación, asimetría y curtosis; indicando que esta variable presenta una mayor susceptibilidad a presentar cambios en mayores proporciones. Cabe resaltar que esta conclusión se deriva de análisis de series datos diarios y que para conclusiones o estudios más exactos o representativos acerca de la variabilidad tanto de flujo de agua como del flujo de sedimentos implica tener como insumo información de series con registros en escala intradiaria de las variables, que es donde ocurren en la realidad las crecidas, por lo que se recomienda desarrollar nuevas metodologías de monitoreo el cual tenga como principal aspecto registros con mayor frecuencia que la diaria. Además, se observó que la cantidad disponible de datos de flujo de sedimentos fue considerablemente menor en comparación a la de caudal líquido, por lo que se concluye que hay la necesidad de que se implementen técnicas que permitan llevar un registro de manera más continúa reduciendo la cantidad de datos faltantes en las series de datos y así correlacionar de mejor manera las variables de flujo de agua con el flujo de sedimentos.

5.2 Evidencias del comportamiento torrencial en las áreas de estudio

Se muestran en esta sección los cálculos realizados para obtener información preliminar que permita identificar el comportamiento torrencial de las subcuencas de estudio, basados en el análisis de la información histórica de sus series y de su geomorfología.

5.2.1 Construcción de la serie sintética de caudales horarios

Para calcular el indicador I_3 se debe obtener primero el tiempo de concentración el cual es estimado empleando la ecuación de Kirpich definida a continuación (según recomendaciones de Cataño Álvarez, 2015):

$$t_c(h) = 0.066 \frac{\text{Longitud cauce principal (m)}^{0.77}}{\text{Pendiente media cauce (m/m)}^{0.38}}$$

Obteniendo así los tiempos de concentración para cada subcuenca los cuales se encuentran consignados en la **Tabla 8**. Cabe mencionar que se utilizó únicamente la ecuación de Kirpich ya que la

metodología de (Cataño, 2015) así lo recomienda, aunque lo más usado en el medio para el cálculo del periodo de concentración es utilizar varias fórmulas y obtener un valor promedio. Con estos valores se obtuvieron las CDC intradiarias para cada subcuenca.

Tabla 8. Tiempo de concentración para cada subcuenca obtenidos a partir de la ecuación de Kirpich

| Subzona | Estación | Área aferente a la estación [km ²] | tc [h] |
|------------|----------|--|--------|
| Chicamocha | 24037030 | 370.10 | 0.89 |
| | 24037040 | 155.60 | 0.26 |
| | 24037130 | 982.70 | 1.33 |
| Fonce | 24027060 | 165.10 | 0.51 |
| | 24027040 | 182.20 | 0.52 |
| | 24027030 | 618.80 | 0.81 |
| | 24027050 | 656.10 | 0.64 |
| | 24027070 | 1544.80 | 1.46 |
| Nare | 23087150 | 289.00 | 1.08 |
| | 23087180 | 118.00 | 0.50 |
| | 23087190 | 1505.10 | 0.93 |
| | 23087160 | 285.30 | 1.00 |
| Saldaña | 22027020 | 911.90 | 0.98 |
| | 22017010 | 651.60 | 0.75 |
| | 22057050 | 172.70 | 0.63 |
| | 22027010 | 1373.00 | 1.43 |
| | 22037010 | 106.60 | 0.53 |
| | 22067010 | 281.40 | 0.75 |
| Yaguará | 21087070 | 485.10 | 0.85 |
| | 21087080 | 663.20 | 0.90 |
| | 21087050 | 53.70 | 0.28 |
| | 21087040 | 103.80 | 0.31 |

5.2.2 Indicadores de valores extremos de caudales líquidos y sólidos

Como se indicó en el ítem 4.4.2 para cada subcuenca se obtuvieron las probabilidades de excedencia de caudales líquidos a partir de la CDC diaria, las que a su vez se obtienen a partir de las series históricas. Con estas se obtuvieron los indicadores adimensionales I_1 , I_2 , I_3 e I_4 propuestos.

Inicialmente, a partir de las series suministradas por IDEAM, se extrajeron los valores extremos y medios de caudal líquido diario en cada subcuenca. Para el caudal máximo, medio y mínimo se trabajó con los valores de $Q_{0.01}$, Q_{50} y Q_{95} respectivamente, tanto para caudal líquido como para caudal sólido. Dichos valores se encuentran consignados en la **Tabla 9**.

Tabla 9. Información estadística del régimen de caudal diario en cada subcuena

| Subzona | Estación | Caudal líquido (m ³ /s) | | | Caudal sólido (kg/s) | | |
|------------|----------|------------------------------------|------------------|--------------------|----------------------|------------------|--------------------|
| | | QL ₉₅ | QL ₅₀ | QL _{0.01} | QS ₉₅ | QS ₅₀ | QS _{0.01} |
| Chicamocha | 24037030 | 0.23 | 1.66 | 41.38 | 0.0010 | 0.0040 | 4.1582 |
| | 24037040 | 1.30 | 3.48 | 32.86 | 0.0010 | 0.0090 | 13.7100 |
| | 24037130 | 1.20 | 3.65 | 60.61 | 0.0020 | 0.0120 | 49.5729 |
| Fonce | 24027060 | 2.63 | 8.32 | 53.99 | 0.0000 | 0.0001 | 0.0285 |
| | 24027040 | 2.48 | 5.79 | 43.22 | 0.0000 | 0.0001 | 0.0095 |
| | 24027030 | 5.06 | 20.60 | 187.03 | 0.0000 | 0.0001 | 0.0296 |
| | 24027050 | 8.70 | 21.08 | 157.00 | 0.0000 | 0.0002 | 0.1512 |
| | 24027070 | 17.60 | 53.80 | 384.92 | 0.0000 | 0.0009 | 1.4368 |
| Nare | 23087150 | 1.07 | 5.38 | 93.98 | 0.0050 | 0.0330 | 15.0584 |
| | 23087180 | 3.18 | 6.24 | 42.01 | 0.0030 | 0.0180 | 2.7521 |
| | 23087190 | 74.20 | 182.00 | 536.24 | 0.0980 | 0.9795 | 822.7892 |
| | 23087160 | 6.60 | 14.01 | 96.43 | 0.0180 | 0.1270 | 17.7809 |
| Saldaña | 22027020 | 11.10 | 25.40 | 160.13 | 0.0100 | 0.0980 | 207.4208 |
| | 22017010 | 8.80 | 22.20 | 216.08 | 0.0140 | 0.1040 | 32.5515 |
| | 22057050 | 1.32 | 5.43 | 177.86 | 0.0020 | 0.0325 | 129.5030 |
| | 22027010 | 24.90 | 48.40 | 262.38 | 0.0430 | 0.3760 | 117.1626 |
| | 22037010 | 0.76 | 4.24 | 104.16 | 0.0030 | 0.0590 | 58.2900 |
| | 22067010 | 1.60 | 7.93 | 226.96 | 0.0080 | 0.1330 | 44.6187 |
| Yaguará | 21087070 | 0.74 | 4.32 | 288.17 | 0.0020 | 0.0160 | 53.6953 |
| | 21087080 | 2.09 | 7.95 | 443.66 | 0.0020 | 0.0350 | 269.4798 |
| | 21087050 | 1.21 | 2.53 | 23.70 | 0.0020 | 0.0080 | 8.5026 |
| | 21087040 | 0.63 | 2.51 | 45.62 | 0.0010 | 0.0100 | 32.4333 |

Para evaluar la condición 3 y 4 los caudales sólidos horarios (medio y máximo) fueron estimados a partir de la CDC líquidos horaria construida mediante la metodología de Cataño; a los caudales líquidos horarios obtenidos para las probabilidades de excedencia del 0.01% y 50% se les aplica los factores definidos por la **Ec. 9** y **Ec. 10** definidas en la metodología en el literal 4.4.2. Las estimaciones de los factores y caudales horarios sólidos para estas dos probabilidades de excedencia se muestran en **Tabla 10** y **Tabla 11**.

Tabla 10. Caudales horarios líquidos y sólidos con probabilidad de excedencia 0.01% para cada subcuena

| Subzona | Estación | QL _{h0.01} horario (m ³ /s) | QSh _{0.01} horario (kg/s) | Factor QSh _{0.01} /QL _{h0.01} |
|------------|----------|---|------------------------------------|---|
| Chicamocha | 24037030 | 258.03 | 25.93 | 0.1005 |
| | 24037040 | 387.13 | 161.53 | 0.4172 |
| | 24037130 | 306.53 | 250.73 | 0.8179 |
| Fonce | 24027060 | 447.66 | 0.24 | 0.0005 |

| Subzona | Estación | QLh _{0.01} horario (m ³ /s) | QSh _{0.01} horario (kg/s) | Factor QSh _{0.01} /QLh _{0.01} |
|---------|----------|--|---------------------------------------|--|
| | 24027040 | 354.62 | 0.08 | 0.0002 |
| | 24027030 | 1222.12 | 0.19 | 0.0002 |
| | 24027050 | 1157.49 | 1.11 | 0.0010 |
| | 24027070 | 1858.20 | 6.94 | 0.0037 |
| Nare | 23087150 | 529.36 | 84.82 | 0.1602 |
| | 23087180 | 354.22 | 23.20 | 0.0655 |
| | 23087190 | 3274.90 | 5024.85 | 1.5344 |
| | 23087160 | 566.89 | 104.53 | 0.1844 |
| Saldaña | 22027020 | 949.07 | 1229.33 | 1.2953 |
| | 22017010 | 1472.94 | 221.89 | 0.1506 |
| | 22057050 | 1321.92 | 962.50 | 0.7281 |
| | 22027010 | 1280.95 | 572.00 | 0.4465 |
| | 22037010 | 845.48 | 473.14 | 0.5596 |
| | 22067010 | 1548.98 | 304.52 | 0.1966 |
| Yaguara | 21087070 | 1844.03 | 343.61 | 0.1863 |
| | 21087080 | 2743.51 | 1666.40 | 0.6074 |
| | 21087050 | 269.81 | 96.78 | 0.3587 |
| | 21087040 | 492.98 | 350.46 | 0.7109 |

Tabla 11. Caudales horarios líquidos y sólidos con probabilidad de excedencia 50% para cada subcuenca

| Subzona | Estación | QLh ₅₀ horario (m ³ /s) | QSh ₅₀ horario (kg/s) | Factor QSh ₅₀ /QLh ₅₀ |
|------------|----------|--|-------------------------------------|--|
| Chicamocha | 24037030 | 1.66 | 0.0040 | 0.0024 |
| | 24037040 | 3.48 | 0.0090 | 0.0026 |
| | 24037130 | 3.65 | 0.0120 | 0.0033 |
| Fonce | 24027060 | 8.32 | 0.0001 | 6.13.E-06 |
| | 24027040 | 5.79 | 0.0001 | 1.10.E-05 |
| | 24027030 | 20.60 | 0.0001 | 4.33.E-06 |
| | 24027050 | 21.08 | 0.0002 | 9.35.E-06 |
| | 24027070 | 53.80 | 0.0009 | 1.71.E-05 |
| Nare | 23087150 | 5.38 | 0.0330 | 0.0061 |
| | 23087180 | 6.24 | 0.0180 | 0.0029 |
| | 23087190 | 182.00 | 0.9795 | 0.0054 |
| | 23087160 | 14.01 | 0.1270 | 0.0091 |
| Saldaña | 22027020 | 25.40 | 0.0980 | 0.0039 |
| | 22017010 | 22.20 | 0.1040 | 0.0047 |
| | 22057050 | 5.43 | 0.0325 | 0.0060 |
| | 22027010 | 48.40 | 0.3760 | 0.0078 |
| | 22037010 | 4.24 | 0.0590 | 0.0139 |
| | 22067010 | 7.93 | 0.1330 | 0.0168 |

| Subzona | Estación | QLh ₅₀ horario (m ³ /s) | QSh ₅₀ horario (kg/s) | Factor QSh ₅₀ /QLh ₅₀ |
|---------|----------|--|-------------------------------------|--|
| Yaguará | 21087070 | 4.32 | 0.0160 | 0.0037 |
| | 21087080 | 7.95 | 0.0350 | 0.0044 |
| | 21087050 | 2.53 | 0.0080 | 0.0032 |
| | 21087040 | 2.51 | 0.0100 | 0.0040 |

A partir de los datos anteriores se obtuvieron los 3 indicadores I_1 , I_2 , I_3 e I_4 para cada estación, los cuales se encuentran consignados en la **Tabla 12**. Para el caso de caudal sólido se decidió utilizar solamente los indicadores I_2 e I_3 ya que se presentan valores mínimos de caudal sólido iguales a cero en la subzona Fonce donde el transporte de sedimentos es muy bajo en comparación al resto de subzonas lo cual no permite el cálculo del indicador I_1 .

Tabla 12. Resultados obtenidos para los indicadores de régimen de caudal I_1 , I_2 , I_3 e I_4 en cada estación

| Subzona | Estación | Caudal líquido | | | | Caudal sólido | | |
|------------|----------|--|--|--|--|--|--|--|
| | | I_{1L} $\left(\frac{QLd_{0-01}}{QLd_{95}}\right)$ | I_{2L} $\left(\frac{QLd_{0-01}}{QLd_{50}}\right)$ | I_{3L} $\left(\frac{QLh_{0-01}}{QLh_{50}}\right)$ | I_{4L} $\left(\frac{QLh_{0-01}}{QLd_{0-01}}\right)$ | I_{2S} $\left(\frac{QSD_{0-01}}{QSD_{50}}\right)$ | I_{3S} $\left(\frac{QSh_{0-01}}{QSh_{50}}\right)$ | I_{4S} $\left(\frac{QSh_{0-01}}{QSD_{0-01}}\right)$ |
| Chicamocha | 24037030 | 181.5 | 24.9 | 155.1 | 6.2 | 1039.6 | 6481.6 | 6.2 |
| | 24037040 | 25.4 | 9.4 | 111.2 | 11.8 | 1523.3 | 17947.9 | 11.8 |
| | 24037130 | 50.5 | 16.6 | 84.0 | 5.1 | 4131.1 | 20893.9 | 5.1 |
| Fonce | 24027060 | 20.5 | 6.5 | 53.8 | 8.3 | 559.0 | 4635.1 | 8.3 |
| | 24027040 | 17.4 | 7.5 | 61.3 | 8.2 | 149.3 | 1224.8 | 8.2 |
| | 24027030 | 37.0 | 9.1 | 59.3 | 6.5 | 331.4 | 2165.6 | 6.5 |
| | 24027050 | 18.0 | 7.4 | 54.9 | 7.4 | 766.6 | 5651.4 | 7.4 |
| | 24027070 | 21.9 | 7.2 | 34.5 | 4.8 | 1563.0 | 7545.2 | 4.8 |
| Nare | 23087150 | 87.9 | 17.5 | 98.5 | 5.6 | 456.3 | 2570.3 | 5.6 |
| | 23087180 | 13.2 | 6.7 | 56.8 | 8.4 | 152.9 | 1289.0 | 8.4 |
| | 23087190 | 7.2 | 2.9 | 18.0 | 6.1 | 840.0 | 5130.0 | 6.1 |
| | 23087160 | 14.6 | 6.9 | 40.5 | 5.9 | 140.0 | 823.0 | 5.9 |
| Saldaña | 22027020 | 14.4 | 6.3 | 37.4 | 5.9 | 2116.5 | 12544.2 | 5.9 |
| | 22017010 | 24.6 | 9.7 | 66.3 | 6.8 | 313.0 | 2133.6 | 6.8 |
| | 22057050 | 134.7 | 32.8 | 243.4 | 7.4 | 3984.7 | 29615.5 | 7.4 |
| | 22027010 | 10.5 | 5.4 | 26.5 | 4.9 | 311.6 | 1521.3 | 4.9 |
| | 22037010 | 137.1 | 24.6 | 199.4 | 8.1 | 988.0 | 8019.3 | 8.1 |
| | 22067010 | 141.9 | 28.6 | 195.3 | 6.8 | 335.5 | 2289.6 | 6.8 |
| Yaguará | 21087070 | 389.4 | 66.7 | 426.9 | 6.4 | 3356.0 | 21475.4 | 6.4 |
| | 21087080 | 212.3 | 55.8 | 345.3 | 6.2 | 7699.4 | 47611.4 | 6.2 |
| | 21087050 | 19.6 | 9.4 | 106.6 | 11.4 | 1062.8 | 12097.3 | 11.4 |
| | 21087040 | 73.0 | 18.2 | 196.4 | 10.8 | 3243.3 | 35045.6 | 10.8 |

Para un mejor análisis de estos indicadores se elaboró una gráfica que representa la probabilidad de excedencia de cada indicador con la que se pueden evaluar las tendencias, como se puede apreciar en la Figura 32, Figura 33, Figura 34, Figura 35, Figura 36 y Figura 37.

Condición 1: Indicador I_{1L} para caudal líquido

Al revisar la **Figura 32** donde se muestra el comportamiento del indicador I_{1L} para las diferentes subzonas, se puede observar que existen varios puntos de cambio. A partir de la probabilidad de excedencia del 30% se observa que la curva presenta una pendiente relativamente constante; la curva en abscisas menores a esta probabilidad presenta una tendencia diferente y se observan pendientes más pronunciadas o incrementan con más rapidez, esta zona indicaría dispersiones mayores en el régimen de caudales representadas en caudales máximos mucho más alejados de los mínimos, que indicarían la ocurrencia de eventos torrenciales en las cuencas. Se propone ubicar el punto de referencia para este indicador en la probabilidad de excedencia del 30 % que presenta un valor de I_{1L} cercano a 80.0. Se establece como condición que cuencas con I_{1L} con un valor superior o igual a 80.0 presentan comportamiento torrencial para el régimen de caudal líquido. Bajo este indicador 7 de las 22 subcuencas de estudio cumplen la condición 1; las cuales se encuentran consignadas en la **Tabla 13** siendo la zona hasta la estación Hacienda El Jardín (21087070) en la subzona Yaguará la que presenta el mayor valor del indicador ($I_{1L} = 389.4$) y la zona hasta la estación Puente Real (23087150) en Nare ($I_{1L} = 87.9$) el menor valor entre las 7. A partir de este indicador se puede decir que para estas 7 zonas sus valores extremos se encuentran demasiado alejados entre sí, al ser comparados con el resto de cuencas analizadas y esto representa altas variabilidades en el comportamiento normal en el régimen de caudal líquido.

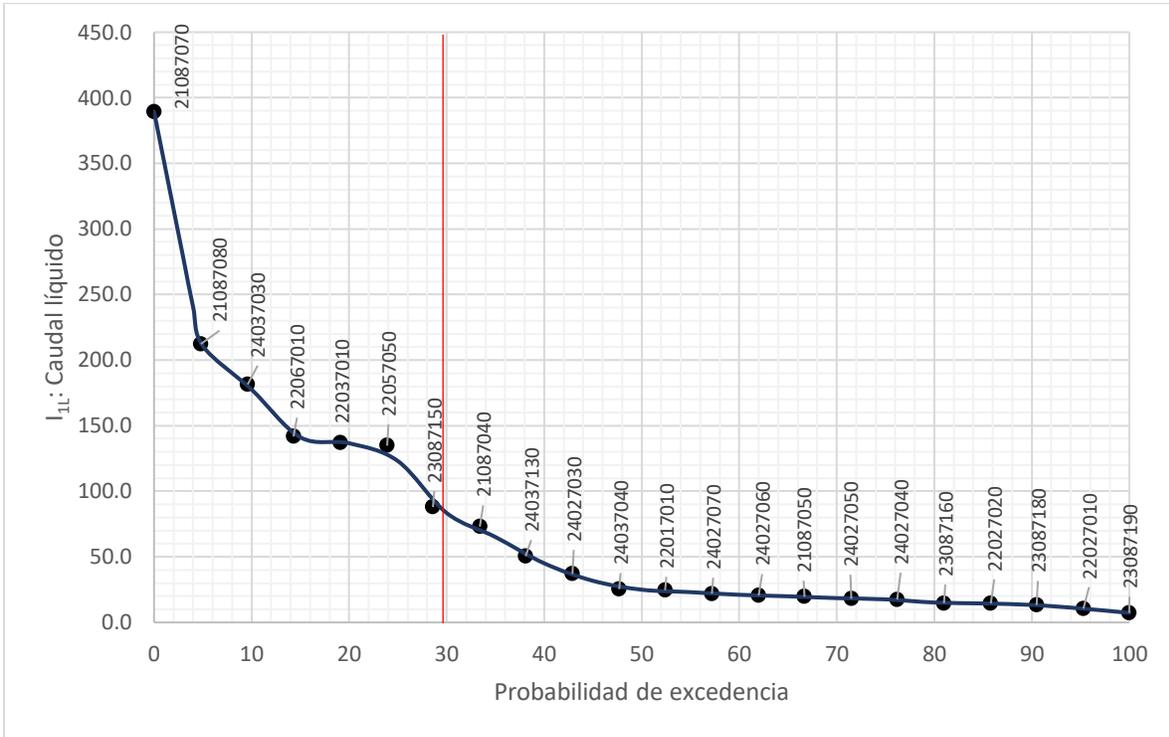


Figura 32. Probabilidad de excedencia del indicador I_{1L} para caudal líquido

Tabla 13. Estaciones que superan el valor referencia del indicador I_{1L}

| Subzona | Estación | I_{1L} |
|------------|----------|----------|
| Chicamocha | 24037030 | 181.5 |
| Nare | 23087150 | 87.9 |
| Saldaña | 22057050 | 134.7 |
| | 22037010 | 137.1 |
| | 22067010 | 141.9 |
| Yaguará | 21087070 | 389.4 |
| | 21087080 | 212.3 |

Condición 2: Indicadores I_2 para caudal líquido y sólido

Al revisar la **Figura 33**, donde se muestra el comportamiento del indicador I_{2L} con respecto al caudal líquido para todas las subcuencas analizadas, se puede observar que para probabilidades de excedencia menores al 43 % (I_{2L} cercano a 10), el incremento en el valor del indicador es mucho más pronunciado y los caudales máximos se alejan de una forma muy significativa de los datos medios. Se establece la propuesta de que cuencas con un valor de I_{2L} igual o superior a 10 presentan un comportamiento torrencial para su régimen de caudal líquido. Bajo este indicador 9 de las 22 subcuencas de estudio cumplen con la condición 2; las cuales se encuentran consignadas en la **Tabla**

14 siendo la zona hasta la estación Hacienda El Jardín (21087070) en la subzona Yaguará la que presenta el mayor valor del indicador ($I_{2L} = 66.7$) y la estación 21087130 en la subzona Chicamocha ($I_{2L} = 16.6$) el menor valor entre las 9. A partir de este indicador se puede decir que para estas 9 estaciones cuando hay ocurrencia de eventos extremos estos pueden tener una mayor magnitud de impacto con respecto al resto de subcuencas analizadas, pues sus valores máximos se encuentran muy alejados de los valores medios indicando alta susceptibilidad a cambios abruptos en el régimen normal de caudal líquido.

