

ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LA POTENCIA HIDRÁULICA ESPECÍFICA Y
LA VEGETACIÓN RIPARIA SOBRE LA DISTRIBUCIÓN DE SEDIMENTOS EN
CORRIENTES DE MONTAÑA EN EL ORIENTE ANTIOQUEÑO

LAURA VALENTINA RINCÓN ECHEVERRI

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE ORIENTE

FACULTAD DE INGENIERIA

INGENIERÍA AMBIENTAL

RIONEGRO

2022

ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LA POTENCIA HIDRÁULICA ESPECÍFICA Y
LA VEGETACIÓN RIPARIA SOBRE LA DISTRIBUCIÓN DE SEDIMENTOS EN
CORRIENTES DE MONTAÑA EN EL ORIENTE ANTIOQUEÑO

LAURA VALENTINA RINCÓN ECHEVERRI

Trabajo de grado para optar por el título de:

Ingeniera Ambiental

Asesor

Arlex Marín Ramírez

Magister en Recursos Hidráulicos

Grupo de Investigación en Limnología y Recursos Hídricos

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE ORIENTE

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA AMBIENTAL

RIONEGRO

2022

CONTENIDO

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 5 |
| 2. ANTECEDENTES | 7 |
| 3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... | 9 |
| 4. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN | 10 |
| 5. JUSTIFICACIÓN..... | 10 |
| 6. OBJETIVOS..... | 11 |
| 6.1. Objetivo general..... | 11 |
| 6.2. Objetivos específicos | 11 |
| 7. MARCO TEÓRICO | 12 |
| 7.1. Geomorfología fluvial..... | 12 |
| 7.2. Cauce y transporte de sedimentos..... | 13 |
| 7.3. Clasificación de los tipos de río | 14 |
| 7.4. Formas del lecho y mesohabitats | 16 |
| 7.5. Potencia hidráulica total y específica..... | 20 |
| 7.6. Vegetación riparia y NDVI..... | 23 |
| 8. METODOLOGÍA..... | 26 |
| 8.1. Área de estudio | 26 |
| 8.2. Recolección de la información | 28 |
| 8.2.1.1. Caudal medio multianual | 28 |
| 8.2.1.2. Pendiente del lecho y ancho del canal..... | 30 |
| 8.2.2. <i>Potencia hidráulica específica</i> | 31 |
| 8.2.3. <i>Granulometría</i> | 31 |
| 8.2.4. <i>Vegetación riparia</i> | 32 |
| 8.3. Análisis de los datos | 33 |
| 9. RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 34 |
| 9.1. Descripción de los puntos de muestreo..... | 34 |
| 9.2. Distribución del sedimento | 39 |
| 9.3. Vegetación Riparia (NDVI)..... | 44 |
| 9.4. Balance hidrológico de largo plazo..... | 48 |
| 9.5. Potencia hidráulica específica..... | 51 |
| 9.6. Análisis de la influencia..... | 52 |

| | | |
|-----|----------------------------------|----|
| 10. | CONCLUSIONES..... | 57 |
| 11. | REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 59 |

1. INTRODUCCIÓN

Las corrientes de montaña en Antioquia, constituyen una pieza importante de los recursos hídricos del país al ser la fuente principal de alimentación de lagunas, embalses y zonas agrícolas, sin embargo, están sometidos a problemáticas asociadas con la alteración de ecosistemas por fragmentación y pérdida de hábitat, alteración en las dinámicas de regulación hídrica, pérdida de la cobertura vegetal de sus laderas, presión sobre recursos hidrobiológicos, contaminación, entre otros problemas, lo cual conlleva a una alta pérdida de biodiversidad y estado ecológico de los mismos (Charles & Rondón, 2008). En términos generales, en Colombia los estudios realizados en esos ambientes se han orientado principalmente a establecer índices de bioindicación (Riss et al. 2002), al estudio de la taxonomía y de las respuestas de los organismos acuáticos a la calidad de las aguas.

El enfoque hidromorfológico, ha cobrado importancia en las últimas décadas como base para comprender y valorar los espacios naturales asociados a cuerpos de agua (Thorndycraft et al., 2008) ya que las formas que presentan los ríos a través de una cuenca permiten identificar los procesos que allí ocurren. En este sentido, la potencia hidráulica se ha utilizado ampliamente para evaluar de manera general el transporte de los sedimentos y la capacidad de la corriente para realizar trabajos geomórficos, la estabilidad del canal y su sensibilidad a ciertos eventos (Bagnold, 1977; Chang, 1979; Ferguson, 2005; Nanson & Croke, 1992). Adicionalmente, los patrones de vegetación configuran condiciones específicas en términos de régimen hidrológico y suministro de sedimentos (Beechie et al., 2006; Belletti et al., 2015; Steiger et al., 2001).

Los sedimentos, su distribución y la capacidad del río para transportarlos hacen parte de una dinámica natural que debe mantenerse para conservar las ofertas ambientales de los ríos. Sin embargo, en el ámbito local no se cuenta con información suficiente respecto a esta dinámica, por ello, es necesario ampliar la información relacionada con la distribución de los sedimentos en las corrientes y cómo influyen otras variables (presencia/ausencia de vegetación) sobre esta, ya que conociendo esto se podría mejorar el aprovechamiento y adecuada gestión de los ríos y corrientes (Cataño Álvarez, 2015). Por estos motivos, el objetivo del presente trabajo es evaluar la influencia de la potencia hidráulica específica y la vegetación riparia sobre la distribución del sedimento en corrientes de montaña del oriente antioqueño.

2. ANTECEDENTES

Los ríos generalmente presentan un amplio rango de tamaños de partículas en los materiales del lecho, pudiéndose encontrar desde partículas muy finas (limos y arcillas) hasta rocas y piedras de gran tamaño. Adicionalmente los ríos presentan una variación espacial y temporal en la composición del material del lecho a causa de diferentes factores, tales como, el régimen de caudales y las tasas asociadas de transporte de sedimentos, los aportes de los ríos tributarios y, en ocasiones, la intervención humana (Ramírez et al., 2004). Una adecuada caracterización de los materiales del lecho de un cauce permite obtener y estimar información muy valiosa para los diferentes estudios que se puedan desarrollar (hidráulicos, sedimentológicos, morfológicos y ambientales).

La distribución espacial y temporal del tamaño de grano de los sedimentos refleja la variabilidad de las condiciones ambientales bajo las cuales éste se depositó. De acuerdo con (Sahu, 1964) cada ambiente de depósito tiene un rango de condiciones de energía en función del espacio y el tiempo. En este sentido, esta distribución está controlada por la interacción de múltiples variables, como la pendiente del canal, la cual regula el flujo, la velocidad del agua y la energía de la corriente, el grado de confinamiento, la hidrología de la cuenca, el carácter y el suministro de sedimentos, las actividades antrópicas y la vegetación riparia (Reinfelds et al., 2004). Es importante mencionar, que esta formación vegetal de las orillas (riparia) regula los flujos de materia y energía en los ecosistemas acuáticos y terrestres, además, en conjunto con la potencia hidráulica específica influye en los procesos geomorfológicos que tienen lugar en el territorio fluvial ya que el desarrollo de la vegetación

ayuda a la estabilización de los sedimentos asociados a las orillas y llanuras de inundación, lo cual evita la erosión de las márgenes y suministra elementos, tales como ramas, troncos y raíces, que favorecen la retención de sedimentos (Gregory et al., 2003).

Por otro lado, la potencia hidráulica se ha utilizado ampliamente para evaluar de manera general el transporte de los sedimentos y la capacidad de la corriente para realizar trabajos geomórficos, la estabilidad del canal, la sensibilidad del canal a ciertos eventos, formación y forma del mismo (Bagnold, 1977; Chang, 1979; Ferguson, 2005; Nanson & Croke, 1992). Si bien la potencia hidráulica es la que determina en mayor medida la dinámica del cauce y la energía del río para almacenar y transportar sedimentos (Bizzi & Lerner, 2015; Brierley & Fryirs, 2005) la influencia de factores adicionales tales como el grado de confinamiento del valle pueden ser determinantes a escala local de la morfología del cauce y la formación de barras de sedimentos.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La morfología de los ríos depende de las características del flujo hídrico, de la disponibilidad de sedimentos y de las propiedades de estos. Esta interacción origina complejos procesos de transporte de sedimentos y procesos de erosión-sedimentación a lo largo de los cauces fluviales (Basile & A., 2018). Sin embargo, existen muchas dificultades en el estudio de estos sistemas tanto por su complejidad, dada la cantidad de variables que interactúan en su funcionamiento (pendiente, cobertura vegetal, régimen hidrológico, potencia hidráulica...) como por los cambios multifactoriales que se presentan en el flujo y en las propiedades del agua como resultado de la gestión e interacción antrópica con los ríos (Montoya Jaramillo, 2005). Esto, repercute significativamente en la configuración de las formas de los sistemas fluviales, dado que, los sedimentos depositados en el lecho del río alteran las características ecológicas del hábitat fluvial y empobrecen las comunidades biológicas en todos sus aspectos.