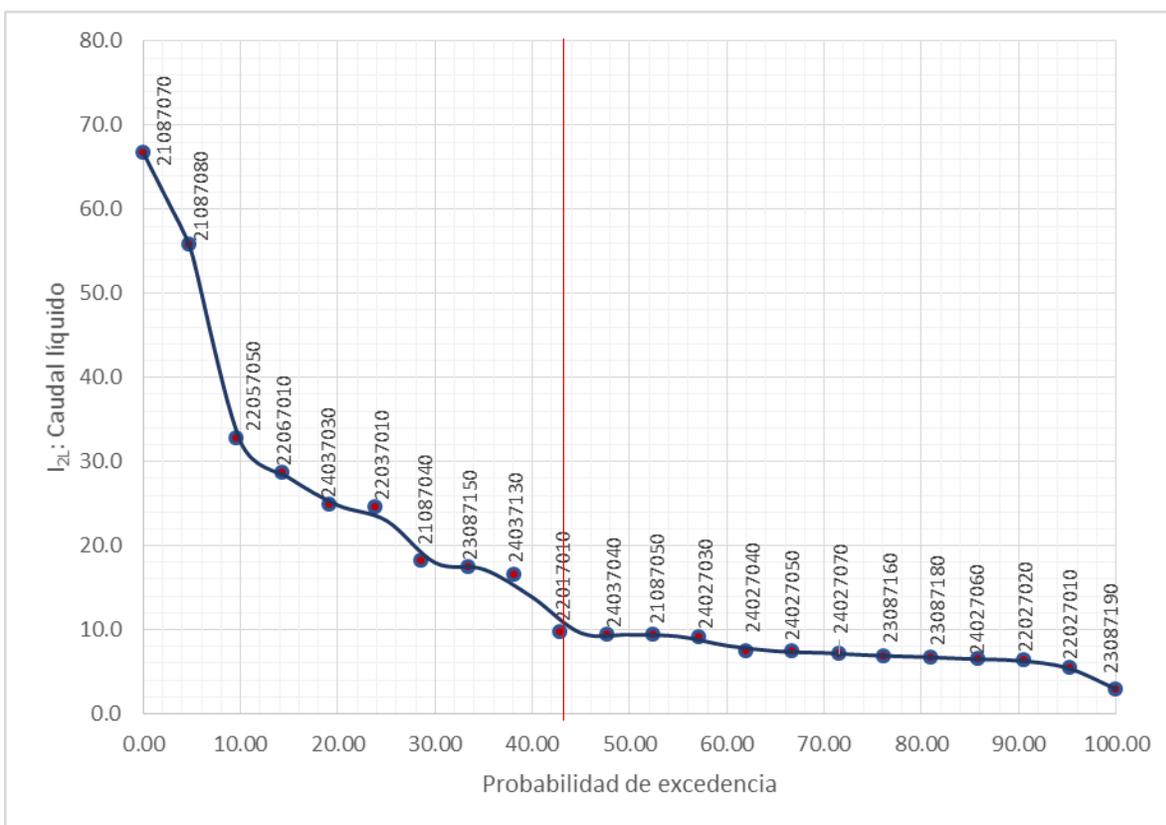


Figura 33. Probabilidad de excedencia del indicador I_{2L} para caudal líquido

Tabla 14. Estaciones que superan el valor referencia del indicador I_{2L} para caudal líquido

| Subzona | Estación | I_{2L} |
|------------|----------|----------|
| Chicamocha | 24037030 | 24.9 |
| | 24037130 | 16.6 |
| Nare | 23087150 | 17.5 |
| Saldaña | 22057050 | 32.8 |
| | 22037010 | 24.6 |
| Yaguará | 21087070 | 66.7 |
| | 21087080 | 55.8 |

| Subzona | Estación | I_{2L} |
|---------|----------|----------|
| | 21087040 | 18.2 |

Por otro lado, si se revisa la **Figura 34**, donde se muestra el comportamiento del indicador I_{2S} para el caudal sólido para todas las subcuencas analizadas, se puede observar que para probabilidades de excedencia menores al 40 % (I_{2S} cercano a 1000), el incremento en el valor del indicador es mucho más pronunciado y los caudales máximos se alejan de una forma muy significativa de los datos medios. Se propone que las cuencas que tengan valores de I_{2S} cercanos o mayores a 1000 cumplen con la condición 2 de torrencialidad planteada en su régimen de caudal sólido. Bajo este indicador 10 de las 22 subcuencas de estudio cumplen la condición 2; las cuales se encuentran consignadas en la **Tabla 15** siendo la zona hasta la estación Hacienda Venecia (21087080) en Yaguará la que presenta el mayor valor del indicador ($I_{2S} = 7699.4$) y la estación El Palo (24037030) en Chicamocha ($I_{2S} = 1039.6$) el menor valor entre las 10. A partir de este indicador se puede decir que para estas 10 estaciones cuando hay ocurrencia de eventos extremos estos pueden tener una mayor magnitud de impacto con respecto al resto de subcuencas analizadas, pues sus valores máximos de transporte de sedimentos se encuentran muy alejados de los valores medios, lo que indica una mayor susceptibilidad a los cambios abruptos en su régimen normal de caudal sólido.

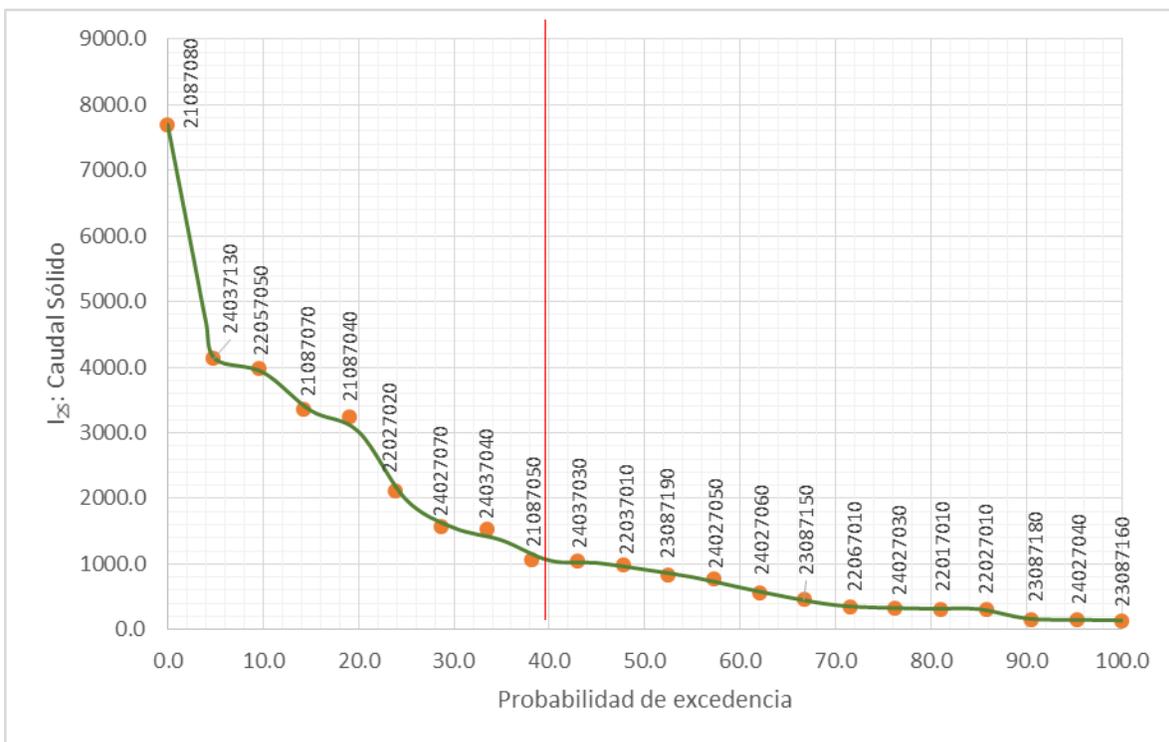


Figura 34. Probabilidad de excedencia del indicador I_{2S} para caudal sólido

Tabla 15. Estaciones que superan el valor referencia del indicador I_{25} para caudal sólido

| Subzona | Estación | I_{25} |
|------------|----------|----------|
| Chicamocha | 24037030 | 1039.6 |
| | 24037040 | 1523.3 |
| | 24037130 | 4131.1 |
| Fonce | 24027070 | 1563.0 |
| Saldaña | 22027020 | 2116.5 |
| | 22057050 | 3984.7 |
| Yaguará | 21087070 | 3356.0 |
| | 21087080 | 7699.4 |
| | 21087050 | 1062.8 |
| | 21087040 | 3243.3 |

Condición 3: Indicador I_3 para caudal líquido y sólido

Al revisar la **Figura 35** donde se muestran los resultados para todas las estaciones analizadas por subzonas del indicador I_{3L} , se puede observar que para probabilidades de excedencia menores al 35 % (I_{3L} cercano a 110) el incremento en el valor del indicador es mucho más variable y pronunciado y los caudales máximos horarios se alejan de una forma muy significativa de los datos medios horarios. Se establece la propuesta de que las cuencas con un valor de I_{3L} igual o superior a 110 son considerados torrenciales. Bajo este indicador 8 de las 22 subcuencas de estudio se pueden clasificar con características torrenciales cumpliendo la condición 3 planteada para torrencialidad con respecto al régimen de caudal líquido; las cuales se encuentran consignadas en la **Tabla 16**, siendo la estación Hacienda El Jardín (21087070) en Yaguará la que presenta el mayor valor del indicador ($I_{3L} = 426.9$) y la estación El Palo (24037030) en Chicamocha ($I_{3L} = 111.2$) el menor valor entre las 8. Estas 8 estaciones cumplen la condición 3 ya que el incremento en sus caudales máximos con respecto al medio dentro del régimen intradiario es mucho mayor al del resto de subcuencas analizadas, lo que se traduce en una mayor susceptibilidad a presentar eventos extremos en intervalos de tiempo menores al diario.

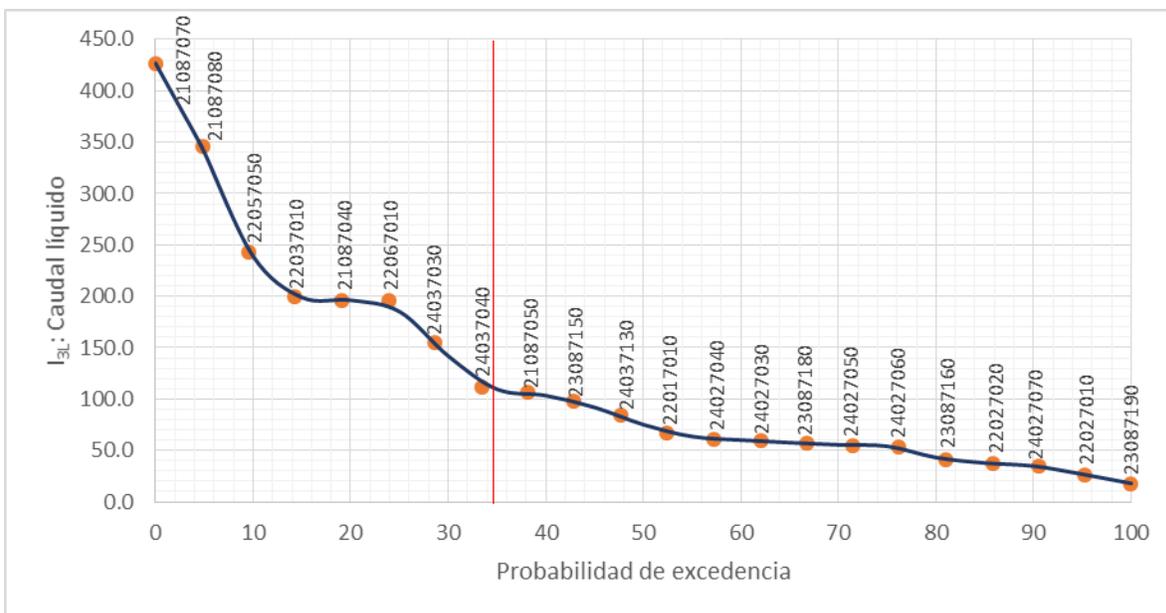


Figura 35. Probabilidad de excedencia del indicador I_{3L} para caudal líquido

Tabla 16. Estaciones que superan el valor referencia del indicador I_{3L} para caudal líquido

| Subzona | Estación | I_{3L} |
|------------|----------|----------|
| Chicamocha | 24037030 | 155.1 |
| | 24037040 | 111.2 |
| Saldaña | 22057050 | 243.4 |
| | 22037010 | 199.4 |
| | 22067010 | 194.5 |
| Yaguará | 21087070 | 426.9 |
| | 21087080 | 345.3 |
| | 21087040 | 196.4 |

En la **Figura 36** se muestran los resultados para todas las estaciones analizadas por subzonas del indicador I_{3S} , se puede observar que para probabilidades de excedencia menores al 40 % (I_{3S} cercano a 8000), el incremento en el valor del indicador es mucho más pronunciado y los caudales sólidos máximos horarios se alejan de una forma muy significativa de los datos medios horarios. Se establece la propuesta de que las cuencas con un valor I_{3S} de igual o superior a 8000 serán consideradas torrenciales. Bajo este indicador 9 de las 22 subcuencas de estudio se pueden clasificar con características torrenciales cumpliendo la condición 3 planteada para torrencialidad con respecto al régimen de caudal sólido; las cuales se encuentran consignadas en la Tabla 17, siendo la estación Hacienda Venecia (21087080) en Yaguará la que presenta el mayor valor del indicador ($I_{3S} = 47611.4$) y la estación La esperanza (22037010) en Saldaña ($I_{3S} = 8019.3$) el menor valor entre las 9. Estas 9

estaciones cumplen la condición 3 ya que el incremento de sus caudales máximos con respecto a los medios dentro del régimen intradiario es mucho mayor al del resto de subcuencas analizadas, lo que se traduce en una mayor susceptibilidad a presentar eventos extremos dentro de intervalos de tiempo menores al diario.

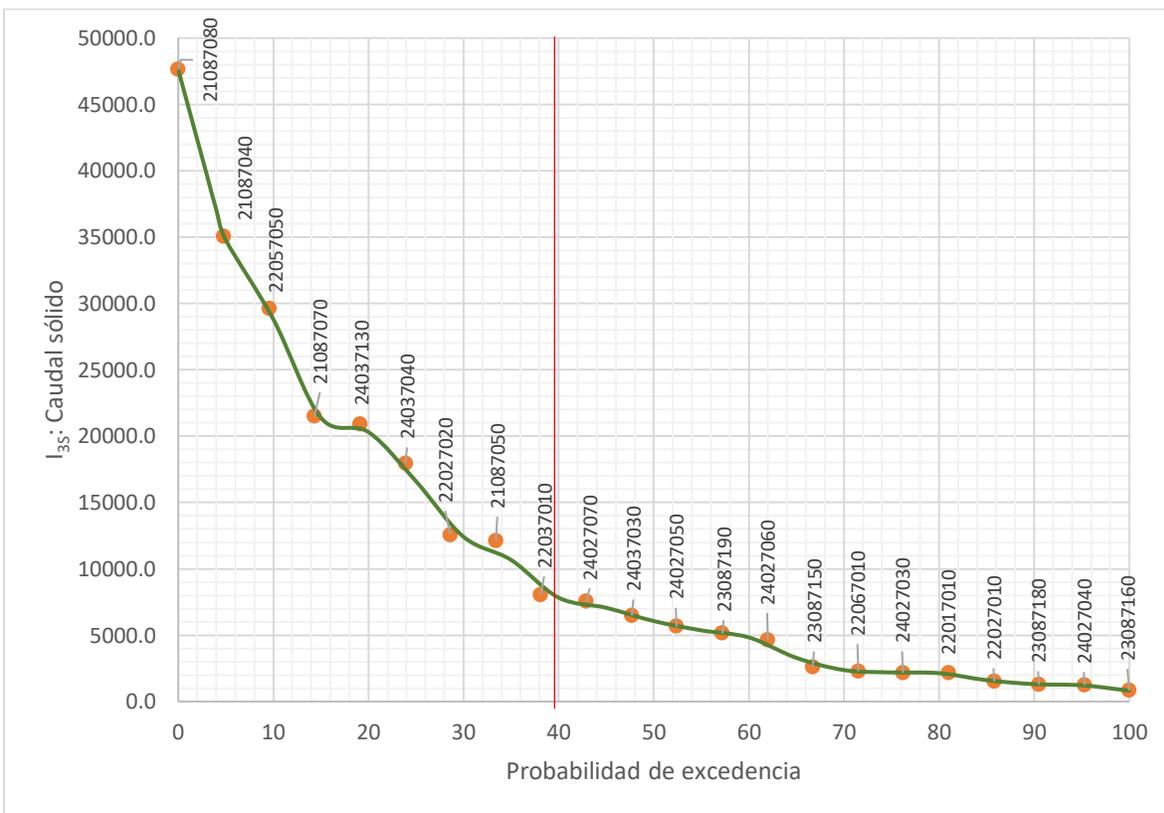


Figura 36. Probabilidad de excedencia del indicador I_{35} para caudal sólido

Tabla 17. Estaciones que superan el valor referencia del indicador I_{35} para caudal sólido

| Subzona | Estación | I_{35} |
|------------|----------|----------|
| Chicamocha | 24037040 | 17947.9 |
| | 24037130 | 20893.9 |
| Saldaña | 22027020 | 12544.2 |
| | 22057050 | 29615.5 |
| | 22037010 | 8019.3 |
| Yaguará | 21087070 | 21475.4 |
| | 21087080 | 47611.4 |
| | 21087050 | 12097.3 |
| | 21087040 | 35045.6 |

Condición 4: Indicador I_4

Como se puede observar en la Tabla 12 el resultado del indicador que evalúa la condición 4 de torrencialidad planteada es igual para caudal líquido como caudal sólido debido que al simplificar y reemplazar valores en la expresión que estima el indicador de caudal sólido se llega a la misma expresión, por lo que esta condición se analizará de forma general para todo el régimen de caudales tanto líquido como sólido.

En la **Figura 37** se muestran los resultados para todas las estaciones analizadas por subzonas del indicador I_4 , y se puede observar que para probabilidades de excedencia menores al 16 % (I_4 cercano a 8.2) el incremento en el valor del indicador es mucho más pronunciado y los caudales máximos horarios se alejan de una forma muy significativa de los caudales máximos diarios. Se establece la propuesta de que las cuencas con un valor de I_4 igual o superior a 8.2 presentan comportamiento torrencial. Bajo este indicador 5 de las 22 subcuencas de estudio cumplen la condición 4 planteada para torrencialidad tanto para caudal líquido como para caudal sólido; las cuales se encuentran consignadas en la **Tabla 18**, siendo la estación Guaicán (24037040) en Chicamocha la que presenta el mayor valor del indicador ($I_4 = 11.8$) y la estación Puente Cabra (24027040) en Fonce ($I_4 = 8.2$) el menor valor entre las 5. En estas 5 estaciones el incremento entre caudales máximos al pasar de régimen diario a régimen intradiario es mucho mayor al del resto de cuencas analizadas, lo que puede traducirse en mayor probabilidad de subestimación al no medir eventos en intervalos de tiempo menores al diario que es donde ocurren las avenidas torrenciales.

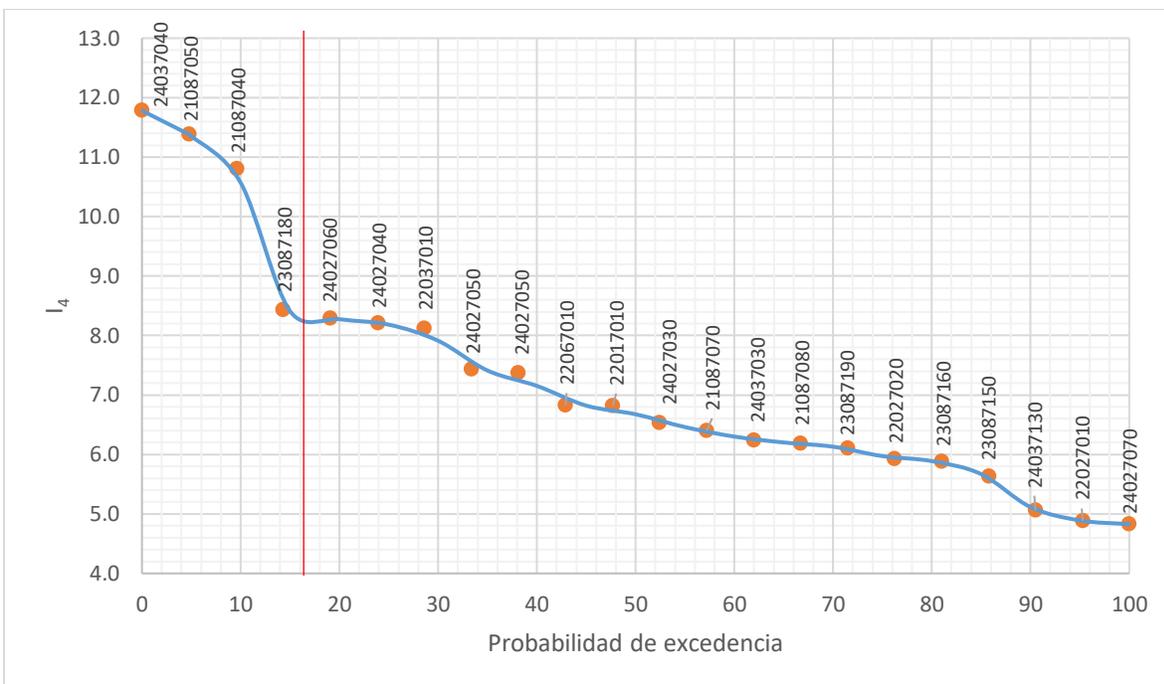


Figura 37. Probabilidad de excedencia para el indicador I_4 para caudal líquido y caudal sólido

Tabla 18. Estaciones que superan el valor referencia del indicador I_4

| Subzona | Estación | I_4 |
|------------|----------|-------|
| Chicamocha | 24037040 | 11.8 |
| Fonce | 24027060 | 8.3 |
| | 24027040 | 8.2 |
| Yaguará | 21087050 | 11.14 |
| | 21087040 | 10.8 |

En la **Tabla 19** se ordenan los valores de los indicadores I_{1L} , I_{2L} , I_{2S} , I_{3L} , I_{3S} e I_4 de mayor a menor utilizando como criterio I_{1L} . Se puede observar respecto al régimen de caudal líquido que los indicadores correspondientes a las 3 primeras condiciones presentan resultados similares y se evidencia que 6 cuencas están cumpliendo con las 3 condiciones definidas para la torrencialidad y el indicador. Para el régimen de caudal sólido los indicadores que evalúan las condiciones 2 y 3 de torrencialidad también registran resultados similares y se evidencian 5 cuencas que están cumpliendo estas condiciones.

Para la condición 4 el indicador I_4 muestra resultados que discrepan significativamente con el resto de indicadores, sumado a esto tampoco se pudo evaluar mediante este indicador caudal líquido y

sólido por separado, por lo que se decide no tener en cuenta este indicador en la definición de las cuencas que presentan comportamiento torrencial.

Bajo las condiciones planteadas se escogen 7 zonas (resaltadas en verde en la **Tabla 19**) que presentan susceptibilidad al comportamiento torrencial las cuales corresponden a:

- Hacienda El Jardín (21087070) en Yaguará
- Hacienda Venecia (21087080) en Yaguará
- El Palo (24037030) en Chicamocha
- Puente Ortega (22067010) en Saldaña
- La esperanza (22037010) en Saldaña
- Puente La hamaca (22057050) en Saldaña
- Hidroeléctrica (21087040) en Yaguará

Tabla 19. Recopilación de indicadores de valores extremos para cada estación

| Subzona | Estación | Condición 1 | Condición 2 | | Condición 3 | | Condición 4 |
|------------|----------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|---|
| | | $I_{1L} > 80$ (Caudal líquido) | $I_{2L} > 10$ (Caudal líquido) | $I_{2S} > 1000$ (Caudal sólido) | $I_{3L} > 110$ (Caudal líquido) | $I_{3S} > 8000$ (Caudal sólido) | $I_{4L} > 8.2$ (Caudal líquido y sólido) |
| YAGUARA | 21087070 | 389.4 | 66.7 | 3356.0 | 426.9 | 21475.4 | 6.4 |
| YAGUARA | 21087080 | 212.3 | 55.8 | 7699.4 | 345.3 | 47611.4 | 6.2 |
| CHICAMOCHA | 24037030 | 181.5 | 24.9 | 1039.6 | 155.1 | 6481.6 | 6.2 |
| SALDANA | 22067010 | 141.9 | 28.6 | 335.5 | 195.3 | 2289.6 | 6.8 |
| SALDANA | 22037010 | 137.1 | 24.6 | 988.0 | 199.4 | 8019.3 | 8.1 |
| SALDANA | 22057050 | 134.7 | 32.8 | 3984.7 | 243.4 | 29615.5 | 7.4 |
| NARE | 23087150 | 87.9 | 17.5 | 456.3 | 98.5 | 2570.3 | 5.6 |
| YAGUARA | 21087040 | 73.0 | 18.2 | 3243.3 | 196.4 | 35045.6 | 10.8 |
| CHICAMOCHA | 24037130 | 50.5 | 16.6 | 4131.1 | 84.0 | 20893.9 | 5.1 |
| FONCE | 24027030 | 37.0 | 9.1 | 331.4 | 59.3 | 2165.6 | 6.5 |
| CHICAMOCHA | 24037040 | 25.4 | 9.4 | 1523.3 | 111.2 | 17947.9 | 11.8 |
| SALDANA | 22017010 | 24.6 | 9.7 | 313.0 | 66.3 | 2133.6 | 6.8 |
| FONCE | 24027070 | 21.9 | 7.2 | 1563.0 | 34.5 | 7545.2 | 4.8 |
| FONCE | 24027060 | 20.5 | 6.5 | 559.0 | 53.8 | 4635.1 | 8.3 |
| YAGUARA | 21087050 | 19.6 | 9.4 | 1062.8 | 106.6 | 12097.3 | 11.4 |
| FONCE | 24027050 | 18.0 | 7.4 | 766.6 | 54.9 | 5651.4 | 7.4 |
| FONCE | 24027040 | 17.4 | 7.5 | 149.3 | 61.3 | 1224.8 | 8.2 |
| NARE | 23087160 | 14.6 | 6.9 | 140.0 | 40.5 | 823.0 | 5.9 |
| SALDANA | 22027020 | 14.4 | 6.3 | 2116.5 | 37.4 | 12544.2 | 5.9 |
| NARE | 23087180 | 13.2 | 6.7 | 152.9 | 56.8 | 1289.0 | 8.4 |

| Subzona | Estación | Condición 1 | Condición 2 | | Condición 3 | | Condición 4 |
|---------|----------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|---|
| | | $I_{1L} > 80$ (Caudal líquido) | $I_{2L} > 10$ (Caudal líquido) | $I_{2S} > 1000$ (Caudal sólido) | $I_{3L} > 110$ (Caudal líquido) | $I_{3S} > 8000$ (Caudal sólido) | $I_{4L} > 8.2$ (Caudal líquido y sólido) |
| SALDANA | 22027010 | 10.5 | 5.4 | 311.6 | 26.5 | 1521.3 | 4.9 |
| NARE | 23087190 | 7.2 | 2.9 | 840.0 | 18.0 | 5130.0 | 6.1 |

Cabe resaltar dentro de la metodología de obtención de estos indicadores que se aprecia una amplia diferencia al comparar los valores que son obtenidos a partir de datos diarios registrados (condiciones 1 y 2) y los obtenidos a partir de valores intradiarios estimados (condición 3), pues en los indicadores que son obtenidos de datos intradiarios se observa una tendencia a valores más grandes que los que son obtenidos de información, es decir que el comportamiento representado en los indicadores si pudieran ser calculados a partir de registros intradiarios, tanto de flujo de agua como flujo de sedimentos, cabría una alta posibilidad de que sus resultados representen otra realidad en el comportamiento hidrosedimentológico de las cuencas de estudio que evidencie una mayor variabilidad entre los eventos máximos y el comportamiento promedio de la series ya que se reduce la subestimación de los eventos lo cual sería una representación más exacta y confiable a la hora de desarrollar estudios de avenidas torrenciales o fenómenos de poca frecuencia los cuales ocurren generalmente en intervalos de tiempos mucho menores al diario (horas o minutos).

5.3 Evaluación geomorfológica

Se evaluaron las características de la cuenca que permiten describir su forma, relieve y la configuración de sus corrientes de drenaje; parámetros de gran relevancia para tener un conocimiento preliminar acerca del comportamiento hidrológico de la misma. Los parámetros geomorfológicos obtenidos fueron consignados en la **Tabla 20** para todas las subcuencas correspondientes a cada subzona.

Tabla 20. Evaluación geomorfológica de las subcuencas de estudio

| Subzona | Estación | FORMA | | | | | | RELIEVE | | | | | DRENAJE | | | | |
|---------|----------|----------------------|--------|--------|------|------|------|---------|--------|--------|------|------|---------|------|--------|---------|--------------------------|
| | | A [km ²] | P [km] | L [km] | Er | Ff | Cr | H [m] | Hm [m] | Sc [%] | Rr | HI | Lc [km] | C | So [%] | Lt [km] | Dd [km/km ²] |
| FONCE | 24027060 | 165.1 | 77.1 | 20.81 | 0.62 | 0.38 | 0.35 | 2198 | 1936 | 47.2% | 0.11 | 0.35 | 26.28 | 0.45 | 2.8% | 339.45 | 2.06 |
| | 24027040 | 182.2 | 71.2 | 16.55 | 0.82 | 0.66 | 0.45 | 1310 | 1842 | 29.3% | 0.08 | 0.24 | 19.17 | 0.63 | 1.4% | 417.93 | 2.29 |

| Subzona | Estación | FORMA | | | | | | RELIEVE | | | | | DRENAJE | | | | |
|------------|----------|----------------------|--------|--------|------|------|------|---------|--------|--------|------|------|---------|------|--------|---------|--------------------------|
| | | A [km ²] | P [km] | L [km] | Er | Ff | Cr | H [m] | Hm [m] | Sc [%] | Rr | HI | Lc [km] | C | So [%] | Lt [km] | Dd [km/km ²] |
| | 24027030 | 618.8 | 136.6 | 37.79 | 0.66 | 0.43 | 0.42 | 2970 | 2680 | 42.1% | 0.08 | 0.50 | 46.97 | 0.64 | 2.7% | 1332.00 | 2.15 |
| | 24027050 | 656.1 | 122.4 | 33.11 | 0.74 | 0.55 | 0.51 | 3026 | 2530 | 47.6% | 0.09 | 0.45 | 37.72 | 0.67 | 3.2% | 1232.25 | 2.03 |
| | 24027070 | 1544.8 | 227.5 | 59.6 | 0.66 | 0.44 | 0.38 | 3100 | 2409 | 41.2% | 0.05 | 0.42 | 77.6 | 0.81 | 1.6% | 3349.1 | 2.17 |
| CHICAMOCHA | 24037040 | 155.6 | 63.4 | 17.9 | 0.70 | 0.48 | 0.49 | 2683 | 4117 | 40.8% | 0.15 | 0.69 | 20.1 | 0.03 | 9.7% | 368.8 | 2.37 |
| | 24037030 | 370.1 | 90.6 | 24.6 | 0.78 | 0.61 | 0.57 | 1265 | 2984 | 15.8% | 0.05 | 0.35 | 33.9 | 0.18 | 1.1% | 872.7 | 2.36 |
| | 24037130 | 982.7 | 186.4 | 37.6 | 0.83 | 0.70 | 0.36 | 1314 | 2898 | 17.3% | 0.03 | 0.31 | 45.9 | 0.66 | 0.7% | 2225.0 | 2.26 |
| NARE | 23087180 | 118.7 | 59.9 | 16.6 | 0.66 | 0.43 | 0.42 | 873 | 2062 | 30.2% | 0.05 | 0.53 | 21.3 | 0.56 | 2.0% | 262.9 | 2.13 |
| | 23087160 | 285.3 | 100.3 | 34.2 | 0.70 | 0.24 | 0.36 | 1426 | 1345 | 31.1% | 0.04 | 0.40 | 44.3 | 0.90 | 1.4% | 644.2 | 2.26 |
| | 23087150 | 289.0 | 99.0 | 24.1 | 0.71 | 0.50 | 0.37 | 1014 | 2348 | 22.9% | 0.04 | 0.28 | 35.0 | 0.86 | 0.7% | 657.2 | 2.27 |
| | 23087190 | 1505.1 | 222.1 | 44.4 | 0.87 | 0.77 | 0.38 | 2843 | 1498 | 42.7% | 0.06 | 0.41 | 63.0 | 0.79 | 1.7% | 3234.1 | 2.15 |
| YAGUARA | 21087050 | 53.7 | 39.9 | 15.4 | 0.48 | 0.23 | 0.42 | 2175 | 2185 | 50.6% | 0.14 | 0.56 | 19.8 | 0.20 | 7.9% | 105.1 | 1.96 |
| | 21087040 | 103.8 | 48.7 | 16.0 | 0.64 | 0.41 | 0.55 | 2522 | 1598 | 50.8% | 0.16 | 0.37 | 19.7 | 0.53 | 6.0% | 198.0 | 1.91 |
| | 21087070 | 485.1 | 125.4 | 27.4 | 0.80 | 0.65 | 0.39 | 2638 | 1446 | 38.4% | 0.10 | 0.34 | 38.2 | 0.55 | 1.6% | 1046.2 | 2.16 |
| | 21087080 | 663.2 | 132.9 | 28.9 | 0.94 | 0.79 | 0.47 | 2659 | 1394 | 38.4% | 0.09 | 0.33 | 40.4 | 0.55 | 1.5% | 1435.6 | 2.17 |
| SALDAÑA | 22037010 | 106.6 | 63.1 | 21.1 | 0.38 | 0.24 | 0.34 | 2503 | 1318 | 44.3% | 0.12 | 0.30 | 31.4 | 0.74 | 3.6% | 226.6 | 2.13 |
| | 22057050 | 172.7 | 72.2 | 27.1 | 0.49 | 0.24 | 0.42 | 1443 | 1270 | 40.7% | 0.05 | 0.54 | 33.4 | 0.39 | 2.6% | 369.6 | 2.14 |
| | 22067010 | 281.4 | 92.7 | 29.4 | 0.62 | 0.33 | 0.41 | 2540 | 994 | 31.7% | 0.09 | 0.27 | 43.6 | 0.76 | 2.9% | 610.3 | 2.17 |
| | 22017010 | 651.6 | 139.7 | 41.8 | 0.61 | 0.37 | 0.42 | 3857 | 2927 | 61.5% | 0.09 | 0.61 | 53.1 | 0.39 | 4.3% | 1336.4 | 2.05 |
| | 22027020 | 911.9 | 175.6 | 49.9 | 0.61 | 0.37 | 0.37 | 3232 | 2966 | 51.5% | 0.06 | 0.58 | 66.3 | 0.30 | 3.3% | 1731.6 | 1.90 |
| | 22027010 | 1373.0 | 222.7 | 49.9 | 0.74 | 0.55 | 0.35 | 3698 | 2616 | 48.3% | 0.07 | 0.55 | 94.1 | 0.40 | 2.5% | 2713.5 | 1.98 |

A continuación, se analizan los resultados obtenidos teniendo en cuenta las componentes que describen la geometría de la cuenca, relieve y corrientes de drenaje.

5.3.1 Tamaño y forma de la cuenca

En la **Tabla 21** se consignan los resultados correspondientes a la geometría y tamaño para cada estación de drenaje.

Tabla 21. Parámetros geomorfológicos correspondientes a la forma y geometría de la cuenca

| Subzona | Estación | A [km ²] | P [km] | L [km] | Er | Ff | Cr | Forma |
|------------|----------|----------------------|--------|--------|------|------|------|----------|
| FONCE | 24027060 | 165.1 | 77.1 | 20.81 | 0.62 | 0.38 | 0.35 | Elongada |
| | 24027040 | 182.2 | 71.2 | 16.55 | 0.82 | 0.66 | 0.45 | Circular |
| | 24027030 | 618.8 | 136.6 | 37.79 | 0.66 | 0.43 | 0.42 | Circular |
| | 24027050 | 656.1 | 122.4 | 33.11 | 0.74 | 0.55 | 0.51 | Circular |
| | 24027070 | 1544.8 | 227.5 | 59.56 | 0.66 | 0.44 | 0.38 | Circular |
| CHICAMOCHA | 24037040 | 155.6 | 63.4 | 17.93 | 0.70 | 0.48 | 0.49 | Circular |

| Subzona | Estación | A [km ²] | P [km] | L [km] | Er | Ff | Cr | Forma |
|---------|----------|----------------------|--------|--------|------|------|------|----------|
| | 24037030 | 370.1 | 90.6 | 24.58 | 0.78 | 0.61 | 0.57 | Circular |
| | 24037130 | 982.7 | 186.4 | 37.59 | 0.83 | 0.70 | 0.36 | Circular |
| NARE | 23087180 | 118.7 | 59.9 | 16.63 | 0.66 | 0.43 | 0.42 | Circular |
| | 23087160 | 285.3 | 100.3 | 34.16 | 0.70 | 0.24 | 0.36 | Circular |
| | 23087150 | 289.0 | 99.0 | 24.08 | 0.71 | 0.50 | 0.37 | Circular |
| | 23087190 | 1505.1 | 222.1 | 44.37 | 0.87 | 0.77 | 0.38 | Circular |
| YAGUARA | 21087050 | 53.7 | 39.9 | 15.44 | 0.48 | 0.23 | 0.42 | Elongada |
| | 21087040 | 103.8 | 48.7 | 15.98 | 0.64 | 0.41 | 0.55 | Circular |
| | 21087070 | 485.1 | 125.4 | 27.40 | 0.80 | 0.65 | 0.39 | Circular |
| | 21087080 | 663.2 | 132.9 | 28.90 | 0.94 | 0.79 | 0.47 | Circular |
| SALDAÑA | 22037010 | 106.6 | 63.1 | 21.13 | 0.38 | 0.24 | 0.34 | Elongada |
| | 22057050 | 172.7 | 72.2 | 27.08 | 0.49 | 0.24 | 0.42 | Elongada |
| | 22067010 | 281.4 | 92.7 | 29.44 | 0.62 | 0.33 | 0.41 | Circular |
| | 22017010 | 651.6 | 139.7 | 41.84 | 0.61 | 0.37 | 0.42 | Circular |
| | 22027020 | 911.9 | 175.6 | 49.87 | 0.61 | 0.37 | 0.37 | Circular |
| | 22027010 | 1373.0 | 222.7 | 49.92 | 0.74 | 0.55 | 0.35 | Circular |

En lo referente al área de drenaje se obtuvieron valores entre 53.70 km² y 1544.8 km² con un valor medio de 530 km²; 13 de las 22 estaciones presentan áreas menores al promedio siendo las más pequeñas las correspondientes a las estaciones Bocatoma (21087050) e Hidroeléctrica (21087040) en Yaguará, y La esperanza (22037010) en Saldaña las cuales no alcanzan los 110 km²; mientras que las áreas de drenaje más grandes corresponden a las estaciones Mérida (24027070) en Fonce, La Garrucha (23087190) en Nare y El Cóndor (22027010) en Saldaña las cuales superan el valor de los 1000 km². Basados en el estudio de (Duvert et al., 2011) mencionado en el ítem 3.5.1 se esperaría que las áreas más pequeñas sean más susceptibles a presentar comportamiento torrencial.

Con base en la teoría se esperaría que las cuencas con comportamientos torrenciales presenten formas más cercanas a la circularidad representados por los parámetros Relación de Elongación, Factor de forma y relación de circularidad; ya que en estas formas de cuenca los tiempos de viaje son más cortos y el desarrollo de los picos de inundación en el hidrograma ocurren durante lapsos de tiempo más reducidos haciendo más difícil la medición y registro de dichos eventos (Sukristiyanti et al., 2017).

Los resultados (ver **Tabla 21**) muestran cuencas elongadas y circulares, con valores para la relación de elongación que varían entre 0.38 y 0.94, para factor de forma varían entre 0.23 y 0.77 y para la

relación de circularidad varían entre 0.34 y 0.57; de lo cual se observa que las cuencas con mayor tendencia a la forma circular son la estación Hacienda Venecia (21087080) en Yaguará, La Garrucha (23087190) en Nare y La Reforma (24037130) en Chicamocha, en las cuales se esperaría tener una rápida respuesta de la cuenca y mayor susceptibilidad a la torrencialidad; por otra parte se tienen las áreas de drenaje con forma más elongada que corresponden a las estaciones La esperanza (22037010) y Puente La hamaca (22057050) en Saldaña, y Bocatoma (21087050) en Yaguará, donde no se espera susceptibilidad al comportamiento torrencial. A partir de los parámetros de forma evaluados se obtiene que solo 4 de las 22 estaciones de estudio presentan una forma elongada en donde no se propicia escenarios favorables para la torrencialidad.

Al relacionar estos indicadores de forma con los indicadores de torrencialidad obtenidos en el numeral 5.2 (Ver **Tabla 22**), se observa que las estaciones con valores más grandes de indicadores I_{1L} , I_{2L} , e I_{3L} para caudal líquido presentan forma circular como es el caso de las estaciones Hacienda El Jardín (21087070) y Hacienda Venecia (21087080) en Yaguará, y El Palo (24037030) en Chicamocha. Aunque dicha correlación no es clara en las demás cuencas ya que se observan cuencas con forma circular que presentan bajos valores de estos indicadores, como por ejemplo la estación La Garrucha (23087190) de Nare que presenta los I_{1L} , I_{2L} , e I_{3L} más pequeños y un área de drenaje cercano a la forma circular. Para los indicadores I_{2S} e I_{3S} correspondiente a caudal sólido las 2 estaciones con mayor valor presentan alta circularidad, aunque al igual que en los indicadores para caudal líquido no se observa una correlación clara, pues también se observan estaciones con altos valores de este indicador pero que no son circulares y viceversa como por ejemplo la estación Puente La hamaca (22057050) en Saldaña que presenta un $I_{2S} = 3984.7$ e $I_{3S} = 29615.5$ para caudal sólido pero su forma es clasificada como no circular o elongada.