En Antioquia, las corrientes han sido tradicionalmente clasificadas y estudiadas en función de caracteres hidrológicos y biológicos, dejando en un segundo plano los cauces, su génesis y dinámica fluvial, lo cual, como se mencionó, es clave en el funcionamiento, el equilibrio el valor y estado ecológico, paisajístico y ambiental de los sistemas fluviales (Horacio & Ollero, 2011). Este desconocimiento de los procesos morfológicos limita las posibilidades de realizar una adecuada gestión y aprovechamiento de los cursos fluviales lo que repercute en un deterioro progresivo de estos y consecuentemente, en una pérdida progresiva de los servicios ecosistémicos que estas corrientes proveen.

4. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Cuál es el efecto de la potencia hidráulica específica y de la vegetación riparia sobre la distribución del sedimento en corrientes de montaña del oriente antioqueño?

5. JUSTIFICACIÓN

Los sedimentos, su distribución y la capacidad del río para transportarlos hacen parte de una dinámica natural que debe mantenerse para conservar las ofertas ambientales de los ríos. Sin embargo, en el ámbito local no se cuenta con información suficiente respecto a esta dinámica, por ello, es necesario ampliar la información relacionada con la distribución de los sedimentos en las corrientes y cómo influyen otras variables sobre esta, ya que conociendo esto se podría mejorar la interacción con los ríos y corrientes, su aprovechamiento y el manejo de las mismas (Cataño Álvarez, 2015).

En este sentido, la incorporación de variables que den cuenta de los procesos morfodinámicos, como la potencia hidráulica específica y la vegetación riparia es de vital importancia dentro de las evaluaciones de estado ecológico de los ríos, ya que, siendo factores que influyen en los procesos de transporte y distribución de los sedimentos brindan información útil sobre el estado hidromorfológico que tienen estos sistemas (Martínez Fernández et al., 2016).

Por lo tanto, la información que se va a generar mediante el análisis de la influencia de los procesos que gobiernan la morfología y la distribución de los sedimentos en corrientes de alta montaña, permitirá mejorar el manejo y la comprensión de las cuencas hidrográficas y su estado ecológico.

6. OBJETIVOS

6.1. Objetivo general

Evaluar la influencia de la potencia hidráulica específica y la vegetación riparia sobre la distribución granulométrica en corrientes de montaña del oriente antioqueño.

6.2. Objetivos específicos

- Analizar la idoneidad de la potencia hidráulica como variable indicadora de tamaño y distribución de sedimentos en el cauce.
- Comparar el efecto del ancho del cauce, el caudal y de la pendiente sobre los procesos de distribución del sedimento.
- Identificar la existencia de relaciones significativas entre la vegetación riparia y la granulometría de las corrientes.

7. MARCO TEÓRICO

7.1. Geomorfología fluvial

Un río es un sistema natural de máxima dinámica y complejidad, en un ajuste permanente en el espacio y en el tiempo ante las fluctuaciones de los caudales líquidos y sólidos, lo que se traduce en movilidad lateral y vertical (Werritty, 1997). En los últimos años la geomorfología fluvial, como ciencia encargada del estudio de las interacciones entre las formas y los procesos del río, se ha convertido en una disciplina muy útil para la valoración, ordenación, conservación y mejora de unos sistemas fluviales muy amenazados (Thorne et al., 1997).

La geomorfología fluvial estudia las formas y depósitos de los ríos, arroyos y torrentes. Tiene un papel relevante en el estudio de la génesis y propagación de las crecidas y avenidas fluviales así como en sus efectos de inundación por anegamiento de las márgenes en la corriente donde tienen lugar estos eventos (Volonté, 2017). Esta influencia se manifiesta en una triple faceta: configuracional en cuanto a las formas de la superficie terrestre; dinámica, referida a las acciones que desarrollan los procesos fluviales y los productos resultantes y evolutiva por la existencia de tendencias y ritmos en la modificación del paisaje. La respuesta de cada cuenca es única y las interrelaciones entre la estructura de la red de drenaje y los procesos hidrológicos, biológicos e hidráulicos son características particulares de cada una (Marchetti, 2000).

7.2. Cauce y transporte de sedimentos

En un sistema fluvial como el propuesto por (Schumm, 1977), se pueden distinguir tres zonas: (I) Producción, (II) Transferencia y (III) Sedimentación (Figura 1). La zona de producción (I) representa la cuenca alta, donde se producen los aportes tanto líquidos como sólidos. Estos aportes dependen de factores como el clima, relieve, litología, suelo, cobertura vegetal, uso del suelo, entre otros. En esta zona es donde se generan las entradas de agua y sedimento que alimentan la zona de transferencia (II). Generalmente, en la zona (I) la densidad de drenaje es alta, el curso principal posee una pendiente elevada al igual que los afluentes con tendencia a la erosión del lecho (Basile & A., 2018).

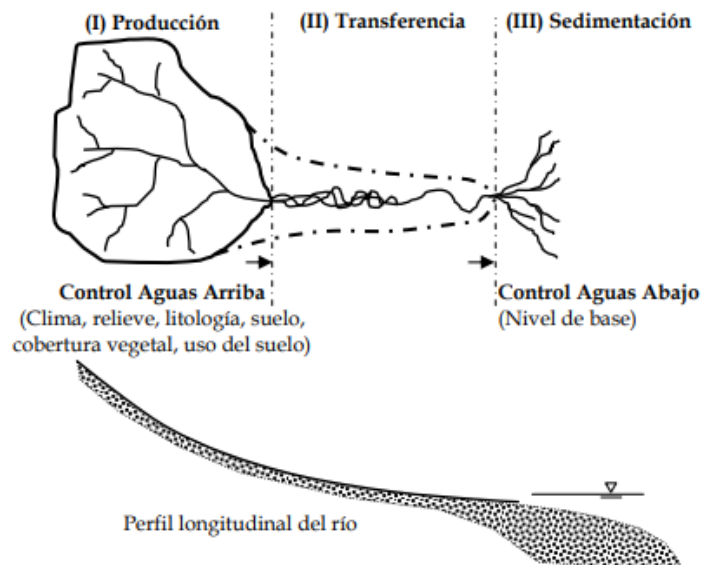


Figura 1. Representación esquemática de un sistema fluvial. Fuente: (Schumm, 1977).

La principal función de la zona de transferencia (II) es transportar el sedimento desde la zona de producción (I) hasta la zona de sedimentación (III). En la zona de transferencia (II) se observan cauces de tipo trezado en la parte superior, donde los gradientes topográficos son más pronunciados y los sedimentos más gruesos, y cauces meándricos en la parte inferior, donde las pendientes son más bajas, los sedimentos son más finos y las planicies de inundación más amplias (Basile & A., 2018).

7.3. Clasificación de los tipos de río

Para cualquier tipo de río, su morfología es fruto de un equilibrio dinámico entre la carga de sedimentos que recibe y su capacidad de transporte. Por tanto, el río ajusta su morfología ante cualquier cambio en alguna de estas variables. Dentro de los cursos fluviales existe una infinita diversidad de cauces (Tinkler & Wohl, 1998). La diferencia en el trazado de cada uno de los cauces viene determinada por las características de la cuenca vertiente, siendo la forma del río la respuesta a esas características. El resultado es un amplio abanico de cauces fluviales, simplificados por varios autores en cuatro tipos básicos (Figura 2), en relación con el índice de sinuosidad y el número de canales, a saber, rectos, meandriformes, trezados y anastomosados (Ollero, 2007). Es importante mencionar, que se hace referencia a la forma en planta.

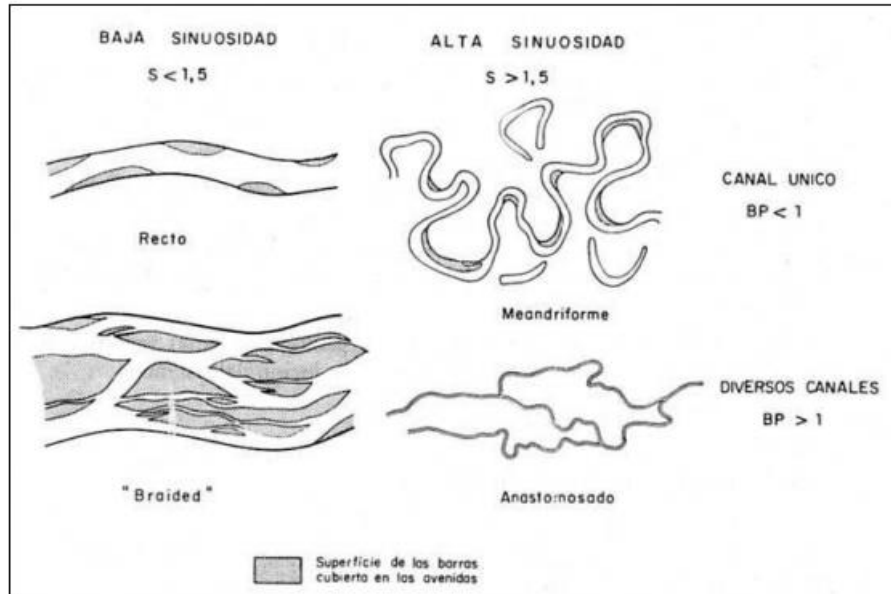


Figura 2. Tipos de trazado en el cauce del río. Fuente: (Ollero, 2007).

Los ríos de montaña se caracterizan por estar asociados a altas pendientes, flujos turbulentos, materiales de lecho grueso y poca profundidad de flujo, por lo tanto, suelen acarrear gran cantidad de sedimentos (Jarrett, 1990). En su salida a la llanura del piedemonte, la capacidad de arrastre disminuye, por lo que se depositan los sedimentos transportados. Éstos, a menudo, obstaculizan el cauce, que se ve forzado a migrar, formándose lo que se denominan ríos trenzados o anastomosados. En ambos casos suele haber múltiples cauces, pero, así como en los trenzados éstos son muy inestables, con lo que suelen estar rodeados de amplias zonas con gravas desnudas, los ríos anastomosados acostumbran a ser más estables, y las áreas entre los cauces suelen estar colonizadas por la vegetación (Elosegi & Sabater, 2009).

Aguas abajo, la pendiente del valle disminuye aún más, con lo que se reduce la capacidad de transporte de sedimentos. Los ríos pasan a tener lechos arenosos o limosos, y normalmente adquieren un cauce meandriforme que discurre en medio de una amplia llanura de inundación. En esta llanura, el sustrato está conformado por arenas o limos depositados en el pasado por el propio río, lo que hace que las márgenes sean poco estables, y favorece la migración lateral (Elosegi & Sabater, 2009).

7.4. Formas del lecho y mesohabitats

(Montgomery & Buffington, 1997) definieron los cinco tipos de secuencias de formas del lecho más comunes en los ríos de montaña (Figura 3):

- Cascada: Consiste en ríos en los que la disipación de energía es dominada por continuos chorros de agua que rodean y vierten por encima de grandes cantos rodados o gravas. Están caracterizados por una configuración desorganizada del sustrato en el cauce, tanto lateral como longitudinalmente (Figura 3A). Estos cauces pueden presentar pequeñas pozas menores con longitudes similares a un ancho del cauce (SEA, 2016).
- Cauces con secuencia de saltos y pozas: Se caracterizan por una secuencia de saltos organizados por una línea de cantos rodados ubicados transversalmente en el cauce, lo cual da paso a una formación de paso entre cada salto (Figura 3B). La morfología

del lecho en este tipo de secuencias suele estar asociada a altas pendientes y una razón pequeña entre el ancho y la profundidad (SEA, 2016).

- Secuencia de lechos planos: Hace referencia a cauces planos con cantos y gravas en el lecho del fondo (Figura 3C) (SEA, 2016).
- Secuencia de corrientes y pozas: Este tipo de alternancia presenta un lecho ondulante, tanto transversal como longitudinal, que define una secuencia de barras, pozas y corrientes (Figura 3D). Las pozas se aprecian como depresiones en el lecho del río y suelen estar espaciadas entre 5 y 7 veces el ancho del río. El sustrato varía desde arenas hasta cantos, siendo la grava el sustrato más común (SEA, 2016).
- Cauce de barras y dunas: Este tipo de cauce está asociado a bajas pendientes (Figura 3E). La configuración del lecho de fondo de este tipo de cauce depende de la profundidad, velocidad, tipo de sustrato y tasa de transporte de sedimento. La frecuencia en la movilidad de sedimento condicionará si se produce un cauce de barras y dunas o un cauce de rápidos-lentos (SEA, 2016).

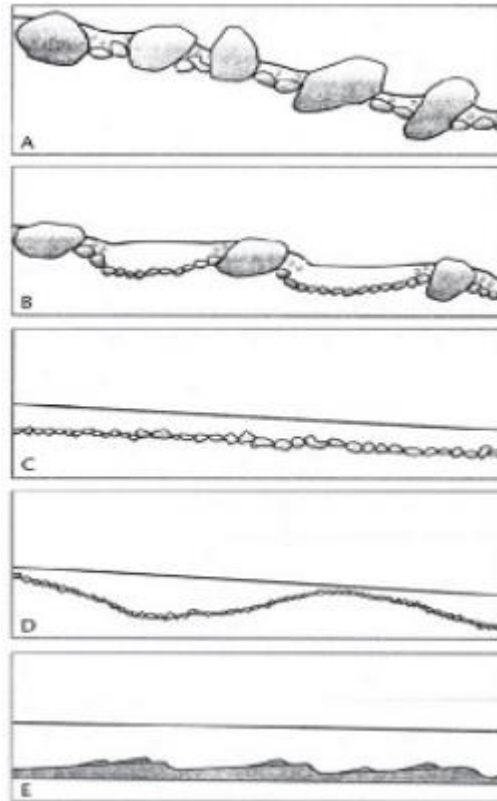


Figura 3. Secuencias en la forma del lecho. Simbología: cascada (A), secuencia de saltos y pozas (B), lechos planos (C), secuencia de corrientes y pozas (D) y cauce de barras y dunas (E). Fuente: (Montgomery & Buffington, 1997).

Teniendo en cuenta lo anterior, en un tramo de río pueden existir muchas variaciones asociadas a las formas del lecho, pozas por socavación y barras de sedimentos. Estas singularidades provocan variaciones en la profundidad y velocidad del escurrimiento, creando un mosaico de unidades hidromorfológicas denominadas mesohábitats (SEA, 2016). En los mesohábitats, los parámetros hidráulicos y morfológicos tienen características específicas, presentando distribuciones y variabilidad características en términos de velocidad, profundidad, tipo de sustrato, entre otras variables. En “*The MesoHABSIM model*

revisited”, Parasiewicz (2007) realizó una recopilación de las definiciones de distintos mesohábitats provenientes de varios autores. En esta recopilación se distinguen los mesohábitats rápidos tipo corrientes (Riffle), rápidos (Rapid), cascadas (cascade), run, ruffle y fast run. Dentro de los mesohábitats lentos se distinguen los de tipo pozas (pool), pozas de salto (plunge pool), remansos (backwater) y tablas (glide). También define un mesohábitat que no está asociado a las características del escurrimiento sino que a las características morfológicas del cauce, llamado brazo secundario o lateral (side arm) (SEA, 2016). En la Figura 4 se detallan las características más relevantes de los mesohábitats anteriormente definidos.

| Tipo de mesohábitat | Nombre | Características |
|---------------------|--------------------------------------|---|
| Rápidos | Corriente (<i>riffle</i>) | Escurrecimiento somero con velocidades moderadas. Se aprecia algo de turbulencia superficial y altas pendientes. |
| | Rápido (<i>Rapid</i>) | Altas pendientes con elevadas velocidades. Presencia de sustrato grueso. Mayor nivel de turbulencia en la superficie. |
| | Cascada (<i>Cascade</i>) | Secuencia de rápidos con pequeñas caídas de agua y muy pequeñas pozas aguas abajo de las bolones. |
| | <i>Run</i> | Cauce prismático con un <i>talweg</i> bien determinado. El lecho de fondo es plano longitudinalmente y lateralmente cóncavo. |
| | <i>Ruffle</i> | Transición entre rápidos y corrientes o <i>run</i> . |
| | <i>Fast run</i> | Flujo rápido uniforme. |
| Lentos | Poza (<i>pool</i>) | Aguas profundas producto de una obstrucción parcial o total del cauce. Velocidades bajas y forma cóncava del lecho de fondo. |
| | Poza de salto (<i>plunge pool</i>) | El flujo principal pasa por sobre una obstrucción provocando una socavación local aguas abajo. |
| | Remanso (<i>Backwater</i>) | Zonas con bajas velocidades en los márgenes del río, producidas por vórtices aguas abajo de obstrucciones. |
| | Tabla (<i>Glide</i>) | Aguas someras moderadas con presencia de un flujo laminar carente de turbulencia pronunciada. |
| Otro | Brazo lateral (<i>Side arm</i>) | Cauces alrededor de islas, menores a la mitad del ancho del río, frecuentemente a diferente elevación que el cauce principal. |

Figura 4. Definición de Unidades Hidromorfológicas o Mesohábitats. Fuente: (Parasiewicz, 2007).