Tabla 22. Comparación indicadores de torrencialidad e Indicadores de forma

| Subzona | Estación | I_{1L} | I_{2L} | I_{3L} | I_{2S} | I_{3S} | A [km ²] | P [km] | L [km] | Er | Ff | Cr |
|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------------------|--------|--------|------|------|------|
| YAGUARA | 21087070 | 389.4 | 66.7 | 426.9 | 3356.0 | 21475.4 | 485.1 | 125.4 | 27.40 | 0.80 | 0.65 | 0.39 |
| YAGUARA | 21087080 | 212.3 | 55.8 | 345.3 | 7699.4 | 47611.4 | 663.2 | 132.9 | 28.90 | 0.94 | 0.79 | 0.47 |
| CHICAMOCCHA | 24037030 | 181.5 | 24.9 | 155.1 | 1039.6 | 6481.6 | 370.1 | 90.6 | 24.58 | 0.78 | 0.61 | 0.57 |
| SALDANA | 22067010 | 141.9 | 28.6 | 195.3 | 335.5 | 2289.6 | 281.4 | 92.7 | 29.44 | 0.57 | 0.33 | 0.41 |
| SALDANA | 22037010 | 137.1 | 24.6 | 199.4 | 988.0 | 8019.3 | 106.6 | 63.1 | 21.13 | 0.49 | 0.24 | 0.34 |
| SALDANA | 22057050 | 134.7 | 32.8 | 243.4 | 3984.7 | 29615.5 | 172.7 | 72.2 | 27.08 | 0.49 | 0.24 | 0.42 |
| NARE | 23087150 | 87.9 | 17.5 | 98.5 | 456.3 | 2570.3 | 289.0 | 99.0 | 24.08 | 0.71 | 0.50 | 0.37 |
| YAGUARA | 21087040 | 73.0 | 18.2 | 196.4 | 3243.3 | 35045.6 | 103.8 | 48.7 | 15.98 | 0.64 | 0.41 | 0.55 |
| CHICAMOCCHA | 24037130 | 50.5 | 16.6 | 84.0 | 4131.1 | 20893.9 | 982.7 | 186.4 | 37.59 | 0.83 | 0.70 | 0.36 |

| Subzona | Estación | l _{1L} | l _{2L} | l _{3L} | l _{2S} | l _{3S} | A [km ²] | P [km] | L [km] | Er | Ff | Cr |
|------------|----------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------------|--------|--------|------|------|------|
| FONCE | 24027030 | 37.0 | 9.1 | 59.3 | 331.4 | 2165.6 | 618.8 | 136.6 | 37.79 | 0.66 | 0.43 | 0.42 |
| CHICAMOCHA | 24037040 | 25.4 | 9.4 | 111.2 | 1523.3 | 17947.9 | 155.6 | 63.4 | 17.93 | 0.70 | 0.48 | 0.49 |
| SALDANA | 22017010 | 24.6 | 9.7 | 66.3 | 313.0 | 2133.6 | 651.6 | 139.7 | 41.84 | 0.61 | 0.37 | 0.42 |
| FONCE | 24027070 | 21.9 | 7.2 | 34.5 | 1563.0 | 7545.2 | 1544.8 | 227.5 | 59.56 | 0.66 | 0.44 | 0.38 |
| FONCE | 24027060 | 20.5 | 6.5 | 53.8 | 559.0 | 4635.1 | 165.1 | 77.1 | 20.81 | 0.62 | 0.38 | 0.35 |
| YAGUARA | 21087050 | 19.6 | 9.4 | 106.6 | 1062.8 | 12097.3 | 53.7 | 39.9 | 15.44 | 0.48 | 0.23 | 0.42 |
| FONCE | 24027050 | 18.0 | 7.4 | 54.9 | 766.6 | 5651.4 | 656.1 | 122.4 | 33.11 | 0.74 | 0.55 | 0.51 |
| FONCE | 24027040 | 17.4 | 7.5 | 61.3 | 149.3 | 1224.8 | 182.2 | 71.2 | 16.55 | 0.82 | 0.66 | 0.45 |
| NARE | 23087160 | 14.6 | 6.9 | 40.5 | 140.0 | 823.0 | 285.3 | 100.3 | 34.16 | 0.70 | 0.24 | 0.36 |
| SALDANA | 22027020 | 14.4 | 6.3 | 37.4 | 2116.5 | 12544.2 | 911.9 | 175.6 | 49.87 | 0.61 | 0.37 | 0.37 |
| NARE | 23087180 | 13.2 | 6.7 | 56.8 | 152.9 | 1289.0 | 118.7 | 59.9 | 16.63 | 0.66 | 0.43 | 0.42 |
| SALDANA | 22027010 | 10.5 | 5.4 | 26.5 | 311.6 | 1521.3 | 1373.0 | 222.7 | 49.92 | 0.74 | 0.55 | 0.35 |
| NARE | 23087190 | 7.2 | 2.9 | 18.0 | 840.0 | 5130.0 | 1505.1 | 222.1 | 44.37 | 0.87 | 0.77 | 0.38 |

5.3.2 Relieve de la cuenca

En la **Tabla 23** se consignan los resultados correspondientes a los indicadores que describen el relieve para cada estación de drenaje.

Tabla 23. Parámetros geomorfológicos correspondientes al relieve de la cuenca

| Subzona | Estación | H [m] | Hm [m] | Sc [%] | Rr | HI |
|------------|----------|-------|--------|--------|------|------|
| FONCE | 24027060 | 2198 | 1936 | 47.2% | 0.11 | 0.35 |
| | 24027040 | 1310 | 1842 | 29.3% | 0.08 | 0.24 |
| | 24027030 | 2970 | 2680 | 42.1% | 0.08 | 0.50 |
| | 24027050 | 3026 | 2530 | 47.6% | 0.09 | 0.45 |
| | 24027070 | 3100 | 2409 | 41.2% | 0.05 | 0.42 |
| CHICAMOCHA | 24037040 | 2683 | 4117 | 40.8% | 0.15 | 0.69 |
| | 24037030 | 1265 | 2984 | 15.8% | 0.05 | 0.35 |
| | 24037130 | 1314 | 2898 | 17.3% | 0.03 | 0.31 |
| NARE | 23087180 | 873 | 2062 | 30.2% | 0.05 | 0.53 |
| | 23087160 | 1426 | 1345 | 31.1% | 0.04 | 0.40 |
| | 23087150 | 1014 | 2348 | 22.9% | 0.04 | 0.28 |
| | 23087190 | 2843 | 1498 | 42.7% | 0.06 | 0.41 |
| YAGUARA | 21087050 | 2175 | 2185 | 50.6% | 0.14 | 0.56 |
| | 21087040 | 2522 | 1598 | 50.8% | 0.16 | 0.37 |
| | 21087070 | 2638 | 1446 | 38.4% | 0.10 | 0.34 |
| | 21087080 | 2659 | 1394 | 38.4% | 0.09 | 0.33 |
| SALDAÑA | 22037010 | 2503 | 1318 | 44.3% | 0.12 | 0.30 |
| | 22057050 | 1443 | 1270 | 40.7% | 0.05 | 0.54 |

| Subzona | Estación | H [m] | Hm [m] | Sc [%] | Rr | HI |
|---------|----------|-------|--------|--------|------|------|
| | 22067010 | 2540 | 994 | 31.7% | 0.09 | 0.27 |
| | 22017010 | 3857 | 2927 | 61.5% | 0.09 | 0.61 |
| | 22027020 | 3232 | 2966 | 51.5% | 0.06 | 0.58 |
| | 22027010 | 3698 | 2616 | 48.3% | 0.07 | 0.55 |

La altura media varía entre 994 y 4117 msnm sobre el nivel del mar, siendo las que presentan mayor altura media las estaciones Guaicán (24037040) y El Palo (24037030) en Chicamocha, y Gaitania (22027020) en Saldaña; y las que presentan menor altura media las estaciones Puente Ortega (22067010), Puente La hamaca (22057050) y La esperanza (22037010) en Saldaña que no superan el valor de 1400 m sobre el nivel del mar.

En la variable de la pendiente media de la cuenca se obtuvieron resultados que varían entre 15.8 % y 61.5 %, siendo las estaciones que presentan mayor pendiente Bocas (22017010) y Gaitania (22027020) en Saldaña, e Hidroeléctrica (21087040) en Yaguará que superan la pendiente del 50 %; y las áreas que presentan menores pendientes El Palo (24037030) y La Reforma (24037130) en Chicamocha, y Puente Real (23087150) en Nare las cuales no superan la pendiente media de 25 %. Basados en la teoría, mayores pendientes medias de las cuencas proporcionarían escenarios favorables para los procesos erosivos y con ello la producción de sedimentos, además de favorecer las altas velocidades del agua en los cauces.

La curva hipsométrica de las áreas de drenaje (consignadas en la **Figura 38**), representada como valor en su integral o área bajo la curva, representa un parámetro útil para comparar diferentes cuencas sin importar su tamaño, el cual permite tener un indicador del grado de desequilibrio entre las fuerzas erosivas y tectónicas (Alhamed & Ahmad, 2017). En lo correspondiente a esta variable se obtuvieron valores entre 0.24 y 0.69, siendo las estaciones Guaicán (24037040) en Chicamocha, Bocas (22017010) y Gaitania (22027020) en Saldaña las que presentan valores más altos ya que superan el valor de 0.50 y también tienen valores altos de altura media; mientras que las que presentan valores más pequeños corresponden a las estaciones Puente Real (23087150) en Nare, Puente Ortega (22067010) en Saldaña y Puente Cabra (24027040) en Fonce las cuales no alcanzan el valor de integral hipsométrica de 0.30. Se observa en los resultados de la **Tabla 23** que hay 7 áreas de drenaje con valor de Integral hipsométrica mayor a 0.50 lo que indica que corresponden a cuencas relativamente jóvenes y con gran potencial erosivo en las cuales un mayor porcentaje de sus áreas se encuentra en las zonas altas de la cuenca lo que propicia un escenario favorable para producción de sedimentos.

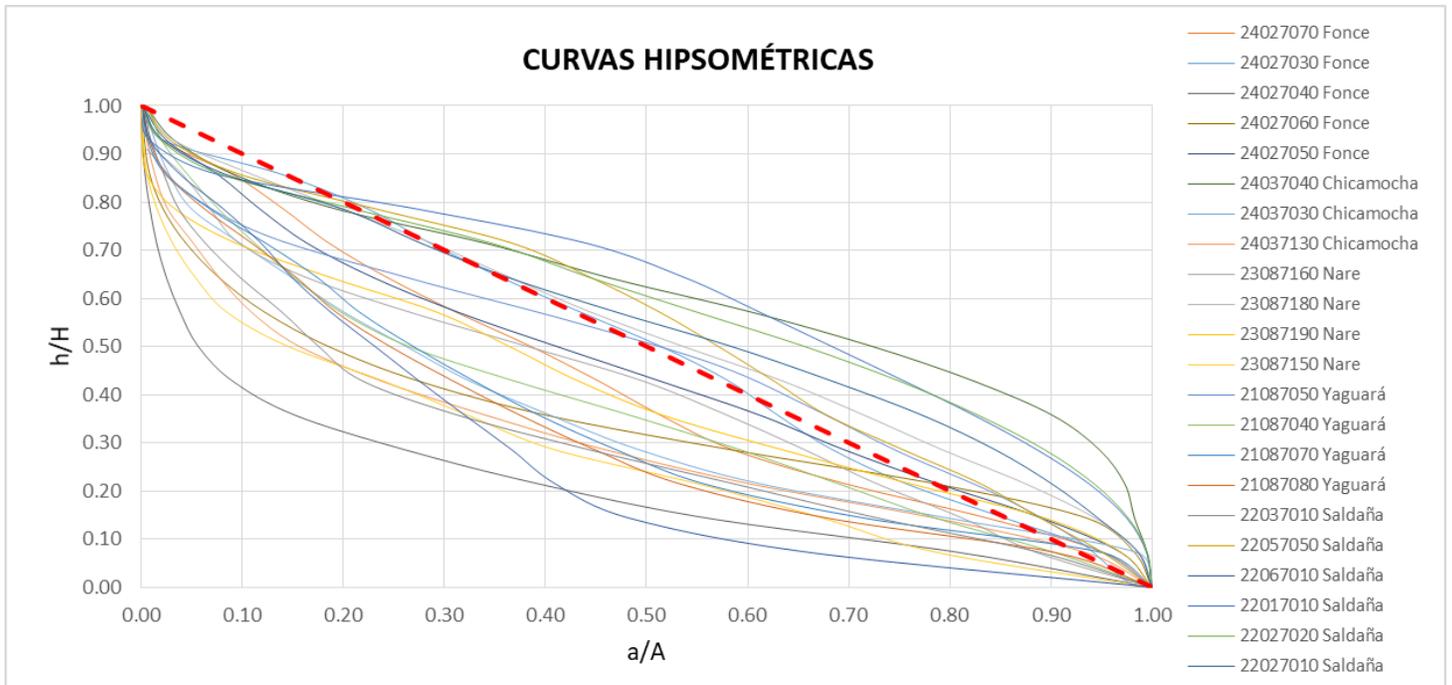


Figura 38. Curvas hipsométricas correspondientes a las áreas de estudio

En la **Tabla 24** se realiza la comparación de los parámetros geomorfológicos de relieve con los indicadores de torrencialidad obtenidos en el literal 5.2.

Tabla 24. Comparación de indicadores de torrencialidad e indicadores de relieve de la cuenca

| Subzona | Estación | I_{1L} | I_{2L} | I_{3L} | I_{2S} | I_{3S} | Hmin [m] | Hmax [m] | H [m] | Hm [m] | Sc [%] | Rr | HI |
|------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-------|--------|--------|------|------|
| YAGUARA | 21087070 | 389.4 | 66.7 | 426.9 | 3356.0 | 21475.4 | 601 | 3239 | 2638 | 1446 | 38.4% | 0.10 | 0.34 |
| YAGUARA | 21087080 | 212.3 | 55.8 | 345.3 | 7699.4 | 47611.4 | 587 | 3246 | 2659 | 1394 | 38.4% | 0.09 | 0.33 |
| CHICAMOCHA | 24037030 | 181.5 | 24.9 | 155.1 | 1039.6 | 6481.6 | 2570 | 3835 | 1265 | 2984 | 15.8% | 0.05 | 0.35 |
| SALDANA | 22067010 | 141.9 | 28.6 | 195.3 | 335.5 | 2289.6 | 350 | 2890 | 2540 | 994 | 31.7% | 0.09 | 0.27 |
| SALDANA | 22037010 | 137.1 | 24.6 | 199.4 | 988.0 | 8019.3 | 612 | 3115 | 2503 | 1318 | 44.3% | 0.12 | 0.30 |
| SALDANA | 22057050 | 134.7 | 32.8 | 243.4 | 3984.7 | 29615.5 | 552 | 1995 | 1443 | 1270 | 40.7% | 0.05 | 0.54 |
| NARE | 23087150 | 87.9 | 17.5 | 98.5 | 456.3 | 2570.3 | 2091 | 3105 | 1014 | 2348 | 22.9% | 0.04 | 0.28 |
| YAGUARA | 21087040 | 73.0 | 18.2 | 196.4 | 3243.3 | 35045.6 | 724 | 3246 | 2522 | 1598 | 50.8% | 0.16 | 0.37 |
| CHICAMOCHA | 24037130 | 50.5 | 16.6 | 84.0 | 4131.1 | 20893.9 | 2521 | 3835 | 1314 | 2898 | 17.3% | 0.03 | 0.31 |
| FONCE | 24027030 | 37.0 | 9.1 | 59.3 | 331.4 | 2165.6 | 1305 | 4275 | 2970 | 2680 | 42.1% | 0.08 | 0.50 |
| CHICAMOCHA | 24037040 | 25.4 | 9.4 | 111.2 | 1523.3 | 17947.9 | 2585 | 5268 | 2683 | 4117 | 40.8% | 0.15 | 0.69 |
| SALDANA | 22017010 | 24.6 | 9.7 | 66.3 | 313.0 | 2133.6 | 740 | 4597 | 3857 | 2927 | 61.5% | 0.09 | 0.61 |
| FONCE | 24027070 | 21.9 | 7.2 | 34.5 | 1563.0 | 7545.2 | 1185 | 4285 | 3100 | 2409 | 41.2% | 0.05 | 0.42 |
| FONCE | 24027060 | 20.5 | 6.5 | 53.8 | 559.0 | 4635.1 | 1215 | 3413 | 2198 | 1936 | 47.2% | 0.11 | 0.35 |
| YAGUARA | 21087050 | 19.6 | 9.4 | 106.6 | 1062.8 | 12097.3 | 1064 | 3239 | 2175 | 2185 | 50.6% | 0.14 | 0.56 |
| FONCE | 24027050 | 18.0 | 7.4 | 54.9 | 766.6 | 5651.4 | 1258 | 4284 | 3026 | 2530 | 47.6% | 0.09 | 0.45 |
| FONCE | 24027040 | 17.4 | 7.5 | 61.3 | 149.3 | 1224.8 | 1589 | 2899 | 1310 | 1842 | 29.3% | 0.08 | 0.24 |

| Subzona | Estación | I_{1L} | I_{2L} | I_{3L} | I_{2S} | I_{3S} | Hmin [m] | Hmax [m] | H [m] | Hm [m] | Sc [%] | Rr | HI |
|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-------|--------|--------|------|------|
| NARE | 23087160 | 14.6 | 6.9 | 40.5 | 140.0 | 823.0 | 805 | 2231 | 1426 | 1345 | 31.1% | 0.04 | 0.40 |
| SALDANA | 22027020 | 14.4 | 6.3 | 37.4 | 2116.5 | 12544.2 | 1200 | 4432 | 3232 | 2966 | 51.5% | 0.06 | 0.58 |
| NARE | 23087180 | 13.2 | 6.7 | 56.8 | 152.9 | 1289.0 | 1630 | 2503 | 873 | 2062 | 30.2% | 0.05 | 0.53 |
| SALDANA | 22027010 | 10.5 | 5.4 | 26.5 | 311.6 | 1521.3 | 734 | 4432 | 3698 | 2616 | 48.3% | 0.07 | 0.55 |
| NARE | 23087190 | 7.2 | 2.9 | 18.0 | 840.0 | 5130.0 | 419 | 3262 | 2843 | 1498 | 42.7% | 0.06 | 0.41 |

Al comparar los indicadores de torrencialidad y los indicadores de relieve de las cuencas no se alcanza a apreciar algún tipo de correlación clara entre ellos, pues se observa que hay estaciones que presentan altos indicadores I_{1L} , I_{2L} e I_{3L} para caudal líquido con bajos valores de integral hipsométrica como por ejemplo las estaciones Puente Ortega (22067010) y La esperanza (22037010) en Saldaña que no superan el valor de 0.30, y así mismo se observan altos valores de estos indicadores con valores de pendiente media de la cuenca que no son los más altos ya que no superan el 40 %, por ejemplo la estación El Palo (24037030) en Chicamocha que es clasificada como torrencial pero su pendiente no supera el 16%.

La misma apreciación se realiza para los indicadores I_{2S} e I_{3S} de caudal sólido ya que de las 6 estaciones con alto valor de estos indicadores 4 corresponden a valores de integral hipsométrica menores al 0.40 y con respecto a las pendientes de cuenca las 2 estaciones con los valores más altos del indicador no superan el 40 %, también se pueden observar estaciones con bajos valores de indicadores y con altos valores de integral hipsométrica y pendiente media de la cuenca.

Cuencas clasificadas como torrenciales, como por ejemplo la correspondiente a la estación El Palo (24037030) en Chicamocha, su pendiente no supera el 16%. Solo una cuenca torrencial está superando el valor de integral hipsométrica de 0.50 que indicaría que es una cuenca productora de sedimentos. Sin embargo, estas relaciones se revisarán en detalle en la sección de Análisis de Componentes Principales.

5.3.3 Red de drenaje de la cuenca

En la **Tabla 25** se consignan los resultados de los indicadores que describen la red de drenaje para cada estación de monitoreo.

Tabla 25. Parámetros geomorfológicos correspondientes al drenaje de la cuenca

| Subzona | Estación | Lc [km] | C | So [%] | Lt [km] | Dd [km/km ²] |
|------------|----------|---------|------|--------|---------|--------------------------|
| FONCE | 24027060 | 26.28 | 0.45 | 2.8% | 339.45 | 2.06 |
| | 24027040 | 19.17 | 0.63 | 1.4% | 417.93 | 2.29 |
| | 24027030 | 46.97 | 0.64 | 2.7% | 1332.00 | 2.15 |
| | 24027050 | 37.72 | 0.67 | 3.2% | 1232.25 | 2.03 |
| | 24027070 | 77.65 | 0.81 | 1.6% | 3349.05 | 2.17 |
| CHICAMOCHA | 24037040 | 20.07 | 0.03 | 9.7% | 368.78 | 2.37 |
| | 24037030 | 33.93 | 0.18 | 1.1% | 872.66 | 2.36 |
| | 24037130 | 45.93 | 0.66 | 0.7% | 2224.99 | 2.26 |
| NARE | 23087180 | 21.35 | 0.56 | 2.0% | 262.89 | 2.13 |
| | 23087160 | 44.31 | 0.90 | 1.4% | 644.24 | 2.26 |
| | 23087150 | 35.04 | 0.86 | 0.7% | 657.24 | 2.27 |
| | 23087190 | 62.98 | 0.79 | 1.7% | 3234.10 | 2.15 |
| YAGUARA | 21087050 | 19.78 | 0.20 | 7.9% | 105.12 | 1.96 |
| | 21087040 | 19.68 | 0.53 | 6.0% | 198.01 | 1.91 |
| | 21087070 | 38.24 | 0.55 | 1.6% | 1046.16 | 2.16 |
| | 21087080 | 40.37 | 0.55 | 1.5% | 1435.63 | 2.17 |
| SALDAÑA | 22037010 | 31.39 | 0.74 | 3.6% | 226.56 | 2.13 |
| | 22057050 | 33.36 | 0.39 | 2.6% | 369.65 | 2.14 |
| | 22067010 | 43.62 | 0.76 | 2.9% | 610.25 | 2.17 |
| | 22017010 | 53.14 | 0.39 | 4.3% | 1336.44 | 2.05 |
| | 22027020 | 66.28 | 0.30 | 3.3% | 1731.61 | 1.90 |
| | 22027010 | 94.08 | 0.40 | 2.5% | 2713.53 | 1.98 |

En lo referente a las longitudes de cauce principal se obtuvieron valores entre 19.17 y 94.08 km de recorrido, siendo las que poseen mayor longitud de cauce las estaciones El Cóndor (22027010) y Gaitania (22027020) en Saldaña, Mérida (24027070) en Fonce y La Garrucha (23087190) en Nare las cuales superan los 60 km de recorrido. Lo anterior es consistente con que son las áreas de drenaje de mayor tamaño. Por otro lado, los recorridos de cauce principal más cortos se encuentran en las estaciones Puente Cabra (24027040) en Fonce, Bocatoma (21087050) e Hidroeléctrica (21087040) en Yaguará, y Guacán (24037040) en Chicamocha con longitudes muy cercanas a los 20 km de recorrido.