Considerando lo expuesto previamente, conocer el tipo de sustrato es de vital importancia para la caracterización acertada de los mesohabitats, por lo tanto, realizar una caracterización de tamaño del grano y acogerse a una escala granulométrica permite clasificar los diámetros de los sedimentos de manera clara (Figura 5).

| Tipo de sustrato | Diámetro (mm) | Detalles |
|------------------|---------------|--|
| Roca madre | - | Incluir también bloques mayores de 1 m |
| Bloques | > 250 | Mayores que la palma de la mano |
| Cantos | 60 – 250 | Entre un puño y una palma |
| Guijarros | 20 – 60 | Entre una uña de pulgar y un puño |
| Grava | 0,2 – 20 | Menor que la uña del pulgar |
| Arena | 0,006 – 0,2 | Tacto áspero, no mancha |
| Limo | < 0,006 | Tacto suave, mancha |

Figura 5. Tipos de sustrato, según la escala de Wentworth. Fuente: (Wentworth, 1992).

7.5. Potencia hidráulica total y específica

Los procesos geomórficos de los ríos y las formas resultantes son impulsados por la interacción de fuerzas impulsoras (como el gradiente y la descarga del canal) y de resistencia dada por el tipo, tamaño del sedimento y las formas del lecho. Las diversas relaciones que se pueden establecer entre estas fuerzas contrastantes son funciones del entorno geológico, la hidrología de la cuenca y la historia geomórfica de la cuenca y producto de estas se crean la gran variedad de estilos de ríos presentes en la naturaleza (Bizzi & Lerner, 2015). Teniendo en cuenta lo anterior, la capacidad de un río para erosionar el lecho, transportar sedimentos

y modificar la forma del paisaje se evalúa comúnmente en términos de la potencia hidráulica específica de la corriente o de la potencia hidráulica total (Kale & Hire, 2007).

La potencia hidráulica total (o bruta) es una medida de las principales fuerzas impulsoras que actúan en el canal, específicamente de la energía que tiene el caudal circulante para desarrollar ajustes geomorfológicos a través de procesos de erosión, transporte y sedimentación (K. Fryirs, 2003), es un reflejo de la energía total disponible para realizar cambios en el trazado a lo largo del cauce de un río. La potencia total (W/m) de la corriente se puede estimar como la multiplicación del caudal Q (m^3/s) la pendiente del canal S (m/m) y el peso específico del agua ($9800 N/m^2$):

$$\Omega = \gamma QS.$$

La potencia hidráulica específica (o unitaria) (W/m^2) es una medida de gasto de energía por unidad de ancho de canal, se estima como potencia total de la corriente dividida por el ancho del flujo:

$$\omega = \Omega/w.$$

La distribución de la potencia total (bruta) a lo largo de la corriente tiene forma de "joroba" (Figura 6), ya que, pendientes pronunciadas y altas descargas producen un pico en la potencia total de la corriente alrededor de la transición de la fuente a la zona de transferencia, reflejando aumentos en la descarga a medida que redes tributarias más

pequeñas se unen a la corriente principal y pendientes relativamente empinadas dentro de valles parcialmente confinados.

Aguas arriba de la "joroba", la descarga es demasiado baja como para producir condiciones de corriente de alta potencia, y aguas abajo de la joroba la pendiente es demasiado baja. Como resultado de esta relación, se produce un trabajo geomórfico significativo (transporte y transferencia de sedimentos) a lo largo del sistema fluvial. Las transiciones en la distribución de depósitos y sumideros de sedimentos en la corriente y en la planicie de inundación ocurren cerca de esta joroba.

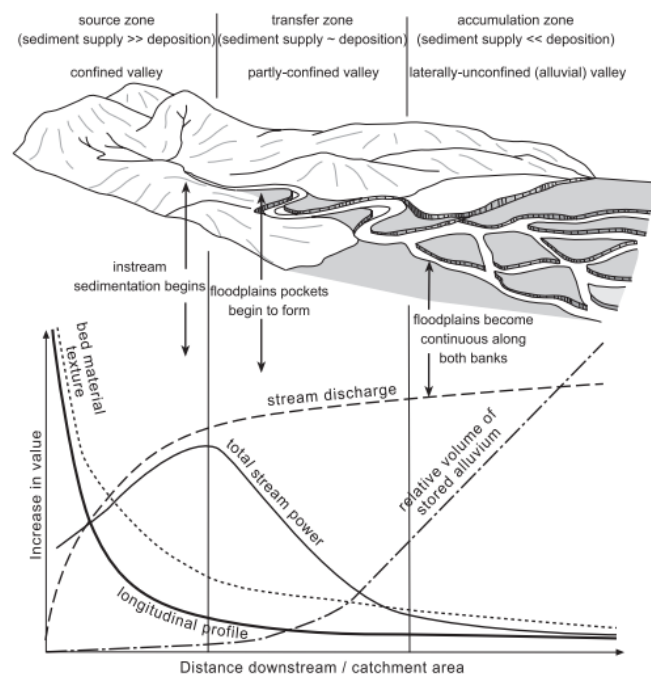


Figura 6. Representación esquemática de la relación entre los cambios río, la pendiente, la descarga, la textura del material del lecho y la potencia total de la corriente.

Fuente: (K. A. Fryirs & Brierley, 2012).

Mediante la relación entre el área de drenaje (un sustituto del caudal) y la pendiente a lo largo de los ríos se puede discriminar entre ríos de lecho rocoso (Figura 3A-B) y ríos aluviales (Figura 3D-E) (Montgomery & Buffington, 1997). Esto determina la posición aguas abajo en la que los sedimentos comienzan a almacenarse en el lecho del canal. Por lo general, los ríos aluviales comienzan a formarse después de la joroba de la corriente, donde la energía disminuye y los valles comienzan a ensancharse de tal manera que el fondo del valle está disponible para que se acumulen los sedimentos.

7.6. Vegetación riparia y NDVI

Es bien sabido, que la vegetación riparia y más aún la nativa incrementa la protección del suelo, frena la esorrentía y reduce la velocidad y el volumen del escurrimiento superficial favoreciendo la infiltración. La fuerza de la corriente y los cambios morfológicos del cauce influyen sobre la flora ribereña (Opperman & Merenlender, 2011) y, al controlar la deposición y erosión de sedimentos, tienen un papel fundamental en los procesos que ocurren dentro de los cuerpos de agua (Corenblit et al., 2009). Además, la vegetación estabiliza los márgenes de los ríos y arroyos, provee de hojarasca y de madera de gran tamaño a los cuerpos de agua (este material vegetal forma zonas de retención de sedimentos) retiene y recicla nutrientes y modifica las condiciones micro climáticas (Gregory et al., 1991). Es importante mencionar, que los componentes radiculares contribuyen a aumentar la resistencia mecánica del suelo, y la presencia de materia orgánica, ofreciendo estabilidad, rugosidad y porosidad, lo que supone un aumento en la capacidad de infiltración de las fuentes (Alvarado-García & Zúñiga-Amador, 2018).

Adicionalmente, la existencia de vegetación en la cuenca modifica tanto el régimen hidrológico con la disminución de la escorrentía superficial, como el régimen sedimentológico con la disminución de los procesos de erosión. La variación espacial y temporal de la cobertura vegetal en las áreas de drenaje influye en la respuesta de los suelos a eventos de lluvia de diferentes magnitudes e intensidades que generan cambios en el sistema de drenaje de las áreas de escurrimiento.

En relación con lo anterior, el análisis espectral de las cubiertas vegetales mediante el uso de imágenes satelitales ha sido la base para obtener una serie de índices que se basan en el contraste entre las bandas del espectro (Richards & Jia, 2006). Estos se calculan a partir de la combinación matemática de dos o más bandas de una imagen satelital multiespectral y tienden a presentar las características de la vegetación. Los índices y productos de vegetación que derivan de estas técnicas de percepción remota han sido una de las formas más efectivas para monitorear los cambios espacio-temporales de la vegetación, por lo tanto, los índices de vegetación obtenidos a partir de sensores remotos, como el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), permiten conocer las condiciones de la cobertura vegetal y evaluar el porcentaje de cambio en el tiempo. El NDVI (Rouse et al., 1974) es el índice espectral más comúnmente utilizado para la descripción de la salud y otros parámetros de la vegetación.