En cuanto a la longitud total de toda la red de drenaje se obtuvieron valores entre 3235 y 105 km, siendo las que presentan mayor longitud de drenaje las estaciones La Garrucha (23087190) en Nare,

El Cóndor (22027010) en Saldaña y Mérida (24027070) en Fonce. Por otro lado, las que presentan menor longitud total de drenaje corresponden a las estaciones Bocatoma (21087050) e Hidroeléctrica (21087040) en Yaguará, La esperanza (22037010) en Saldaña que están entre las áreas de drenaje más pequeñas.

Para evaluar los drenajes en función del tamaño de la cuenca se utilizó la densidad drenaje para la cual se obtuvieron resultados que varían entre 1.90 y 2.37 Km/Km² con valores más altos en las estaciones Guaicán (24037040) y El Palo (24037030) en Chicamocha, y Puente Cabra (24027040) en Fonce que superan el valor de 2.29 km/km² donde se esperaría que se den respuestas hidrológicas más rápidas ya que son cuencas muy bien drenadas. Las que presentan los valores más pequeños corresponden a las estaciones Gaitania (22027020) en Saldaña, Hidroeléctrica (21087040) y Bocatoma (21087050) en Yaguará que no alcanzan el valor de 2.0 Km/Km².

En lo referente a la pendiente media del cauce principal se obtuvieron resultados que varían entre 9.7 % y 0.7 %, únicamente 4 de las 22 estaciones presentan pendientes mayores que 4 % mientras el resto están por debajo de este valor. Las pendientes más altas corresponden a las estaciones Guaicán (24037040) en Chicamocha, Bocatoma (21087050) e Hidroeléctrica (21087040) en Yaguará que sobrepasan el valor de pendiente de 6 %. Las de pendientes más bajas corresponden a La Reforma (24037130) y El Palo (24037030) en Chicamocha, y Puente Real (23087150) en Nare las cuales no alcanzan el 1.2 % de pendiente media en sus cauces principales.

Al evaluar el perfil longitudinal del cauce principal se obtuvieron perfiles con concavidades que varían entre 0.90 y 0.03, siendo las que presentan mayor concavidad en sus perfiles las estaciones correspondientes a Caramanta (23087160) y Puente Real (23087150) en Nare, y Mérida (24027070) en Fonce las cuales superan el valor de 0.80; mientras que las estaciones que presentan menor concavidad corresponden a Guaicán (24037040) y El Palo (24037030) en Chicamocha, y Bocatoma (21087050) en Yaguará las cuales no superan la concavidad de 0.20. Aparte de evaluar la concavidad del perfil es importante identificar en él los “Knickpoints” o puntos de quiebre ya que estos representan puntos en donde se concentran los procesos erosivos y son típicos de ríos de montaña. Ya que los perfiles longitudinales fueron obtenidos de un Modelo de Elevación Digital con buena resolución (tamaño de celda 30 m x 30 m para cuencas de estudio que no poseen áreas menores a 50 km²) se estima que los perfiles obtenidos dan una adecuada representación de los cauces correspondientes a cada cuenca.

En la **Figura 39**, **Figura 40**, **Figura 41**, **Figura 42** y **Figura 43** se muestran los perfiles longitudinales de los ríos principales de las áreas de drenaje de estudio, clasificadas por subzonas. En los perfiles longitudinales correspondientes a las áreas de drenaje de la subzona de Fonce (**Figura 39**) no se observan “knickpoints” muy pronunciados, lo que puede corresponder a sus bajos valores de producción de sedimentos con relación al resto de cuencas de estudio obtenidos en el numeral 5.1.2.

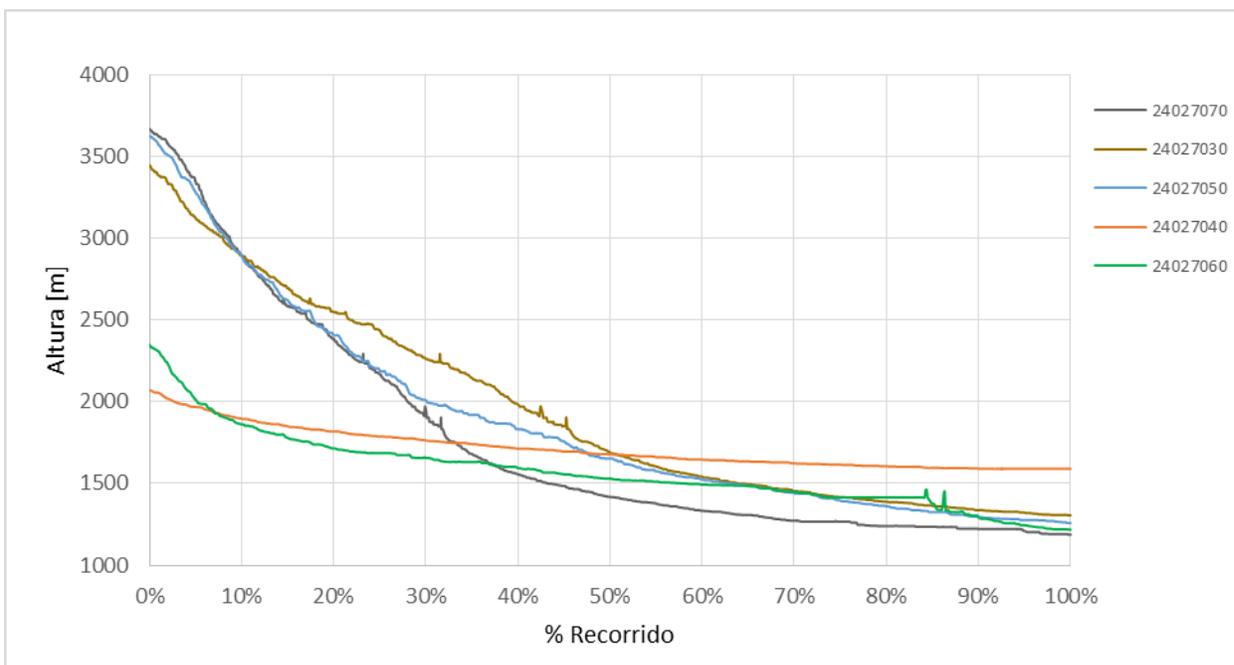


Figura 39. Perfiles longitudinales de las estaciones correspondientes a la subzona Fonce

En los perfiles longitudinales correspondientes a las áreas de drenaje de la subzona de Chicamocha (**Figura 40**) se observa que el perfil de la estación Guaicán (24037040) presenta varios puntos de quiebre muy pronunciados en comparación a las otras dos estaciones de la subzona. Esto indicaría que es una cuenca productora de sedimentos lo que corresponde con el valor de su integral hipsométrica, su alta pendiente de cauce y alto coeficiente de torrencialidad obtenidos; en los otros perfiles no se observan puntos de quiebre altamente pronunciados o significativos que puedan indicar procesos erosivos acentuados.

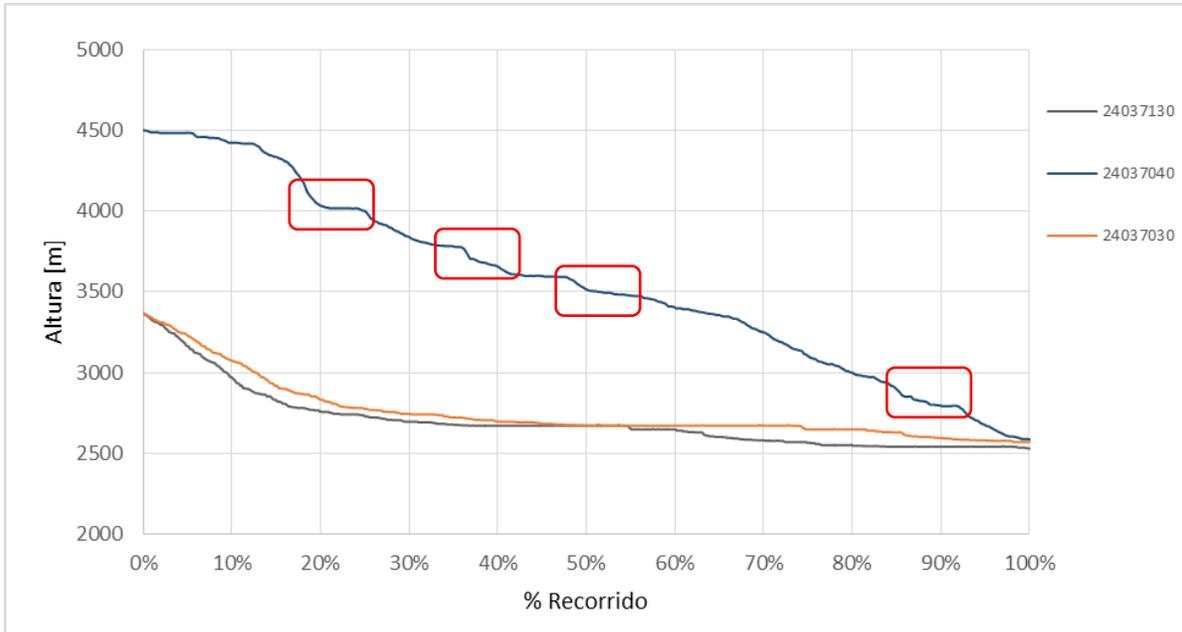


Figura 40. Perfiles longitudinales de las estaciones correspondientes a la subzona Chicamocha

En los perfiles longitudinales correspondientes a las áreas de drenaje de la subzona Nare (**Figura 41**) se observa que el perfil de las estaciones La Garrucha (23087190) y Caramanta (23087160) presentan puntos de quiebre más pronunciados que las otras estaciones indicando que estas estaciones presentan más lugares donde se concentra la erosión y tienen un mayor potencial de producción de sedimentos.

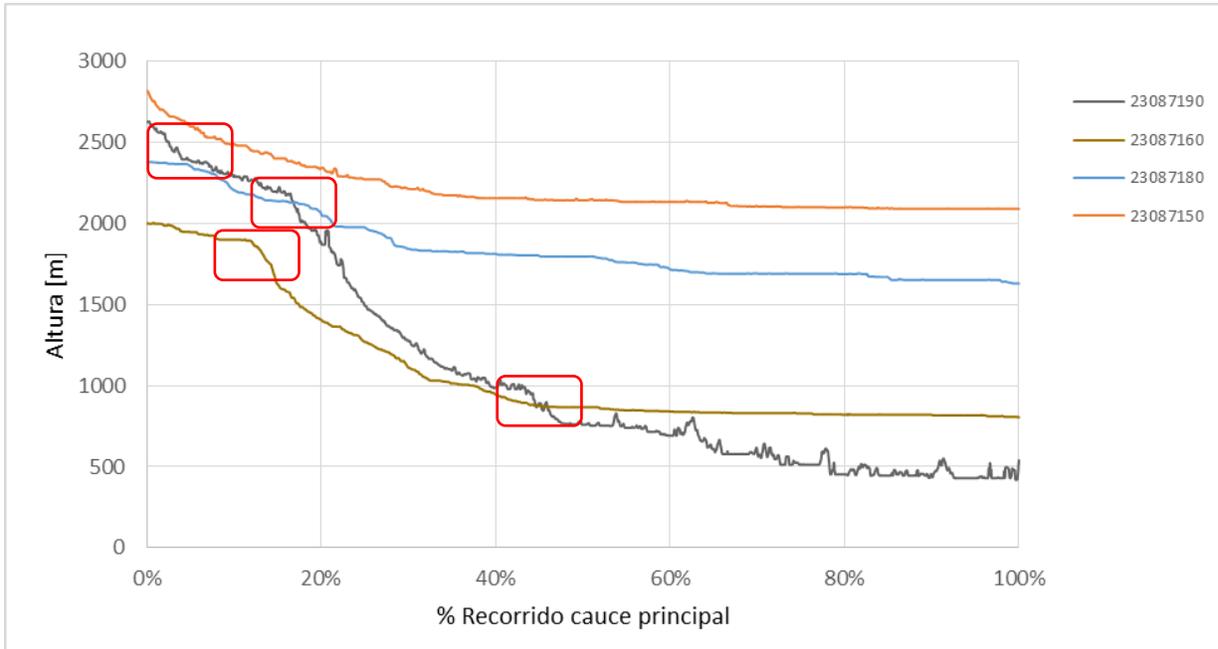


Figura 41. Perfiles longitudinales de las estaciones correspondientes a la subzona Nare

Los perfiles longitudinales correspondientes a las áreas de drenaje de la subzona Yaguará (Figura 42) evidencian perfiles con algunos puntos de quiebre en su recorrido aunque no son tan pronunciados, lo cual indica que su cauce principal no se caracteriza por presentar alto potencial de procesos erosivos al compararlo con los perfiles de las otras subzonas.

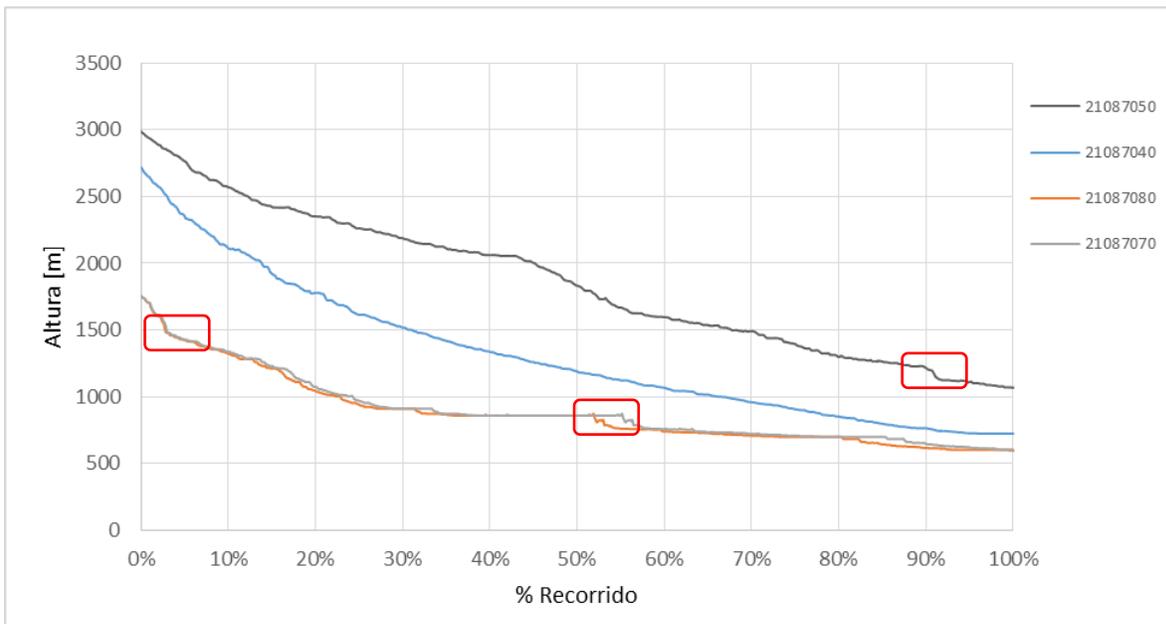


Figura 42. Perfiles longitudinales de las estaciones correspondientes a la subzona Yaguará

En los perfiles longitudinales correspondientes a las áreas de drenaje de la subzona Saldaña (**Figura 43**) se observan puntos de quiebre altamente pronunciados; los perfiles donde más sobresalen los puntos de quiebre corresponden a las estaciones Bocas (22017010) y La esperanza (22037010) que son las que presentan las pendientes de cauce principal mayores en la subzona (4.3 % y 3.6 %), la primera mencionada presenta un alto valor de Integral hipsométrica (HI = 0.61) que sugiere una cuenca en etapa de juventud donde se pueden encontrar altos potenciales de procesos erosivos además de presentar alta pendiente media en su área de drenaje.

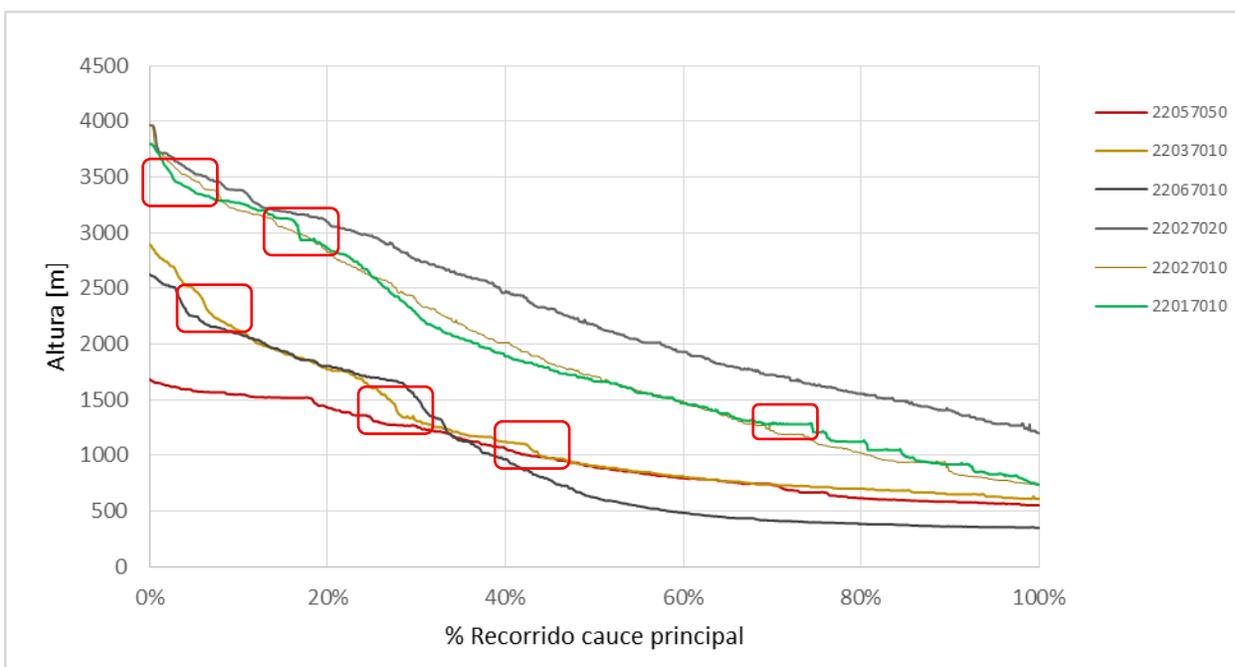


Figura 43. Perfiles longitudinales de las estaciones correspondientes a la subzona Saldaña

En la **Tabla 26** se realiza la comparación de los parámetros geomorfológicos referentes a la red de drenaje con los indicadores de torrencialidad obtenidos en el literal 5.2.

Tabla 26. Comparación indicadores de torrencialidad con indicadores de red de drenaje de las áreas de estudio

| Subzona | Estación | I _{1L} | I _{2L} | I _{3L} | I _{2S} | I _{3S} | Lc [km] | C | So [%] | Lt [km] | Dd [km/km ²] |
|------------|----------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------|------|--------|---------|--------------------------|
| YAGUARA | 21087070 | 389.4 | 66.7 | 426.9 | 3356.0 | 21475.4 | 38.24 | 0.55 | 1.6% | 1046.16 | 2.16 |
| YAGUARA | 21087080 | 212.3 | 55.8 | 345.3 | 7699.4 | 47611.4 | 40.37 | 0.55 | 1.5% | 1435.63 | 2.17 |
| CHICAMOCHA | 24037030 | 181.5 | 24.9 | 155.1 | 1039.6 | 6481.6 | 33.93 | 0.18 | 1.1% | 872.66 | 2.36 |
| SALDANA | 22067010 | 141.9 | 28.6 | 195.3 | 335.5 | 2289.6 | 43.62 | 0.76 | 2.9% | 610.25 | 2.17 |
| SALDANA | 22037010 | 137.1 | 24.6 | 199.4 | 988.0 | 8019.3 | 31.39 | 0.74 | 3.6% | 226.56 | 2.13 |
| SALDANA | 22057050 | 134.7 | 32.8 | 243.4 | 3984.7 | 29615.5 | 33.36 | 0.39 | 2.6% | 369.65 | 2.14 |
| NARE | 23087150 | 87.9 | 17.5 | 98.5 | 456.3 | 2570.3 | 35.04 | 0.86 | 0.7% | 657.24 | 2.27 |

| Subzona | Estación | I_{1L} | I_{2L} | I_{3L} | I_{2S} | I_{3S} | Lc [km] | C | So [%] | Lt [km] | Dd [km/km ²] |
|------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|------|--------|---------|--------------------------|
| YAGUARA | 21087040 | 73.0 | 18.2 | 196.4 | 3243.3 | 35045.6 | 19.68 | 0.53 | 6.0% | 198.01 | 1.91 |
| CHICAMOCHA | 24037130 | 50.5 | 16.6 | 84.0 | 4131.1 | 20893.9 | 45.93 | 0.66 | 0.7% | 2224.99 | 2.26 |
| FONCE | 24027030 | 37.0 | 9.1 | 59.3 | 331.4 | 2165.6 | 46.97 | 0.64 | 2.7% | 1332.00 | 2.15 |
| CHICAMOCHA | 24037040 | 25.4 | 9.4 | 111.2 | 1523.3 | 17947.9 | 20.07 | 0.03 | 9.7% | 368.78 | 2.37 |
| SALDANA | 22017010 | 24.6 | 9.7 | 66.3 | 313.0 | 2133.6 | 53.14 | 0.39 | 4.3% | 1336.44 | 2.05 |
| FONCE | 24027070 | 21.9 | 7.2 | 34.5 | 1563.0 | 7545.2 | 77.65 | 0.81 | 1.6% | 3349.05 | 2.17 |
| FONCE | 24027060 | 20.5 | 6.5 | 53.8 | 559.0 | 4635.1 | 26.28 | 0.45 | 2.8% | 339.45 | 2.06 |
| YAGUARA | 21087050 | 19.6 | 9.4 | 106.6 | 1062.8 | 12097.3 | 19.78 | 0.20 | 7.9% | 105.12 | 1.96 |
| FONCE | 24027050 | 18.0 | 7.4 | 54.9 | 766.6 | 5651.4 | 37.72 | 0.67 | 3.2% | 1232.25 | 2.03 |
| FONCE | 24027040 | 17.4 | 7.5 | 61.3 | 149.3 | 1224.8 | 19.17 | 0.63 | 1.4% | 417.93 | 2.29 |
| NARE | 23087160 | 14.6 | 6.9 | 40.5 | 140.0 | 823.0 | 44.31 | 0.90 | 1.4% | 644.24 | 2.26 |
| SALDANA | 22027020 | 14.4 | 6.3 | 37.4 | 2116.5 | 12544.2 | 66.28 | 0.30 | 3.3% | 1731.61 | 1.90 |
| NARE | 23087180 | 13.2 | 6.7 | 56.8 | 152.9 | 1289.0 | 21.35 | 0.56 | 2.0% | 262.89 | 2.13 |
| SALDANA | 22027010 | 10.5 | 5.4 | 26.5 | 311.6 | 1521.3 | 94.08 | 0.40 | 2.5% | 2713.53 | 1.98 |
| NARE | 23087190 | 7.2 | 2.9 | 18.0 | 840.0 | 5130.0 | 62.98 | 0.79 | 1.7% | 3234.10 | 2.15 |

Al comparar los indicadores de torrencialidad I_{1L} I_{2L} e I_{3L} de caudal líquido con los indicadores de red de drenaje de las áreas de estudio no se observa una correlación o tendencia clara. Con respecto a la pendiente media del cauce se esperaría que las estaciones con mayores pendientes presenten los más altos indicadores de torrencialidad lo cual no se presenta, por ejemplo las estaciones con altas pendientes como son las estaciones Guaicán (24037040) en Chicamocha, Bocatoma (21087050) e Hidroeléctrica (21087040) en Yaguará las cuales superan el 6.0 % de pendiente no presentan los indicadores de torrencialidad más altos; la misma apreciación se realiza para los indicadores I_{2S} e I_{3S} de caudal sólido, pues se observan estaciones con altos valores del indicador pero con bajas pendientes de cauce y viceversa.