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

Su fórmula normaliza la diferencia entre la reflectancia en el rojo (centrada en 670 nm) y en el infrarrojo cercano (centrada en 860 nm), que son las regiones de mayor reflectancia y absorción de la clorofila, lo cual lo hace aplicable en una amplia gama de condiciones. Sus valores varían de -1 a 1, correspondiendo los valores negativos al agua y los valores cercanos a cero al suelo desnudo, nubes, nieve o concreto. El rango común para la vegetación se encuentra entre 0.2 a 0.8 (por encima del cual se tiende a saturar en bosques tropicales) (Pérez & Menes, 2015).

Es importante considerar, que este índice no es solo un indicador de la biomasa, vigorosidad, densidad de la cobertura vegetal, sino que, numerosos estudios han corroborado la elevada correlación que existe entre el NDVI con la riqueza de especies (Levin et al., 2007). Los valores de referencia de NDVI más utilizados por la literatura son los propuestos por (Merg et al., 2011) (Figura 7).

| Clasificación | Valor |
|---------------------------|------------|
| Nubes y agua (NA) | < 0.01 |
| Suelo sin vegetación (SV) | 0.01 - 0.1 |
| Vegetación ligera (VL) | 0.1 - 0.2 |
| Vegetación mediana (VM) | 0.2 - 0.4 |
| Vegetación alta (VA) | > 0.4 |

Figura 7. Clasificación de los valores de NDVI. Fuente: (Merg et al., 2011).

8. METODOLOGÍA

8.1. Área de estudio

Con un área total de 2656.19 Km², la cuenca del río Samaná Norte se extiende por parte del territorio de los municipios de Alejandría, El Carmen de Viboral, El Santuario, Guatapé, San Rafael, San Carlos, Granada, Cocorná, San Francisco, San Luis y Sonsón. La precipitación anual oscila entre los 2.000 y 4.000 mm, la temperatura promedio entre 23 – 27°C y alturas entre 300 y 3.200 msnm (CORNARE, 2014).

Los sitios de interés se sitúan dentro de la cuenca del río Samaná Norte (Figura 8), específicamente en algunos de sus afluentes: Quebrada La Carbonera (E1), Quebrada San Antonio (E2), Quebrada La Calera (E3), Quebrada La Madre Vieja (E5), Quebrada La Trinidad (E8), dos tramos del Río El Melcocho (E4 y E7) y dos tramos del Río Tafetanes (E9 y E10). Se seleccionaron en total 13 puntos de muestreo correspondientes a rápidos (H1), pozas (H2) y rizados (H3) dentro de los afluentes previamente mencionados.

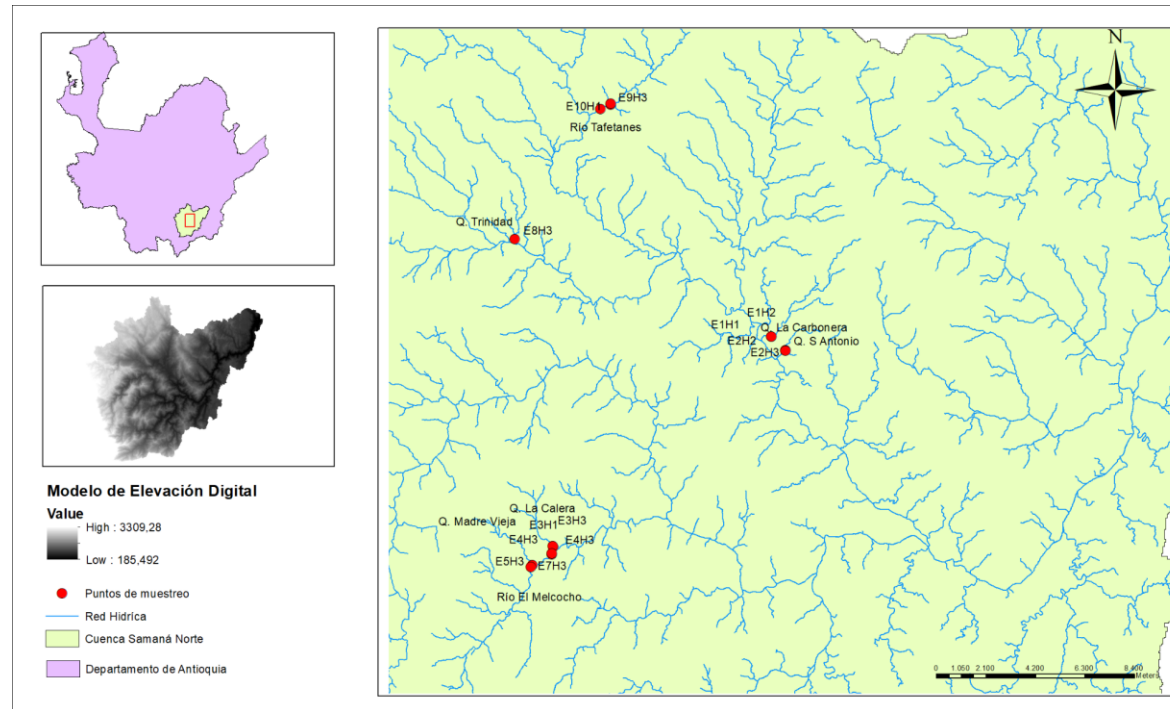


Figura 8. Área de estudio y puntos de muestreo. Fuente: elaboración propia.

8.2. Recolección de la información

Para cada tramo seleccionado se determinó:

8.2.1.1. *Caudal medio multianual*

Para la estimación del caudal medio se utilizó el método del balance hidrológico de largo plazo mediante el software ArcGis 10.5, teniendo como base principal lo expuesto en “Hidro-Sig : Una Herramienta para la Estimación de Balances Hidrológicos de Colombia” y “Cursos de capacitación Hidro-Sig 4.0 -MapWindow Estimación de Caudales” (Mesa et al., 1999; Universidad Nacional De Colombia, 2010).

Se requirió de la delimitación de las cuencas, la red de drenaje, una capa de precipitación y evaporación real, y una capa de direcciones de flujo. A continuación, se describe el proceso realizado:

Para la elaboración del mapa de precipitación media multianual se extrajo información de precipitación real dentro del área de estudio a través de la plataforma de Consulta y Descarga de Datos Hidrometeorológicos del IDEAM (dhime). Se filtraron todas las estaciones de manera que, estuvieran dentro del área de la cuenca o cerca de ella y contaran con información continua de precipitación por más de 30 años. Teniendo en cuenta

lo anterior, las estaciones meteorológicas utilizadas fueron TAFETANES [23080820], COCORNA [23080750] y JORDAN EL [23080810].

Con la información extraída de las estaciones previamente mencionadas se realizó una interpolación del campo precipitación mediante la herramienta Kriging de ArcGis 10.5, para finalmente obtener un valor de precipitación asociado a cada píxel dentro de la unidad hidrográfica.

Para la obtención del mapa de evapotranspiración real, se calculó inicialmente el mapa promedio anual de temperatura superficial del aire (T en °C) utilizando la siguiente relación con la altura (H en m sobre el nivel del mar) (ecuación 2):

$$T = 29.42 - 0.0061 H \quad (\text{ecuación 2})$$

A partir de lo anterior, y conociendo ya el valor de la temperatura, se procedió a calcular el mapa de evapotranspiración real promedio anual (ETR en mm/año) empleando el método de Turc, el cual se describe a continuación (ecuación 3 y 4):

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}} \quad (\text{ecuación 3})$$

$$L = 300 + 25T + 0.05T^3 \quad (\text{ecuación 4})$$

Donde, P es la precipitación media multianual (mm/año) y T la temperatura promedio anual (°C).

Finalmente, para la estimación de caudales medios se utilizó el método del balance hidrológico a largo plazo, donde se supuso que en un período de tiempo largo (décadas) el almacenamiento en el suelo y en la atmósfera es despreciable. El caudal medio en la cuenca de estudio se calculó como:

$$Caudal\ Medio = \int_{\text{ÁreaCuenca}} [P(x, y) - E(x, y)] dA \quad (\text{ecuación 5})$$

Donde, P(x,y) es la precipitación que recibe el punto (x,y) en el período considerado, E(x,y) es la lámina de agua que se pierde por evapotranspiración en el punto (x,y) en el mismo período, y dA es un diferencial de área de la cuenca. Esta ecuación calcula la producción media de esorrentía que se produce en cada píxel del mapa que representa la región, suma el resultado y se obtiene el mapa de caudales medios.