En lo que concierne a la concavidad del perfil del cauce principal se esperaría que las estaciones con menores valores de concavidad (que corresponden a ríos de montaña o ríos de gravas) presenten los mayores valores en los indicadores de torrencialidad tanto para caudal líquido como para caudal sólido lo cual no se observa en todas las estaciones, por ejemplo las estaciones que presentan menores valores de concavidad corresponden a Guaicán (24037040) y El Palo (24037030) en Chicamocha y Bocatoma (21087050) en Yaguará y de estas solo la segunda se encuentra clasificada como torrencial, y así mismo hay cuencas con altas concavidades clasificadas como torrenciales.

Con respecto a la densidad de drenaje se esperaría que las estaciones con mayores densidades de drenaje presenten los mayores valores de indicadores de torrencialidad tanto para caudal líquido como para caudal sólido lo cual no se observa, por ejemplo las estaciones con mayores densidades de drenaje como son las correspondientes a Guaicán (24037040) y El Palo (24037030) en Chicamocha, Puente Cabra (24027040) en Fonce y Puente Real (23087150) en Nare (superan los valores de 2.25 Km/Km² de densidad de drenaje) no presentan los indicadores de torrencialidad más altos.

Cabe resaltar que la estación Guaicán (24037040) en Chicamocha presenta la pendiente media del cauce más alta, y además el menor valor de concavidad, mayor densidad de drenaje y más puntos de quiebre en su perfil, lo que no se observa en ninguna otra estación.

5.4 Análisis de Componentes Principales ACP

Se obtienen los resultados de la aplicación de Análisis de Componentes principales implementado en el software *R Statistics* para comparar geomorfología e indicadores de torrencialidad. El análisis se realizó mediante la construcción de una matriz de entrada conformada por 22 individuos (áreas de drenaje) y 23 variables (parámetros geomorfológicos e indicadores de torrencialidad).

La **Tabla 27** muestra cada una de las componentes obtenidas por el ACP y la varianza de toda la información contenida en cada una de ellas en donde se observa que entre las componentes 1, 2 y 3 del análisis se encuentra contenido el 67.56 % (28.82 %, 22.12 % y 16.612 % respectivamente) de la información; sobre las primeras dos componentes (que representan en total el 50.94 % de la información) el software construirá el plano principal para representar los individuos (estaciones) y las variables (geomorfología e indicadores torrencialidad) y representará este porcentaje de información contenida en la matriz inicial. Cabe resaltar que en las componentes 1 y 2 las cuales serán utilizadas para conformar el plano principal solo representan el 50.94 % del total de la información consignada en la matriz de datos original, es decir que en la representación del plano principal se estaría perdiendo un 49.06 % del total de la información en los resultados que muestra el software *R Statistics*.

Tabla 27. Varianza contenida en cada componente del PCA

| Dimensión | Valor propio | % de varianza | Varianza acumulada % |
|------------------|---------------------|----------------------|-----------------------------|
| Dim.1 | 6.629 | 28.823 | 28.823 |

| Dimensión | Valor propio | % de varianza | Varianza acumulada % |
|-----------|--------------|---------------|----------------------|
| Dim.2 | 5.088 | 22.121 | 50.944 |
| Dim.3 | 3.821 | 16.612 | 67.557 |
| Dim.4 | 3.271 | 14.224 | 81.780 |
| Dim.5 | 1.147 | 4.989 | 86.769 |
| Dim.6 | 1.045 | 4.543 | 91.312 |
| Dim.7 | 0.558 | 2.426 | 93.738 |
| Dim.8 | 0.430 | 1.870 | 95.608 |
| Dim.9 | 0.406 | 1.767 | 97.375 |
| Dim.10 | 0.226 | 0.983 | 98.359 |
| Dim.11 | 0.136 | 0.589 | 98.948 |
| Dim.12 | 0.102 | 0.444 | 99.392 |
| Dim.13 | 0.071 | 0.311 | 99.703 |
| Dim.14 | 0.031 | 0.135 | 99.838 |
| Dim.15 | 0.016 | 0.069 | 99.907 |
| Dim.16 | 0.010 | 0.043 | 99.950 |
| Dim.17 | 0.007 | 0.029 | 99.979 |
| Dim.18 | 0.002 | 0.010 | 99.989 |
| Dim.19 | 0.002 | 0.009 | 99.998 |
| Dim.20 | 0.000 | 0.002 | 100.000 |
| Dim.21 | 0.000 | 0.000 | 100.000 |

5.4.1 Análisis por individuos

La **Tabla 28** muestra los valores de las componentes principales para cada estación, con los cuales se representa cada estación en el plano principal; también se encuentran consignados sus respectivos cosenos cuadrados y contribuciones. La forma de evaluar si un individuo (en este caso una cuenca) se encuentra bien representado en el plano principal es por medio de los cosenos cuadrados de cada una de las componentes los cuales se encuentran consignados en la **Tabla 28**; entre más cerca de 1.0 esté la suma de los cosenos cuadrados de las dos componentes mejor representado estará la cuenca en el plano principal. Aquí se puede observar que la mayoría de estaciones que no se encuentran bien representadas en el plano principal (suma de cosenos cuadrados inferior a 0.10), por ejemplo, la estación Caramanta (23087160) en Nare y El Palo (24037030) en Chicamocha, siendo la segunda una cuenca catalogada como torrencial.

Tabla 28. Valores de las componentes principales para cada estación, cosenos cuadrados y porcentajes de contribución de información

| Estación | Dim.1 | Dim.2 | Dim.3 | cos ² dim1 | cos ² dim2 | cos ² dim3 | ctr ₁ | ctr ₂ | ctr ₂ |
|------------|---------|---------|---------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|------------------|------------------|------------------|
| 24037030 | -1.4150 | 1.5944 | -2.4064 | 0.0710 | 0.0901 | 0.2053 | 1.373 | 2.271 | 6.889 |
| 24037040 | -1.7008 | -4.1960 | -0.5473 | 0.0605 | 0.3683 | 0.0063 | 1.983 | 15.730 | 0.356 |
| 24037130 | 1.8817 | 3.1432 | -1.7051 | 0.1346 | 0.3757 | 0.1106 | 2.428 | 8.826 | 3.459 |
| 24027060 | -1.1244 | -1.4189 | -0.7858 | 0.1453 | 0.2314 | 0.0710 | 0.867 | 1.799 | 0.735 |
| 24027040 | -1.6305 | 1.3671 | -2.8612 | 0.1548 | 0.1088 | 0.4767 | 1.823 | 1.670 | 9.739 |
| 24027030 | 1.5421 | -1.1078 | -0.5578 | 0.4646 | 0.2398 | 0.0608 | 1.631 | 1.096 | 0.370 |
| 24027050 | 1.0687 | -1.2043 | -0.0307 | 0.1464 | 0.1859 | 0.0001 | 0.783 | 1.296 | 0.001 |
| 24027070 | 5.0611 | 0.7255 | 0.2915 | 0.8691 | 0.0179 | 0.0029 | 17.563 | 0.470 | 0.101 |
| 23087150 | -0.7285 | 2.0612 | -3.0764 | 0.0333 | 0.2666 | 0.5940 | 0.364 | 3.796 | 11.259 |
| 23087180 | -1.7136 | -0.3148 | -2.8576 | 0.1954 | 0.0066 | 0.5433 | 2.013 | 0.089 | 9.715 |
| 23087190 | 4.3118 | 1.7685 | 0.2205 | 0.6531 | 0.1099 | 0.0017 | 12.748 | 2.794 | 0.058 |
| 23087160 | -0.1528 | 1.0638 | -2.3742 | 0.0014 | 0.0658 | 0.3277 | 0.016 | 1.011 | 6.706 |
| 22027020 | 3.2157 | -2.2158 | 1.1730 | 0.5033 | 0.2390 | 0.0670 | 7.090 | 4.386 | 1.637 |
| 22017010 | 2.1340 | -3.1441 | 1.1982 | 0.2533 | 0.5499 | 0.0799 | 3.122 | 8.832 | 1.708 |
| 22057050 T | -2.7477 | 0.4374 | 1.2755 | 0.3432 | 0.0087 | 0.0739 | 5.177 | 0.171 | 1.935 |
| 22027010 | 5.2764 | -1.0656 | 1.1401 | 0.8563 | 0.0349 | 0.0400 | 19.089 | 1.014 | 1.546 |
| 22037010 T | -2.2935 | -0.4610 | 0.6069 | 0.3211 | 0.0130 | 0.0225 | 3.607 | 0.190 | 0.438 |
| 22067010 T | -1.6445 | 1.2755 | 0.6500 | 0.1631 | 0.0981 | 0.0255 | 1.854 | 1.453 | 0.503 |
| 21087070 T | -2.0248 | 3.5188 | 3.6090 | 0.1136 | 0.3432 | 0.3610 | 2.811 | 11.062 | 15.495 |
| 21087080 T | -1.3136 | 3.9971 | 4.1034 | 0.0410 | 0.3793 | 0.3998 | 1.183 | 14.273 | 20.032 |
| 21087050 | -2.6955 | -4.1227 | 0.5067 | 0.2716 | 0.6352 | 0.0096 | 4.982 | 15.185 | 0.305 |
| 21087040 T | -3.3060 | -1.7014 | 2.4277 | 0.3926 | 0.1040 | 0.2117 | 7.494 | 2.586 | 7.012 |

Con respecto a las contribuciones, las estaciones que aportan mayor información a la componente 1 corresponden a Mérida (24027070) en Fonce, La Garrucha (23087190) en Nare, El cóndor (22027010) en Saldaña que corresponden a las cuencas con mayores áreas, perímetros, longitudes de cuenca y longitudes de cauce principal; es decir mayores valores para la componente 1 indican cuencas más grandes.

Mientras que las que aportan mayor información a la componente 2 corresponden a Guaicán (24037040) en Chicamocha, Hacienda el Jardín (21087070), Hacienda Venecia (21087080) y Bocatoma (21087050) en Yaguará; los valores más negativos están asociados a cuencas con las más altas pendientes de cauce, y también con altos valores de la integral hipsométrica y pendientes media dentro de la cuenca.

La **Figura 44** contiene el plano principal creado por el software a partir de las componentes 1 y 2 del análisis; donde ubica cada estación según los valores definidos en la **Tabla 28** correspondientes a estas componentes. En la imagen se puede apreciar la conformación de conglomerados o grupos (clusters) denotados con diferentes colores que se forman según las similitudes que presentan. Se observa que 5 de las 7 áreas de drenaje clasificadas como torrenciales se ubican siempre en los cuadrantes izquierdos del plano principal; pero se observa que no pertenecen a un solo clúster como se esperaría, ya que se encuentran repartidas 3 en el clúster 2, 2 en el clúster 4, 1 en el clúster 6 y 1 en el clúster 1. El análisis agrupa las subcuencas en 7 clúster y al respecto se puede observar que el clúster número 1 corresponde a áreas drenantes que se parecen en relieve, el Clúster 2 las agrupa por la relación de circularidad, el 3 que es el verde deja sola a una subcuenca que presenta diferencias notables con el resto. El clúster 4 agrupa las estaciones con mayor parecido en el Indicador 2 de caudal sólido, el clúster 5 según el I3s, el Clúster 7 según los parámetros de relieve y el 8 según los parámetros de tamaño y forma de la cuenca.

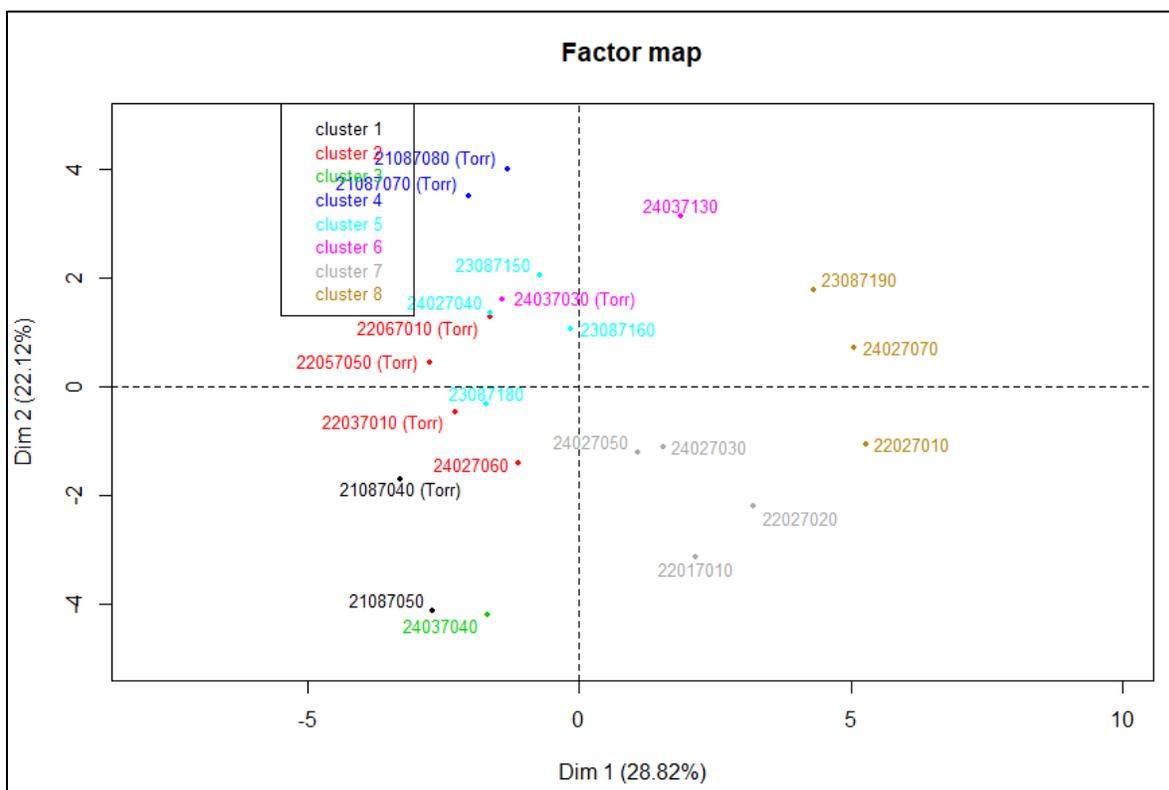


Figura 44. Ubicación de estaciones en el plano principal creado a partir de las componentes 1 y 2

Dicho agrupamiento se puede observar de una manera diferente en la **Figura 45** donde se puede observar el mismo agrupamiento, pero adicionalmente, grupos más grandes. Se observa allí que las

áreas drenantes a las que se les atribuye un comportamiento torrencial mediante los Indicadores, se encuentran en los Clúster 1, 2, 3 y 6 que tienen distancias cercanas en cuanto a relieve, relación de circularidad, Pendiente del cauce y el Indicador 2 de caudal sólido.

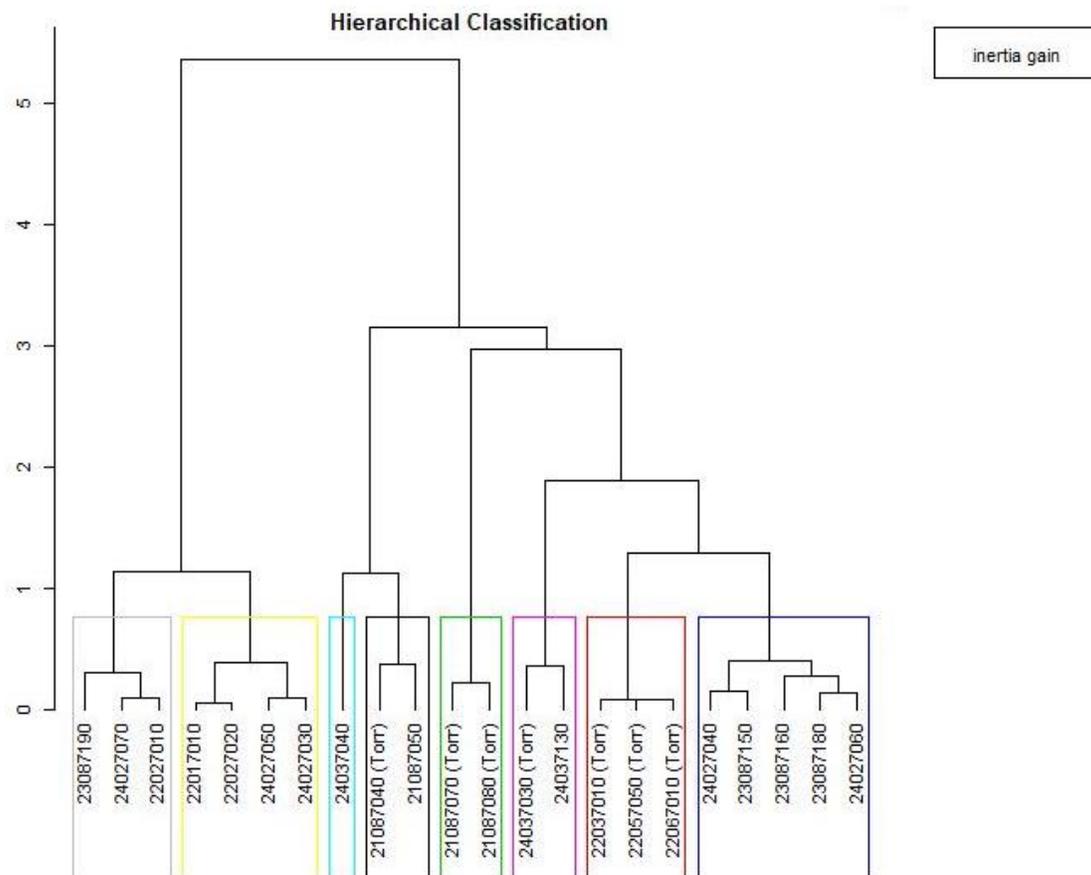


Figura 45. Agrupamiento jerárquico obtenido mediante el ACP

5.4.2 Análisis por variables

La **Tabla 29** contiene el valor de las componentes principales correspondientes a las variables que se están evaluando y sus respectivos cosenos cuadrados y contribuciones obtenidos del PCA. Se observa que para la componente 1 las variables de *forma de la cuenca* son las que mayor información aportan, pues su contribución total es del 43.94 % del total de la información, seguido de las variables de la *red de drenaje* que aportan un 27.49 %, las variables de *relieve* aportan 15.17 % y los *indicadores del régimen de caudales* aportan el 13.91 %; Así que se tiene que en esta componente predomina la información de la *forma de la cuenca*. De este grupo las variables que aportan mayor porcentaje de información a esta componente corresponden al área de la cuenca, perímetro, longitud de cuenca,

longitud total de drenaje y longitud de cauce que aportan casi el 65 %, las que fueron subrayadas en gris en la **Tabla 29**.

En la componente 2 las variables de *relieve* son las que mayor cantidad de información están aportando 37.48 %, las variables de *red de drenaje* aportan el 36.27 %, los indicadores de *régimen de caudal* aportan el 24.02 % y las variables de forma el 17.30 %. En conclusión, dentro de esta componente predomina la información del *relieve* y la *red de drenaje de la cuenca*. De estos grupos las variables que aportan mayor porcentaje de la información a esta componente son la pendiente de la cuenca, integral hipsométrica y pendiente del cauce principal que aportan cerca del 33 %, las que fueron subrayadas en gris en la **Tabla 29**.

En la componente 3 las variables de *régimen de caudales* son las que mayor porcentaje de información están aportando 52.51 %, las variables de *relieve* aportan el 28.72 %, las variables de *red de drenaje* aportan el 11.92 % y las variables de *forma* apenas aportan el 3.05 %. Es decir, en esta componente predomina la información proveniente del *régimen de caudales*.

Se puede concluir a partir de las dos primeras componentes que tienen el mayor porcentaje de la información contenida en la matriz de datos que el plano principal está mejor representado por las variables geomorfológicas de forma y de red de drenaje.