8.2.1.2. *Pendiente del lecho y ancho del canal*

Se realizó un levantamiento topográfico de cada tramo usando equipamiento topográfico: nivel, mira y lienza con el fin de determinar el ancho de banca llena y la pendiente longitudinal del cauce (Harrelson et al., 1994). Adicionalmente, mediante ArcGis 10.5 se realizó el cálculo de la pendiente media de cada una de las microcuencas.

8.2.2. *Potencia hidráulica específica*

Los valores de la potencia hidráulica específica (SSP, Wm^{-2}) se calcularon a partir de la siguiente expresión (ecuación 1):

$$SSP = \gamma QS/w \quad (\text{ecuación 1})$$

Donde γ es el peso específico del agua ($= 9800 \text{ N} / \text{m}^3$), Q el caudal medio multianual (m^3 / s), S es la pendiente del lecho (m / m), y w es el ancho del canal (m) (Bagnold, 1966, 1977).

8.2.3. *Granulometría*

Para determinar la curva granulométrica del material del lecho en las secciones determinadas se realizó el conteo aleatorio de granos según el procedimiento sugerido por Wolman (1954). Los parámetros a determinar para el análisis son los diámetros característicos D85 (mm) y D50 (mm), teniendo en cuenta que, son usados frecuentemente

para caracterizar los lechos (Arévalo-Mendoza et al., 2017). Adicionalmente, se calculó el porcentaje y el diámetro intermedio de arenas, gravas, guijarros y cantos.

8.2.4. *Vegetación riparia*

La vegetación riparia fue considerada en una franja de 30 m a lado y lado del cauce principal aguas arriba de los puntos de muestreo mediante la implementación del el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) (Rouse et al., 1974). Este índice es calculado mediante el uso de imágenes satelitales multiespectrales usando la siguiente ecuación:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

Donde *NIR* y *RED* son la reflectividad en el infrarrojo cercano y en el rojo respectivamente. El intervalo de variación del índice es entre -1 y 1, de manera tal, que los valores negativos corresponden al agua y los valores cercanos a cero al suelo desnudo, nubes, nieve o concreto. El rango común para la vegetación se encuentra entre 0.2 a 0.8 (Pérez & Menes, 2015). Adicionalmente, se realizó una caracterización del competente florístico, para lo cual, se establecieron dos transectos por tramo, es decir, uno en cada margen del río de 20x2 metros, dando prioridad a los individuos de mayor porte ($DAP > 10$ cm). Se recolectaron estructuras vegetativas y reproductivas de las especies riparias para su correcta

determinación. Las muestras fueron incluidas en el Herbario de la Universidad Católica de Oriente (HUCO).

8.3. Análisis de los datos



Para procesar la información se utilizaron los softwares R-Wizard 4.3 y JASP 0.14.1.0, se recurrió a un análisis multivariado de componentes principales (PCA), una exploración con modelos lineales y no lineales con el fin de encontrar relaciones entre la variable dependiente (tamaño del grano) y las independientes (Potencia hidráulica específica, NDVI).



9. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

9.1. Descripción de los puntos de muestreo

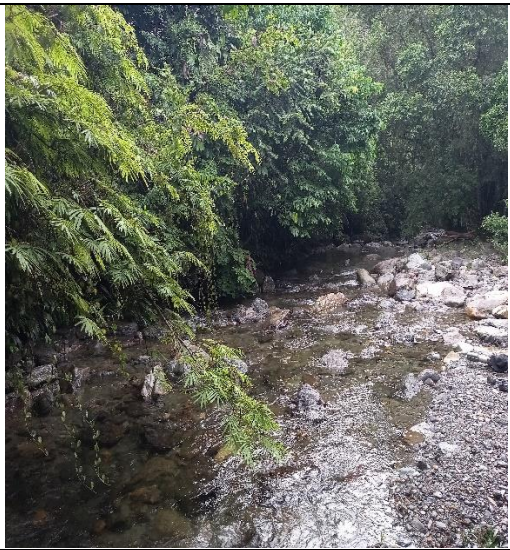


En la tabla 1 se presenta una descripción cualitativa de los puntos de muestreo trabajados.

Tabla 1. Descripción cualitativa de los puntos de muestreo.

| | Punto de muestreo | Descripción |
|------|---|--|
| E1H1 |  | <p>Corriente: Quebrada La Carbonera Mesohabitat: Rápido Descripción: Buena estructura de la cobertura vegetal riparia en ambas márgenes, se identifican especies riparias nativas, diversidad de hábitats. Rápido con dominancia de gravas y guijarros.</p> |
| E1H2 |  | <p>Corriente: Quebrada La Carbonera Mesohabitat: Poza Diversidad en el tamaño del grano, presencia de arena, gravas, guijarros y cantos. Vegetación riparia con un buen grado de conservación. Se identifican especies con valor ecológico.</p> |

| | | |
|------|---|---|
| E2H2 |  | <p>Corriente: Quebrada San Antonio Mesohabitat: Poza Deforestación ribereña, erosión y cercanía a carretera en la margen derecha del río, en la margen izquierda ganadería. Poza con presencia de arenas.</p> |
| E2H3 |  | <p>Corriente: Quebrada San Antonio Mesohabitat: Rizo Márgenes alterados con poca variación del ancho, poca vegetación de ribera, se observa ganado con acceso directo al río. Rizo con predominancia de guijarros.</p> |
| E3H1 |  | <p>Corriente: Quebrada La Calera Mesohabitat: Rápido Deforestación ribereña, descargas puntuales de agua residual, pastos, plantaciones de plátano y yuca en la margen derecha. Margen izquierda con buena estructura de la cobertura vegetal. Rápido con dominancia de gravas y guijarros.</p> |

| | | |
|------|---|---|
| E3H3 |  | <p>Corriente: Quebrada La Calera Mesohabitat: Rizo Deforestación ribereña, pastos, plantaciones de plátano en la margen derecha. Margen izquierda con buena estructura de la cobertura vegetal, diversidad de hábitats. Rizo, dominancia de gravas.</p> |
| E4H1 |  | <p>Corriente: Río Melcocho (P.Amarillo) Mesohabitat: Rápido Bosque ribereño relativamente prístino en ambas márgenes, dificultad de acceso, poca erosión de las márgenes, diversidad de hábitats. Rápido, dominancia de gravas y guijarros, presencia de cantos rodados.</p> |
| E4H3 |  | <p>Corriente: Río Melcocho (P.Amarillo) Mesohabitat: Rizo Bosque ribereño relativamente prístino con buena estructura de la cobertura vegetal, vegetación nativa y de gran porte. Presencia de cantos rodados, sin embargo, en este rizo, dominan las gravas. Río de gran magnitud.</p> |

| | | |
|------|---|---|
| E5H3 |  | <p>Corriente: Quebrada Madre Vieja Mesohabitat: Rizo Vegetación riparia nativa de buen porte, depósito de gravas, se destaca la presencia de un caño. Rizo con espejo de agua no muy pronunciado. Quebrada tributaria del río el Melcocho.</p> |
| E7H1 |  | <p>Corriente: Río Melcocho Mesohabitat: Rápido Gran diversidad de hábitats y sedimentos, se identifica la presencia de cantos rodados, lecho rocoso y proceso de depositación de gravas. Vegetación riparia en muy buen grado de conservación, dificultad de acceso.</p> |
| E8H1 |  | <p>Corriente: Quebrada Trinidad Mesohabitat: Rápido Presencia de material vegetal en el espejo de agua, la cual crea una especie de barrera. Se identifica un gran depósito de arenas en la parte alta. Cercanía a carretera, se evidencia afectación antrópica, poca vegetación riparia en ambas márgenes, fácil acceso.</p> |

| | | |
|-------|---|--|
| E8H3 |  | <p>Corriente: Quebrada Trinidad Mesohabitat: Rizo Presencia de pastos, deforestación ribereña, depósito de arena, cercanía a carretera. Elementos urbanos presentes (tienda). Diversidad relativamente baja en la morfología del canal.</p> |
| E9H3 |  | <p>Corriente: Río Tafetanes Mesohabitat: Rizo Márgenes alterados, deforestación ribereña casi total, disminución significativa del espejo de agua posiblemente causado por la operación de un trasvase aguas arriba (Trasvase Tafetanes). Degradación marcada y evidente.</p> |
| E10H1 |  | <p>Corriente: Río Tafetanes Mesohabitat: Rápido Sedimentos de gran tamaño, aumento en la pendiente del cauce. Presencia excesiva de larvas de mosca, ambas márgenes intervenidas antrópicamente. Ausencia de vegetación de ribera y de pastos. Se evidencia fácil acceso y uso recreativo.</p> |

9.2. Distribución del sedimento

El análisis de la distribución del sedimento tuvo en cuenta la interpretación del gráfico de frecuencia versus el diámetro del sedimento para cada punto de muestreo a lo largo de las fuentes (Figura 9). A partir de la forma de las series se determinó si la distribución granulométrica de las estaciones es unimodal o bimodal (y en algunos casos polimodal).

Teniendo en cuenta lo anterior, se clasificó el punto E4H1 como unimodal, los valores de datos que producen la frecuencia más alta corresponden a un único tipo de sedimento, guijarros.

Las estaciones E1H1, E1H2, E2H2, E3H1 y E8H3 presentaron comportamientos de bimodalidad y en las demás estaciones (E2H3, E3H3, E4H4, E5H3, E8H1, E7H1, E9H3, E10H1) se registró una tendencia polimodal. Es importante mencionar, que tanto la bimodalidad, como la polimodalidad en la mayoría de los casos indican presencia de depósitos de grava y arena en los puntos de muestreo (Dumitriu et al., 2011).

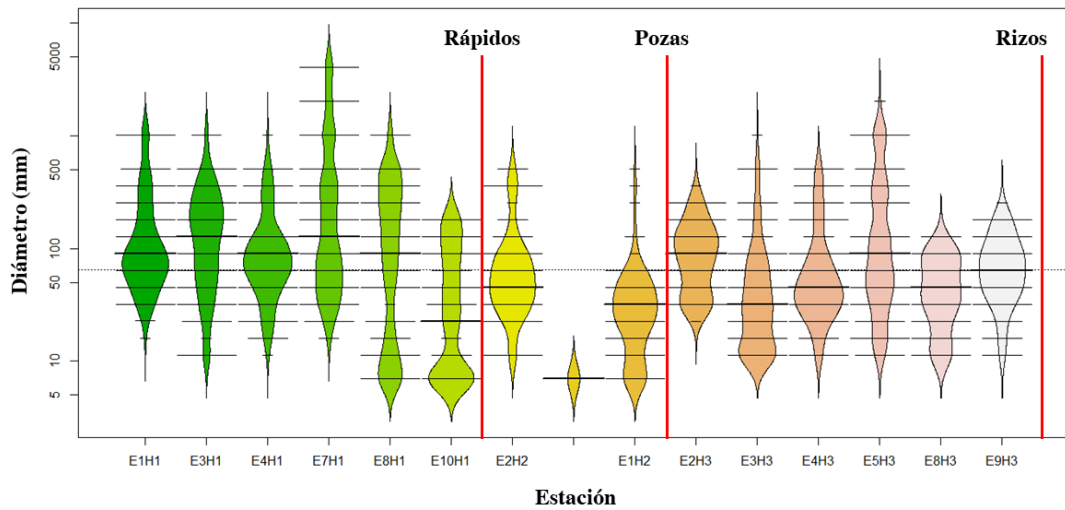


Figura 9. Frecuencia de la distribución del tamaño del sedimento. Fuente:
Elaboración propia.

La distribución del tamaño del grano de los sedimentos mostró que la variabilidad fue mayor en las estaciones 5 y 7 (Quebrada Madre Vieja y Río El Melcocho), dado que, el tamaño del grano fluctuó entre gravas muy gruesas y cantos medianos y gravas muy gruesas y cantos grandes, respectivamente. En las demás estaciones el tamaño del grano de los sedimentos fluctuó entre los límites de gravas gruesas, guijarros grandes y cantos pequeños.

Para complementar el análisis de la distribución del sedimento, se consideró el porcentaje de arenas, gravas, guijarros y cantos rodados, en todos los puntos de muestreo (Figura 10).

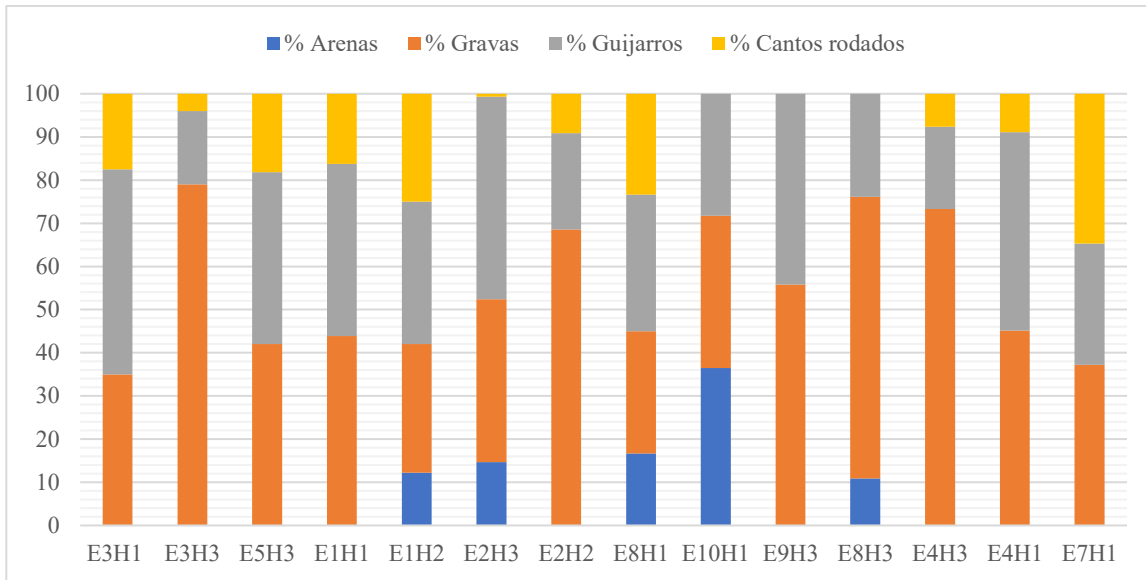


Figura 10. Porcentaje por tipo de sedimento.

Los mayores tamaños de sedimentos se registraron en dos tipos de meso hábitats, en un rápido (H1) en el Río el melcocho (E7) con un D_{85} de 760 mm y en un rizo (H3) en la quebrada Madre Vieja (E5) con un D_{85} de 330 mm. Sin embargo, en E7H1 se observa predominancia tanto de cantos rodados (34.71%) como de gravas (37.19%) con un tamaño promedio de 43 mm (Figura 11).



Figura 11. E7H1, predominancia de gravas y cantos rodados en el Río el Melcocho.

En E5H3 se destaca predominancia de gravas (42%) y guijarros (39.8%), lo cual concuerda con la distribución de sedimento descrita por (Parasiewicz, 2007) para este tipo de meso hábitat en la “Revisión del Modelo MESOHABSIM”. Así mismo, es el comportamiento identificado en los rizos de la quebrada San Antonio (E2H3), La Calera (E3H3), Trinidad (E9H3), en el sector puente amarillo del río Melcocho (E4H3) y en el río Tafetanes (E9H3), en la figura 12 se muestra esta distribución característica.

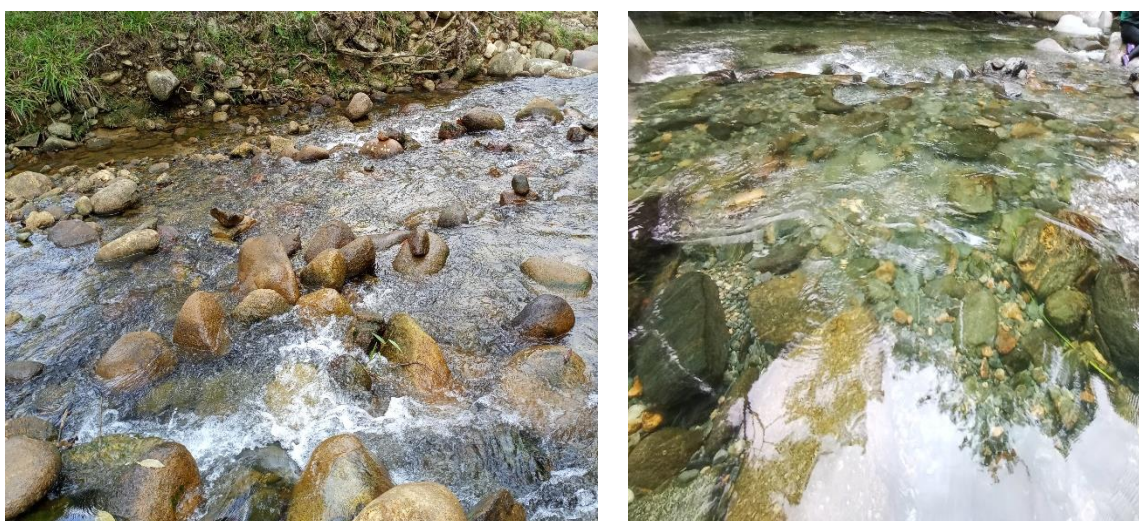


Figura 12. Predominancia de gravas y guijarros en el meso hábitat H3 (Rizos).