Tabla 29. Componentes principales, cosenos cuadrados y porcentaje de contribución de información en el plano principal para cada variable

| | Variable | Dim.1 | Dim.2 | Dim.3 | cos ² dim1 | cos ² dim2 | cos ² dim3 | ctr ₁ | ctr ₂ | ctr ₃ |
|----------------|------------------|---------|---------|--------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|------------------|------------------|------------------|
| Tamaño y Forma | Área | 0.9331 | 0.2217 | 0.0383 | 0.8707 | 0.0491 | 13.1337 | 13.134 | 0.966 | 1.004 |
| | Perímetro | 0.9366 | 0.2777 | 0.0325 | 0.8772 | 0.0771 | 13.2321 | 13.232 | 1.516 | 0.851 |
| | Longitud | 0.9275 | 0.1009 | 0.0372 | 0.8603 | 0.0102 | 12.9767 | 12.977 | 0.200 | 0.974 |
| | R. Elong | 0.2750 | 0.6221 | 0.0006 | 0.0756 | 0.3870 | 1.1409 | 1.141 | 7.606 | 0.015 |
| | F. Forma | 0.2730 | 0.5839 | 0.0041 | 0.0745 | 0.3409 | 1.1243 | 1.124 | 6.701 | 0.108 |
| | R. Circularidad | -0.3935 | -0.1257 | 0.0036 | 0.1549 | 0.0158 | 2.3362 | 2.336 | 0.311 | 0.095 |
| Relieve | Hmin | -0.0505 | -0.0471 | 0.4336 | 0.0025 | 0.0022 | 0.0384 | 0.038 | 0.044 | 11.350 |
| | Hmax | 0.5265 | -0.4549 | 0.0163 | 0.2772 | 0.2069 | 4.1817 | 4.182 | 4.067 | 0.426 |
| | H | 0.5405 | -0.3939 | 0.4252 | 0.2922 | 0.1551 | 4.4072 | 4.407 | 3.049 | 11.129 |
| | Hm | 0.3413 | -0.4817 | 0.0778 | 0.1165 | 0.2321 | 1.7568 | 1.757 | 4.561 | 2.036 |
| | Pend.Cuenca | 0.2022 | -0.6702 | 0.3569 | 0.0409 | 0.4491 | 0.6169 | 0.617 | 8.827 | 9.340 |
| | Rel.Relieve | -0.4656 | -0.5585 | 0.2019 | 0.2168 | 0.3119 | 3.2707 | 3.271 | 6.130 | 5.284 |
| | Int.Hipsometrica | 0.2442 | -0.7430 | 0.0192 | 0.0596 | 0.5520 | 0.8996 | 0.900 | 10.849 | 0.502 |
| Red | Long.Cauce | 0.9068 | 0.1134 | 0.0518 | 0.8224 | 0.0129 | 12.4050 | 12.405 | 0.253 | 1.357 |
| | Concavidad | 0.2054 | 0.5637 | 0.0314 | 0.0422 | 0.3177 | 0.6363 | 0.636 | 6.245 | 0.822 |

| | Variable | Dim.1 | Dim.2 | Dim.3 | cos ² dim1 | cos ² dim2 | cos ² dim3 | ctr ₁ | ctr ₂ | ctr ₃ |
|----------------|--------------------|---------|---------|--------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|------------------|------------------|------------------|
| | Pend.Cauce | -0.2925 | -0.8216 | 0.0551 | 0.0855 | 0.6750 | 1.2905 | 1.290 | 13.266 | 1.442 |
| | Long.total.drenaje | 0.9170 | 0.2657 | 0.0287 | 0.8409 | 0.0706 | 12.6849 | 12.685 | 1.387 | 0.752 |
| | Dens.drenaje | -0.1779 | 0.4663 | 0.2693 | 0.0316 | 0.2174 | 0.4772 | 0.477 | 4.273 | 7.047 |
| Torrencialidad | I _{1L} | -0.4354 | 0.5661 | 0.2366 | 0.1896 | 0.3204 | 2.8594 | 2.859 | 6.298 | 6.194 |
| | I _{2L} | -0.4397 | 0.5144 | 0.3027 | 0.1934 | 0.2646 | 2.9170 | 2.917 | 5.200 | 7.922 |
| | I _{3L} | -0.5848 | 0.4325 | 0.3896 | 0.3420 | 0.1871 | 5.1586 | 5.159 | 3.676 | 10.197 |
| | I _{2S} | -0.1946 | 0.4255 | 0.3801 | 0.0379 | 0.1811 | 0.5712 | 0.571 | 3.559 | 9.948 |
| | I _{3S} | -0.3535 | 0.2274 | 0.4281 | 0.1249 | 0.0517 | 1.8846 | 1.885 | 1.016 | 11.205 |

La Figura 46 muestra el círculo de correlaciones de las variables dentro del cual se puede observar según su longitud de vector en el gráfico que la mayoría de las variables se encuentran bien representadas por el análisis a excepción de la variable Altura mínima (Hmin) que tiene una longitud de vector muy corta y puede ser eliminada del análisis al no estar bien representada. En el círculo se observan variables muy bien representadas y a la vez con estrecha correlación directa (sus vectores van en la misma dirección y similar longitud) como son Área, Perímetro, Longitud de cuenca, Longitud total de drenaje y Longitud de cauce principal todos estas perteneciente al grupo de *Forma y tamaño de la cuenca*, coincidiendo con el análisis anterior.

Los vectores correspondientes a los indicadores de torrencialidad están orientados en la misma dirección lo que indica una fuerte correlación entre ellos y que a partir de uno de estos se puede obtener información contenida en los otros indicadores. Con respecto a la correlación entre los indicadores y las variables geomorfológicas se observa solo correlación directamente proporcional con la densidad de drenaje, especialmente con el Indicador **I2s**, ya que su vector también apunta en la misma dirección de los indicadores, lo cual concuerda con los resultados esperados basados en la teoría que indica que una mayor densidad de drenaje favorece la torrencialidad. Por otra parte, en el mismo sentido, pero con correlación inversa se encuentran los parámetros de Relieve (Altura máxima, Altura media) con respecto a los indicadores **I2** e **I3** para caudal líquido e **I3** para caudal sólido. De igual manera la Integral hipsométrica y pendiente de la cuenca con la densidad de drenaje y el Indicador **I2** de caudal sólido.

Se observa una leve correlación directa de los indicadores con las variables que representan la forma de la cuenca correspondiente a *Relación de elongación y al factor de forma*, lo cual se corresponde a lo enunciado en la teoría que indica que una forma más cercana a la circularidad de la cuenca crea un

escenario favorable para la torrencialidad, aunque se esperaba una correlación más fuerte con estas variables.

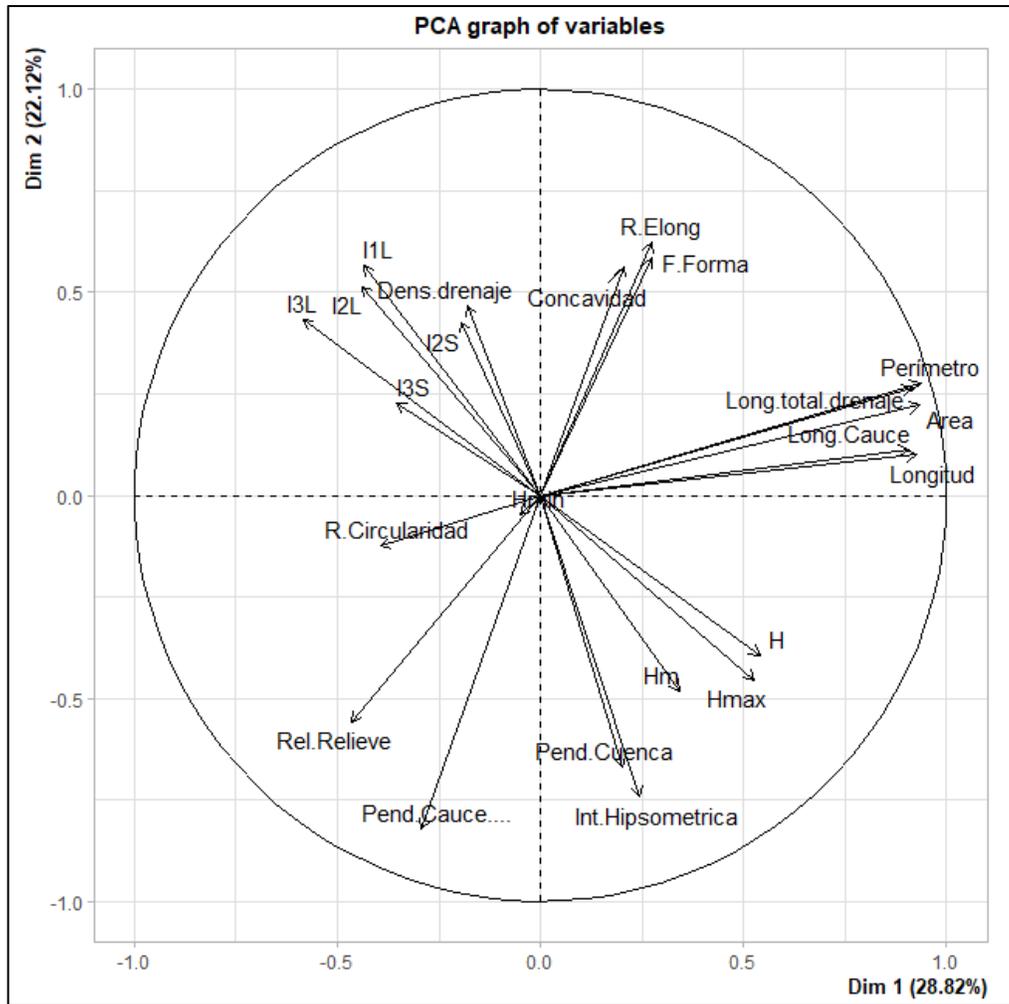


Figura 46. Círculo de correlaciones de las variables

De manera complementaria se presentan la matriz de correlación entre las variables (**Figura 47**) se observa que las mayores correlaciones positivas se presentan entre los indicadores de torrencialidad especialmente I_{2S} y los parámetros geomorfológicos de Tamaño y forma Er, Ff, Cr y Rr. Las mayores correlaciones negativas se presentan entre los indicadores de caudal líquido y los factores geomorfológicos de tamaño y área (A, P, L) así como con los de relieve (HI, Lc).

| | A | P | L | Er | Ff | Cr | Hmin | Hmax | H | Hm | Sc | Rr | HI | Lc | C | So | Lt | Dd | I1L | I2L | I3L | I2S | I3S |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| A | 1.00 | 0.98 | 0.91 | 0.44 | 0.46 | -0.30 | -0.13 | 0.44 | 0.52 | 0.19 | 0.12 | -0.41 | 0.10 | 0.89 | 0.23 | -0.36 | 1.00 | -0.13 | -0.20 | -0.21 | -0.33 | 0.07 | -0.10 |
| P | 0.98 | 1.00 | 0.93 | 0.45 | 0.45 | -0.39 | -0.12 | 0.43 | 0.50 | 0.19 | 0.08 | -0.49 | 0.06 | 0.92 | 0.26 | -0.43 | 0.98 | -0.10 | -0.15 | -0.16 | -0.30 | 0.08 | -0.12 |
| L | 0.91 | 0.93 | 1.00 | 0.18 | 0.14 | -0.40 | -0.21 | 0.43 | 0.58 | 0.19 | 0.22 | -0.48 | 0.21 | 0.95 | 0.24 | -0.35 | 0.89 | -0.19 | -0.22 | -0.20 | -0.36 | -0.02 | -0.19 |
| Er | 0.44 | 0.45 | 0.18 | 1.00 | 0.94 | 0.19 | 0.23 | 0.14 | -0.05 | 0.09 | -0.41 | -0.30 | -0.34 | 0.18 | 0.19 | -0.47 | 0.46 | 0.40 | 0.19 | 0.10 | 0.09 | 0.33 | 0.19 |
| Ff | 0.46 | 0.45 | 0.14 | 0.94 | 1.00 | 0.23 | 0.25 | 0.22 | 0.01 | 0.14 | -0.35 | -0.21 | -0.33 | 0.16 | 0.08 | -0.40 | 0.49 | 0.33 | 0.24 | 0.14 | 0.14 | 0.37 | 0.23 |
| Cr | -0.30 | -0.39 | -0.40 | 0.19 | 0.23 | 1.00 | 0.26 | 0.15 | -0.07 | 0.20 | -0.06 | 0.36 | 0.06 | -0.44 | -0.42 | 0.31 | -0.30 | 0.10 | 0.14 | 0.07 | 0.22 | 0.19 | 0.34 |
| Hmin | -0.13 | -0.12 | -0.21 | 0.23 | 0.25 | 0.26 | 1.00 | 0.36 | -0.46 | 0.74 | -0.58 | -0.18 | 0.05 | -0.28 | -0.31 | 0.05 | -0.10 | 0.56 | -0.19 | -0.31 | -0.29 | -0.12 | -0.14 |
| Hmax | 0.44 | 0.43 | 0.43 | 0.14 | 0.22 | 0.15 | 0.36 | 1.00 | 0.66 | 0.84 | 0.34 | 0.24 | 0.48 | 0.38 | -0.42 | 0.38 | 0.42 | -0.08 | -0.26 | -0.27 | -0.31 | -0.10 | -0.11 |
| H | 0.52 | 0.50 | 0.58 | -0.05 | 0.01 | -0.07 | -0.46 | 0.66 | 1.00 | 0.20 | 0.78 | 0.38 | 0.41 | 0.59 | -0.15 | 0.32 | 0.48 | -0.53 | -0.09 | -0.01 | -0.06 | 0.00 | 0.01 |
| Hm | 0.19 | 0.19 | 0.19 | 0.09 | 0.14 | 0.20 | 0.74 | 0.84 | 0.20 | 1.00 | 0.03 | 0.04 | 0.57 | 0.13 | -0.56 | 0.36 | 0.18 | 0.15 | -0.38 | -0.45 | -0.44 | -0.18 | -0.18 |
| Sc | 0.12 | 0.08 | 0.22 | -0.41 | -0.35 | -0.06 | -0.58 | 0.34 | 0.78 | 0.03 | 1.00 | 0.57 | 0.55 | 0.21 | -0.26 | 0.54 | 0.07 | -0.77 | -0.25 | -0.18 | -0.09 | -0.05 | 0.07 |
| Rr | -0.41 | -0.49 | -0.48 | -0.30 | -0.21 | 0.36 | -0.18 | 0.24 | 0.38 | 0.04 | 0.57 | 1.00 | 0.22 | -0.44 | -0.44 | 0.83 | -0.44 | -0.36 | 0.06 | 0.11 | 0.27 | 0.07 | 0.31 |
| HI | 0.10 | 0.06 | 0.21 | -0.34 | -0.33 | 0.06 | 0.05 | 0.48 | 0.41 | 0.57 | 0.55 | 0.22 | 1.00 | 0.18 | -0.63 | 0.61 | 0.06 | -0.31 | -0.40 | -0.37 | -0.30 | -0.14 | -0.04 |
| Lc | 0.89 | 0.92 | 0.95 | 0.18 | 0.16 | -0.44 | -0.28 | 0.38 | 0.59 | 0.13 | 0.21 | -0.44 | 0.18 | 1.00 | 0.20 | -0.35 | 0.87 | -0.24 | -0.17 | -0.15 | -0.31 | -0.06 | -0.22 |
| C | 0.23 | 0.26 | 0.24 | 0.19 | 0.08 | -0.42 | -0.31 | -0.42 | -0.15 | -0.56 | -0.26 | -0.44 | -0.63 | 0.20 | 1.00 | -0.62 | 0.25 | 0.13 | -0.01 | 0.04 | -0.09 | -0.12 | -0.24 |
| So | -0.36 | -0.43 | -0.35 | -0.47 | -0.40 | 0.31 | 0.05 | 0.38 | 0.32 | 0.36 | 0.54 | 0.83 | 0.61 | -0.35 | -0.62 | 1.00 | -0.38 | -0.27 | -0.23 | -0.14 | -0.02 | -0.07 | 0.17 |
| Lt | 1.00 | 0.98 | 0.89 | 0.46 | 0.49 | -0.30 | -0.10 | 0.42 | 0.48 | 0.18 | 0.07 | -0.44 | 0.06 | 0.87 | 0.25 | -0.38 | 1.00 | -0.07 | -0.18 | -0.20 | -0.31 | 0.09 | -0.09 |
| Dd | -0.13 | -0.10 | -0.19 | 0.40 | 0.33 | 0.10 | 0.56 | -0.08 | -0.53 | 0.15 | -0.77 | -0.36 | -0.31 | -0.24 | 0.13 | -0.27 | -0.07 | 1.00 | 0.20 | 0.17 | 0.09 | -0.02 | -0.11 |
| I1L | -0.20 | -0.15 | -0.22 | 0.19 | 0.24 | 0.14 | -0.19 | -0.26 | -0.09 | -0.38 | -0.25 | 0.06 | -0.40 | -0.17 | -0.01 | -0.23 | -0.18 | 0.20 | 1.00 | 0.92 | 0.93 | 0.52 | 0.47 |
| I2L | -0.21 | -0.16 | -0.20 | 0.10 | 0.14 | 0.07 | -0.31 | -0.27 | -0.01 | -0.45 | -0.18 | 0.11 | -0.37 | -0.15 | 0.04 | -0.14 | -0.20 | 0.17 | 0.92 | 1.00 | 0.92 | 0.52 | 0.48 |
| I3L | -0.33 | -0.30 | -0.36 | 0.09 | 0.14 | 0.22 | -0.29 | -0.31 | -0.06 | -0.44 | -0.09 | 0.27 | -0.30 | -0.31 | -0.09 | -0.02 | -0.31 | 0.09 | 0.93 | 0.92 | 1.00 | 0.67 | 0.69 |
| I2S | 0.07 | 0.08 | -0.02 | 0.33 | 0.37 | 0.19 | -0.12 | -0.10 | 0.00 | -0.18 | -0.05 | 0.07 | -0.14 | -0.06 | -0.12 | -0.07 | 0.09 | -0.02 | 0.52 | 0.52 | 0.67 | 1.00 | 0.95 |
| I3S | -0.10 | -0.12 | -0.19 | 0.19 | 0.23 | 0.34 | -0.14 | -0.11 | 0.01 | -0.18 | 0.07 | 0.31 | -0.04 | -0.22 | -0.24 | 0.17 | -0.09 | -0.11 | 0.47 | 0.48 | 0.69 | 0.95 | 1.00 |

Figura 47. Matriz de correlaciones entre variables geomorfológicas e indicadores de torrencialidad (azul para valores más positivos y rojo para más negativos)

Analizando de forma general los resultados del ACP para las variables y las cuencas se observa con relación a la componente 1 (que contiene 28.82 % de la información) que las cuencas clasificadas como torrenciales presentan valores negativos para la componente 1 (se encuentran en los cuadrantes izquierdos en la **Figura 44**), ya que como se observó anteriormente presentan una correlación negativa con los factores de Tamaño y forma de la cuenca, de los cuales se destacan las variables de *Área, Perímetro y Longitud de la cuenca*. Con lo que se confirma la hipótesis de que el comportamiento torrencial de las cuencas de estudio está predominantemente asociado a cuencas pequeñas, pues el promedio de las áreas que se encuentran en los cuadrantes mencionados es de 239 km² mientras que el promedio de las áreas que se encuentran en los cuadrantes derechos es de 882 km².

También se puede concluir con respecto a la componente 2 (que contiene 22.12 % de la información) que 5 de las cuencas catalogadas como torrenciales presentan valores positivos de la componente (se encuentran en los cuadrantes superiores en la **Figura 44**), debido a la correlación positiva con la variable dominante de este componente que es la densidad de drenaje y a la correlación negativa con la integral hipsométrica, pendiente media de cuenca y pendiente de cauce principal. Lo que se corrobora al observar la matriz de correlaciones de la **Figura 47** donde predominan correlaciones

inversas entre estas variables geomorfológicas y los indicadores de torrencialidad con la información que se ha podido recopilar de las cuencas de estudio.

6 Conclusiones

A partir de información de series históricas de una cuenca se puede evaluar de manera preliminar el comportamiento hidrosedimentológico, por medio del análisis estadístico del régimen de caudales líquidos y sólidos. Los parámetros de la estadística descriptiva son de gran relevancia ya que muestran cómo se encuentran distribuidos los datos de cada serie histórica. Se debe tener en cuenta que en Colombia no se tienen técnicas de medición de transporte de sedimentos óptimas, pues a pesar de que hay gran cantidad de registros de esta variable, solo se mide la carga en suspensión y estos registros no son obtenidos durante la ocurrencia de un evento torrencial por el peligro que esto conlleva, lo que hace que de entrada se cuente con información menos precisa y los estudios de estos fenómenos se desarrollen con un mayor grado de incertidumbre.

En este trabajo se evidenció que dentro las cuencas de estudio dentro del área Magdalena Cauca hay variabilidades muy altas en su régimen de caudal. La evaluación de los parámetros correspondientes a la dispersión y distribución de datos de la estadística descriptiva (coeficiente de variación y asimetría), sumado al análisis exploratorio gráfico de las series, evidenciaron que el régimen de caudal sólido presenta una variabilidad mucho más alta que la de caudal líquido, lo que indica que el transporte de sedimentos presenta crecimientos más abruptos o de mayor magnitud cuando se da la ocurrencia de eventos extremos. Comparando las dos variables se observó que la subzona Fonce presenta valores más altos en su cuanto a caudal líquido que la subzona Chicamocha, pero al observar el régimen de caudal sólido se observa que en la subzona Fonce se presenta el transporte de sedimentos más bajo entre las subzonas, mientras que Chicamocha a pesar de no presentar altos caudales líquidos presenta mayores tasas de transporte de sedimentos.

El análisis estadístico también evidenció que en cuanto a caudal líquido las estaciones que presentan mayor dispersión y variabilidad corresponden a Hacienda El Jardín (21087070) y Hacienda Venecia (21087080) en Yaguará y La esperanza (22037010) en Saldaña, lo que se asocia a que dentro de sus corrientes se desarrollan con mayor frecuencia, crecientes más altas o de mayor magnitud lo que indica comportamiento torrencial. Por otro lado, se evidenció para el régimen de caudal sólido que las estaciones que presentan mayor dispersión y variabilidad son las estaciones El Palo (24037030) y La Reforma (24037130) en Chicamocha, y Gaitania (22027020) y La esperanza (22037010) en Saldaña

lo que se asocia con mayor producción de sedimentos respecto a su tendencia normal y ocurren con una mayor frecuencia que en otras cuencas, condiciones que indican torrencialidad.

La caracterización geomorfológica se llevó a cabo satisfactoriamente a partir de la información inicial suministrada y se logró obtener a partir de la implementación de sistemas de información geográfica 18 variables geomorfológicas en cada cuenca que representan la forma, el relieve y la red de drenaje de cada una de ellas. A partir de la comparación de esta caracterización geomorfológica con los indicadores que definieron la torrencialidad en las cuencas de estudio se pudo concluir que los indicadores de Tamaño y forma de las cuencas siguen siendo indicadores que permiten predecir comportamiento torrencial. En dicho sentido, se observó que el promedio de las áreas de drenaje de las cuencas clasificadas como torrenciales es de 312 km² que es la mitad del promedio de las cuencas que no fueron clasificadas como no torrenciales que es de 633 km², lo que indica que la torrencialidad tiene una tendencia a presentarse más comúnmente en áreas pequeñas. De igual manera, la densidad de drenaje y la altura media aportan en dicho sentido.

Se observaron cuencas que presentaban forma cercana a la circularidad lo que indica respuesta hidrológica rápida y caudales pico más pronunciados, pero estos parámetros no cumplían las condiciones establecidas para los indicadores, como por ejemplo la estación La Garrucha (23087190) de Nare.

De la misma forma se observaron cuencas con características de relieve que según la teoría deben favorecer la alta producción de sedimentos (por ejemplo, altos valores de integral hipsométrica y pendiente media) que no clasificaron como torrenciales, como por ejemplo la estación Guaicán (24037040) en Chicamocha. Para esta misma cuenca (como algunas otras) se observa que presenta características relacionadas al drenaje (por ejemplo, altas densidades de drenaje, pendientes de cauce principal) que favorecen la producción de sedimentos.

Esta investigación propone una serie de indicadores que representen la variabilidad del régimen diario de caudales (I_{1L} , I_{2L} , I_{2S}), el régimen intradiario de caudales (I_{3L} , I_{3S}) y la variación entre el régimen de caudales diarios e intradiarios (I_{4L} , I_{4S}). La metodología consiste en la determinación de los caudales mínimos, máximos y medios a partir de las CDC diarias. Luego la obtención de los caudales líquidos y sólidos intradiarios a partir de la formulación de Cataño, con los cuales se obtienen los caudales mínimos, máximo y medios a nivel intradiario. Se utilizan para esto los caudales correspondientes a las probabilidades de excedencia QL_{95} , QL_{50} y $QL_{0.01}$ de la CDC. Estos caudales se utilizan para eliminar

los posibles sesgos existentes en la recolección de información. Con dichos caudales y a partir del análisis estadístico y de los resultados obtenidos para las 22 áreas drenantes estudiadas se proponen los umbrales siguientes. Se definieron cuencas torrenciales como aquellas con mayores distancias entre el caudal máximo diario e intradiario, o entre el máximo y el medio. Para tener en cuenta tanto el régimen de caudal líquido como el sólido se propone que para que una cuenca sea considerada torrencial se cumplan mínimo dos de los requisitos para caudal sólido y mínimo dos para caudal líquido.

| Régimen | Indicador | Fórmula de cálculo | Umbral |
|-----------------------|-----------|--|-------------|
| Caudal líquido | I_{1L} | $\left(\frac{QLd_{0.01}}{QLd_{95}}\right)$ | ≥ 80 |
| | I_{2L} | $\left(\frac{QLd_{0.01}}{QLd_{50}}\right)$ | ≥ 10 |
| | I_{3L} | $\left(\frac{QLh_{0.01}}{QLh_{50}}\right)$ | ≥ 110 |
| | I_{4L} | $\left(\frac{QLh_{0.01}}{QLd_{0.01}}\right)$ | ≥ 8.2 |
| Caudal sólido | I_{2S} | $\left(\frac{Qsd_{0.01}}{Qsd_{50}}\right)$ | ≥ 1000 |
| | I_{3S} | $\left(\frac{Qsh_{0.01}}{Qsh_{50}}\right)$ | ≥ 8000 |
| | I_{4S} | $\left(\frac{Qsh_{0.01}}{Qsd_{0.01}}\right)$ | ≥ 8.2 |

Bajo la metodología propuesta se obtuvo que a 7 de las 22 cuencas de estudio se les podría atribuir un comportamiento torrencial, las cuales pertenecen mayoritariamente a las subzonas de Saldaña y Yaguará. Las cuencas susceptibles a la torrencialidad corresponden a las mencionadas a continuación:

- Hacienda El Jardín (21087070) en Yaguará
- Hacienda Venecia (21087080) en Yaguará
- El Palo (24037030) en Chicamocha
- Puente Ortega (22067010) en Saldaña
- La esperanza (22037010) en Saldaña
- Puente La hamaca (22057050) en Saldaña
- Hidroeléctrica (21087040) en Yaguará

En este análisis se evaluaron 4 condiciones del régimen de caudal líquido y sólido. Debido a que la condición 1 solo se pudo evaluar para el caudal líquido y dio resultados diferentes al resto se concluye que las condiciones que se pudieron comparar de manera más adecuada fueron las condiciones 2 y 3 (I_{2L} , I_{2S} , I_{3L} , I_{3S}). Los indicadores de la condición 2 representan variabilidad dentro del régimen diario por lo que se concluye que fue estimado directamente de datos registrados en las series históricas suministradas para cada cuenca. Los indicadores de la condición 3 representan variabilidad dentro del régimen de caudal intradiario, es decir que no se pudo estimar a partir de datos registrados en series históricas sino a partir de series sintéticas lo cual agrega algo de incertidumbre a dichos indicadores en comparación a la condición 2. Cabe resaltar que si se tuvieran registros intradiarios tanto de caudal líquido como sólido que permitan una estimación de forma directa de indicadores los resultados serían mucho más representativos del comportamiento de la torrencialidad de cuencas. También cabe comentar que esta propuesta de indicadores se debe realizar con una alta cantidad de información, en el presente estudio se realizó con series que registran datos durante mínimo 28 años.

Se concluye que de contar con las series de caudal líquido y sólido diarias la herramienta propuesta puede ser una herramienta útil para el desarrollo de este tipo de análisis ya que permite diferenciar y analizar el comportamiento hidrológico de una cuenca a partir de su curva de duración caudal.

Sin embargo, muchas cuencas no cuentan con series de caudal sólido. Por tanto, la investigación buscaba además evaluar si los indicadores propuestos podrían ser estimados a partir de información geomorfológica de la cuenca. Para esto se llevó a cabo un Análisis de Componentes Principales, ACP, la que es una gran herramienta estadística a la hora de analizar grandes conjuntos de datos.

Para realizar el ACP se propuso utilizar parámetros geomorfológicos agrupados como Tamaño y forma de la cuenca, Relieve de la cuenca y red de drenaje de la cuenca. Para cada grupo se propusieron diferentes parámetros basados en la literatura reportada al respecto. Para tamaño y forma de la cuenca se utilizaron los parámetros de Área, Perímetro, Longitud, factor de forma, Relación de elongación, Coeficiente de circularidad. Para el agrupamiento de Relieve se utilizaron los parámetros Altura mínima, máxima y media, pendiente de la cuenca, Relación de relieve e integral hipsométrica. Por último, para el agrupamiento de densidad de drenaje se utilizaron los parámetros de Longitud del cauce, concavidad, pendiente del cauce, longitud total de drenaje y densidad de drenaje. En total se construyeron 18 parámetros geomorfológicos. De dicho análisis se obtuvo que con tres dimensiones se lograría capturar el 67.57 por ciento de la varianza de la información. El ACP indicó que los parámetros de Tamaño y forma son los que presentan mayor influencia en predecir el

comportamiento hidrosedimentológico de la cuenca, especialmente Área, Perímetro y Longitud, pero que además se puede explicar a partir de la longitud del cauce. Una segunda dimensión está mejor representada por los parámetros de Relieve de pendiente de la cuenca e integral hipsométrica, aunque los resultados en cuanto a esta dimensión fueron algo confusos. A partir de estos resultados se logró corroborar que la torrencialidad se presenta predominantemente en las áreas pequeñas de las cuencas de estudio.

Como principal dificultad del estudio de las avenidas torrenciales se evidencia que los datos de insumo (registros de series históricas) obtenidos a partir de los monitoreos de variables hidroclimáticas presentan alta incertidumbre al no tener la información necesaria para analizar específicamente estos fenómenos, pues los registros diarios con los que se cuenta conllevan a una subestimación (posiblemente en una porción significativa) tanto de las tasas de flujo de caudal líquido como del flujo de sedimentos y así mismo se subestimen sus magnitudes e impactos. Con el propósito de reducir la subestimación de registros en el ámbito nacional se recomienda fortalecer las metodologías vigentes de monitoreo de comportamiento hidrosedimentológico basado en los siguientes puntos de referencia:

- En la realización de estudios de planificación de cuencas se debe dar un espacio para la definición de priorización de cuencas susceptibles o vulnerables por torrencialidad lo cual debería estar sustentado en antecedentes de eventos torrenciales, análisis de estadísticos de variables hidroclimáticas, condiciones geomorfológicas, población e infraestructura potencial de sufrir daños. En esta priorización se deberá indicar una metodología de monitoreo que incluya una mayor frecuencia en el registro de datos de los fenómenos hidroclimáticos desencadenantes de estos fenómenos y así reducir la subestimación de los flujos de agua y sedimentos.
- Definir dentro de las cuencas priorizadas por susceptibilidad a comportamiento torrencial una frecuencia óptima de monitoreo en función del tamaño del área drenante, pues como se ha comentado en el desarrollo del presente trabajo en cuencas con menor tamaño se ve reflejada una tendencia a presentar mayores variabilidades en la descarga tanto de flujo de agua como flujo de sedimentos en escala intradiaria. Lo anterior combinado con un monitoreo de variables hidroclimáticas suficiente que permita identificar las características de los eventos detonantes de estos fenómenos. Dentro de estas cuencas plantear una mayor cobertura de estaciones de monitoreo que permitan una mejor identificación de sitios donde los procesos erosivos se

encuentran concentrados y a partir de los cuales son transportados importantes volúmenes de sedimentos.

- Elaborar una metodología especial de monitoreo para estos eventos torrenciales en función de un umbral de evento detonante definido específicamente para cada cuenca a partir del análisis de comportamiento de sus variables hidroclimáticas, su caracterización geomorfológica y la población o infraestructura susceptible a sus efectos. A partir de estos monitoreos conformar una base de datos que almacene los registros de eventos detonantes de avenidas torrenciales que permitan una disminución de incertidumbre en los insumos utilizados en futuros estudios de estos fenómenos.
- Se deben plantear nuevas metodologías o estrategias en los monitoreos que permitan la obtención de una mayor cantidad de registros de sedimentos o reducción de datos faltantes de esta variable, pues generalmente se dispone de una cantidad menor de información disponible de esta variable en comparación al caudal líquido u otras variables hidroclimáticas, lo que ayuda al incremento del grado de incertidumbre por submedición de los estudios de flujos de sedimentos. Adicionalmente, se requiere la medición de sedimentos durante la ocurrencia de estos eventos torrenciales de manera remota y que no implique exponer a situaciones de riesgo consecuentes a estos fenómenos la vida humana del personal que realiza las mediciones.
- Avanzar en la medición de la carga de fondo de sedimentos en las corrientes, la cual aún no es medida en el territorio colombiano, aunque está considerado en los actuales protocolos. Esto sumado a la caracterización del fondo del río en varios puntos de las corrientes principales de las cuencas priorizadas por amenaza torrencial; ya que además del punto de la estación, la rugosidad del fondo es una variable importante que se debe tener en cuenta junto con la carga de fondo.

Se hacen estas recomendaciones con el objetivo de que futuros estudios de modelación de sedimentos cuenten con insumos de mayor confiabilidad lo cual permita la obtención de resultados más representativos y exactos en donde se vea reflejada una reducción considerable de incertidumbre en el momento de analizar la magnitud que conllevan estos fenómenos.

Como conclusión general del presente trabajo se evidenció la dificultad de estudiar la torrencialidad en cuencas hidrográficas, pues un estudio que permita representar de forma más precisa las características de su comportamiento requiere de analizar muchas variables tanto hidrológicas,

geomorfológicas, geológicas entre otras, además de contar con una resolución de dicha información apropiada en especial en la información de variables hidroclimáticas. Por lo que se considera de gran importancia a nivel nacional e internacional que se consoliden metodologías y bases de datos de variables hidroclimáticas en resolución intradiaria que suministren una información más precisa que pueda garantizar un mejor desarrollo de futuros estudios relacionados con la torrencialidad en de cuencas hidrológicas.

7 Referencias bibliográficas

- Abancó, C., Hürlimann, M., Moya, J., & Berenguer, M. (2016). Critical rainfall conditions for the initiation of torrential flows. Results from the Rebaixader catchment (Central Pyrenees). *Journal of Hydrology*, 541, 218–229. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.01.019>
- Abdi, H., & Williams, L. J. (2010). Principal component analysis. *WIREs Computational Statistics*, 2, 433–459. <https://doi.org/10.1002/wics.101>
- Abu Shlhab, L. (2017). ¿Qué tienen que ver la deforestación y la urbanización con la tragedia en Mocoa? | CNN. Retrieved from <http://cnnespanol.cnn.com/2017/04/03/que-tienen-que-ver-la-deforestacion-y-la-urbanizacion-con-la-tragedia-en-mocoa/>
- Alhamed, M., & Ahmad, S. ali. (2017). Hypsometric Curve and Hypsometric Integral Analysis of the Abdan basin, Almahfid Basement Rock, Yemen. *Recent Advances and Challenges in Geochemistry, Environmental and Sedimentary Geology*, (February).
- Aristizábal, E., Arango, M. I., & García, I. K. (2018). Definición y clasificación de las avenidas torrenciales y su impacto en los Andes colombianos, 29(1), 242–258. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v29n1.72612>.
- Balbin, S., Gastmans, D., Vásquez Vásquez, K., Vituri Santarosa, L., Dos Santos, V., & Kirchheim, R. E. (2019). Hydrological responses in equatorial watersheds indicated by Principal Components Analysis (PCA) – Atrato river basin (Colombia). *Brasilian Journal Water Resources*.
- Buehler, D. M., Versteegh, M. A., Matson, K. D., & Tieleman, B. I. (2011). One Problem , Many Solutions : Simple Statistical Approaches Help Unravel the Complexity of the Immune System in an Ecological Context. *National Center for Biotechnology Information*, 6(4). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0018592>
- Caballero, J. H. (2011). Las avenidas torrenciales : una amenaza potencial en el valle de Aburrá. *Gestión y Ambiente*, 14(3), 45–50.
- Cataño, S. (2015). *Modelo conceptual agregado de transporte de sedimentos para cuencas de montaña en Antioquia- Colombia*. Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín.

- Daniels, J. P. (2017). Preparedness for natural disasters in Colombia. *The Lancet*, 389(10087), 2363–2364. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(17\)31664-1](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(17)31664-1)
- Di Silvo, G., & Basson, G. (2008). *Erosion and sediment dynamics from catchment to coast*. (UNESCO, Ed.), *IHP-VI Technical Document in Hydrology N°82 UNESCO Working Series SC-2008/WS/34* (Internatio). Paris.
- Dingman, S. L. (2009). *Fluvial Hydraulics*. New York: Oxford University Press.
- Duvert, C., Gratiot, N., Némery, J., Burgos, A., & Navratil, O. (2011). Sub-daily variability of suspended sediment fluxes in small mountainous catchments - Implications for community-based river monitoring. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(3), 703–713. <https://doi.org/10.5194/hess-15-703-2011>
- Fryirs, K. A., & Brierley, G. J. (2013). *Geomorphic Analysis of River Systems: an approach to Reading the Landscape*. Wiley-Blackwell.
- González, J. L., Chavez, O. A., & Hermelin, H. (2005). Aspectos geomorfológicos de la avenida torrencial del 31 de enero de 1994 en la cuenca del río Fraile y sus fenómenos asociados. *Desastres de Origen Natural En Colombia, 1979-2004*, 135.
- Griffiths, R. E., & Topping, D. J. (2017). Importance of measuring discharge and sediment transport in lesser tributaries when closing sediment budgets. *Geomorphology*, 296, 59–73. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.08.037>
- Hermelin, M. (2005). *Desastres de origen natural en Colombia, 1979-2004*. OSSO & Universidad EAFIT.
- IDEAM. (2015). Proyecto Evaluación de la dinámica de los procesos de sedimentación (erosión, transporte y depósito de sedimentos) en diez subzonas de la cuenca Magdalena - Cauca.
- Kettner, A. J., Restrepo, J. D., & Syvitski, J. P. M. (2010). A Spatial Simulation Experiment to Replicate Fluvial Sediment Fluxes within the Magdalena River Basin, Colombia. *The Journal of Geology*, 118(4), 363–379. <https://doi.org/10.1086/652659>
- Knighton, D. (1998). *Fluvial forms and processes*. Oxford University Press.
- Lee, C. J., & Glysson, D. Compilation, Quality Control, Analysis, and Summary of Discrete Suspended-

- Sediment and Ancillary Data in the United States, 1901 – 2010 (2013).
- MacDonald, D. D., & Ingersoll, C. G. (2002). A Guidance Manual to Support the Assessment of Contaminated Sediments in Freshwater Ecosystems Volume II - Design and Implementation of Sediment Quality Investigations, 112 p.
- Marchi, L., Arattano, M., & Deganutti, A. M. (2002). Ten years of debris-flow monitoring in the Moscardo Torrent (Italian Alps). *Geomorphology*, 46, 1–17.
- Masters, J. (2017). Meteorology of Saturday's Colombian Flood Disaster That Killed 254 by Dr. Jeff Masters | Category 6 | Weather Underground. Retrieved March 15, 2018, from <https://www.wunderground.com/cat6/meteorology-saturdays-colombian-flood-disaster-killed-254?mr=1>
- Meng, T., Shi, H., Wang, C., & Wu, B. (2020). Application of principal component analysis in measurement of flow fluctuation. *Elsevier*, (September). <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108503>
- Merritt, W. S., Letcher, R. A., & Jakeman, A. J. (2003). A review of erosion and sediment transport models. *Environmental Modelling and Software*, 18(8–9), 761–799. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(03\)00078-1](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(03)00078-1)
- Milliman, J. D., Lee, T. Y., Huang, J. C., & Kao, S. J. (2017). Impact of catastrophic events on small mountainous rivers: Temporal and spatial variations in suspended- and dissolved-solid fluxes along the Choshui River, central western Taiwan, during typhoon Mindulle, July 2–6, 2004. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 205, 272–294. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2017.02.015>
- Milliman, J. D., & Syvitski, J. P. M. (1992). Geomorphic/Tectonic Control of Sediment Discharge to the Ocean: The Importance of Small Mountainous Rivers. *The Journal of Geology*, 100(5), 525–544. <https://doi.org/10.1086/629606>
- Montoya, J. J., & Contreras, C. (2014). SEDIMENTOS. In *Estudio Nacional del Agua ENA* (pp. 344–401).
- Montoya, L., Silva, S., & González, J. E. (2009). Evaluación De Zonas De Amenaza Por Avenidas Torrenciales Utilizando Metodologías Cualitativas. Caso De Aplicación a La Quebrada Doña María. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 8(30), 11–29. Retrieved from

<http://www.scielo.org.co/pdf/rium/v8n15/v8n15a02.pdf>

- Niño, Y. (2004). *Hidráulica Fluvial y Transporte de Sedimentos. U-Cusos. CI71J-1 Transporte Hidráulico de Sólidos, 2004, Semestre Primavera. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile.*
- Ozturk, U., Wendi, D., Crisologo, I., Riemer, A., Agarwal, A., Vogel, K., ... Korup, O. (2018). Rare flash floods and debris flows in southern Germany. *Science of the Total Environment*, 626, 941–952. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.172>
- Posada, L. (1994). *Transporte de Sedimentos*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia - Facultad de Minas.
- Quiroga, D., Gil, V., & Coronato, A. (2014). Morfometría de la cuenca del río Avilés, Tierra del Fuego, Argentina. Aportes al conocimiento de las condiciones de escurrimiento en territorios semiáridos. *Cuaternalio y Geología*, 28((1-2)), 63–80.
- Restrepo, J. C., & Restrepo, J. D. (2005a). Efectos naturales y antrópicos en la producción de sedimentos de la Cuenca del río Magdalena. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, 29(August), 239–254.
- Restrepo, J. C., & Restrepo, J. D. (2005b). Efectos naturales y antrópicos en la producción de sedimentos de la Cuenca del río Magdalena. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, 29(August), 239–254. Retrieved from https://www.researchgate.net/profile/Juan_Restrepo11/publication/262179198_Efectos_Naturales_y_Antrpicos_en_la_Produccion_de_Sedimentos_de_la_Cuenca_del_Ro_Magdalena/links/00b7d536d05df38454000000.pdf
- Schumm, S. . (1956). Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey. *Geological Society of America Bulletin*, 67(2), 597–646.
- Sharma, S., Gajbhiye, S., & Tignath, S. (2014). Application of principal component analysis in grouping geomorphic parameters of a watershed for hydrological modeling. <https://doi.org/10.1007/s13201-014-0170-1>
- Singh, V. P., Singh, P., & Haritashya, U. K. (2011). *Encyclopedia of Snow, Ice and Glaciers*. Dondrecht, Netherland: Springer Science. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-2642-2>
- Suarez, J. (2001). *Control erosión en zonas tropicales*. Universidad Industrial de Santander.

Sukristiyanti, S., Maria, R., & Lestiana, H. (2017). Watershed-based Morphometric Analysis : A Review. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*.

Wohl, E., Minschwaner, K. R., Bebout, G. E., Borovsky, J. E., Brink, K. H., Haese, R. R., ... Strobel, D. (2010). *Mountain rivers revisited*. Washington D.C.

Ybarra, G., Gil, V., & Campo, A. M. (2018). Análisis del relieve y dinámica fluvial. Cuenca del arroyo Casa de Piedra, Río Negro, Argentina, (October).

Zambrano, J. D. C. (2015). Estimación de la producción y transporte de sedimentos en cuencas urbanas pequeñas a escala de evento mediante un modelo de base física basado en SIG, 272.

Zavoianu, I. (1985). *Morphometry of Drainage Basins*. Elsevier Science.