A lo largo de la quebrada la Carbonera se observó dominancia por parte de los guijarros con un tamaño promedio de 142.5mm. En ese sentido, en E1H1 las gravas constituyeron en mayor medida la distribución del sedimento (43.9%), seguido de los guijarros (39.83%) y de los cantos (16.26 %), es importante mencionar, que este comportamiento es acorde con lo expuesto en la literatura, dado que, este tipo de formaciones son comunes en los canales de lecho rocoso y se destaca la presencia de sustrato grueso, que, aunque en general se compone de cantos rodados (Figura 11) la distribución puede ser más

aleatoria a lo largo de los canales (SEA, 2016). Por lo tanto, este comportamiento también se vio reflejado en los rápidos de otras de las fuentes consideradas E3H1, E4H1 y E8H1.

Por otra parte, en las pozas la variación del sustrato generalmente suele ser amplia, lo cual implica, que considera tanto arenas como cantos rodados, lo anterior, respalda los resultados encontrados en la distribución de E1H2 y E2H2 (Figura 13). Las gravas y las arenas constituyen la mayor fracción de la distribución, sin embargo, los guijarros representan también una fracción importante.



Figura 13. Distribución del sedimento en el meso hábitat H2 (Pozas).

9.3. Vegetación Riparia (NDVI)

Se calculo el índice NDVI promedio para cada microcuenca, obteniendo una variación entre -0.026 y 0.9 (Figura 14). Es importante mencionar, que los valores menores a 0 están asociados con nubosidad en la imagen satelital utilizada y no a suelo desnudo. Adicionalmente, para los puntos de muestreo, a través de la delimitación de polígonos que se muestran en rojo en la figura, se estimó una franja de vegetación riparia de 30 metros a cada lado de la fuente hídrica, sin incluirla, logrando como resultado final un valor promedio del NDVI en las áreas determinadas.

Teniendo en cuenta lo anterior, la variación del índice en las fuentes hídricas trabajadas mostró una variación entre valores medios mínimos de 0.45 y máximos de 0.83 a lo largo de toda la cuenca (Figura 15).

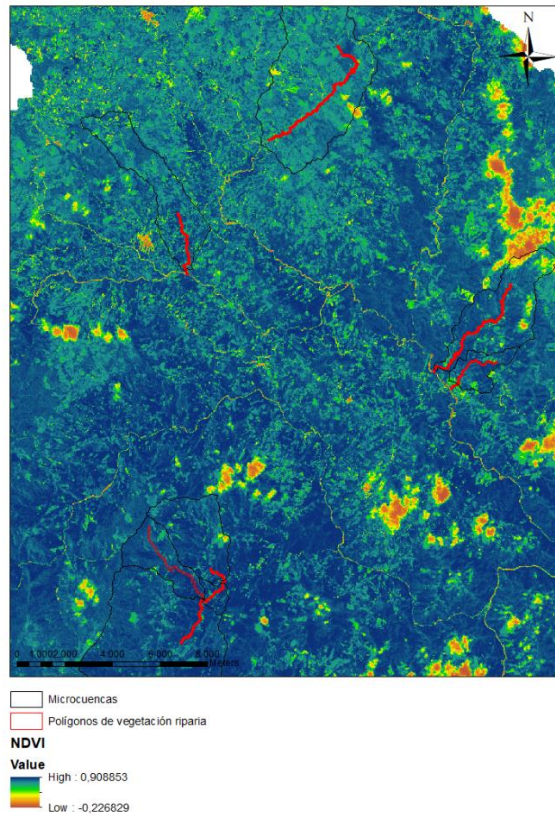


Figura 14. Variación índice NDVI dentro de las microcuencas y delimitación de polígonos. Fuente: Elaboración propia.

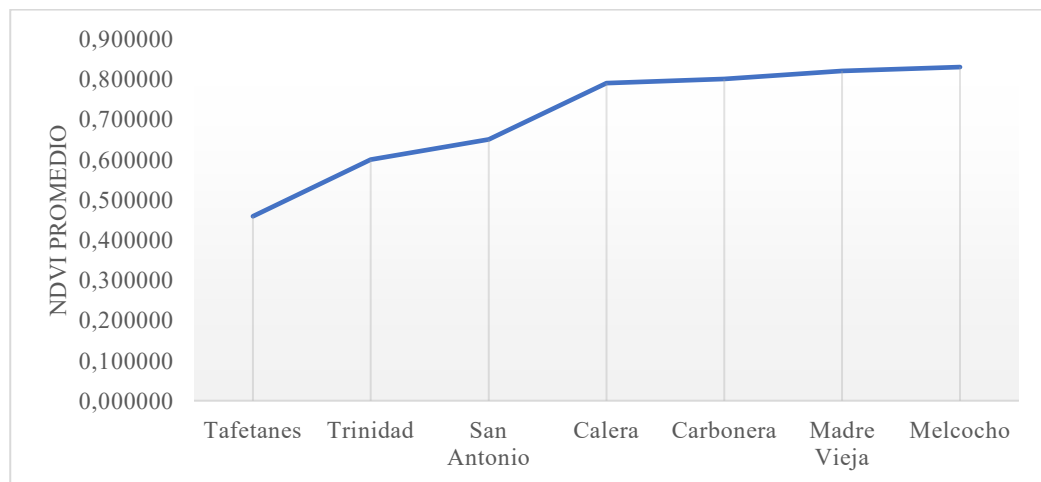


Figura 15. Promedio NDVI para las fuentes estudiadas. Fuente: Elaboración propia.

El rango común para la vegetación verde es 0.2 a 0.8 (Rouse et al., 1974), sin embargo, los valores altos de NDVI (0.6 a 0.9) corresponden a una vegetación densa como las que se encuentra en los bosques templados, húmedos tropicales o en los cultivos que se encuentran en su etapa de crecimiento máximo (Crippen, 1990). Teniendo en cuenta lo planteado en la teoría y los resultados obtenidos, es posible afirmar que, la quebrada Madre Vieja, San Antonio, Carbonera, Calera y el río Melcocho tienen una vegetación riparia densa, los valores registrados más altos corresponden al río Melcocho (0.83) y a la quebrada Madre Vieja (0.82), corrientes que, según lo observado en campo, al no tener un fácil acceso, cuentan con un mayor grado de conservación (Figura 16).



Figura 16. Vegetación riparia densa en el área de estudio, Río Melcocho y Quebrada Madre Vieja.

Es importante mencionar, que en los puntos de muestreo considerados dentro de estas dos fuentes (Río Melcocho y quebrada Madre Vieja) se identificaron especies riparias nativas

con un gran valor ecológico. Dentro de las especies identificadas, se destacan *Clusia haughtii*, *Casearia arborea*, *Psychotria brachiata*, *Calliandra pittieri*, *Schefflera blepharidophylla*, *Piper nudibracteatum*, *Croton killipianus*, *Neea divaricata*, *Graffenrieda galeottii*, *Bellucia pentámera*, *Vismia bractera* e *Inga pezizifera*.

Por otra parte, la vegetación escasa tal como arbustos y pastizales o cultivos en senescencia pueden presentar valores moderados de NDVI (es decir, de 0.2 a 0.5). Para suelos desnudos, áreas de roca estéril o arena el NDVI se presenta con valores de -0.1 a 0.2 (Cuya Matos, 2016). Teniendo en cuenta lo anterior, el río Tafetanes, se ajusta a valores moderados de NDVI (0.45), pues, lo observado en campo ratifica la existencia de una degradación marcada de la vegetación riparia (Figura 17). Adicionalmente, la quebrada Trinidad presentó un valor del índice relativamente bajo (0,6), es importante mencionar, que, aunque no se ajusta al intervalo mencionado previamente, según lo observado in situ se presenta una gran deforestación de la vegetación en general.



Figura 17. Deforestación en el área de estudio, valores moderados de NDVI en el río Tafetanes.

9.4. Balance hidrológico de largo plazo

La distribución espacial de la precipitación media multianual para la cuenca Samaná Norte (Figura 18), muestra variaciones que van desde 4565 a 7795 mm. También se puede observar que los mayores valores de precipitación media anual se concentran en los municipios de San Carlos, Puerto Nare, San Luis, San Francisco y Sonsón; y las menores precipitaciones medias, se localizan en los municipios de Granada, El Santuario y Cocorná.

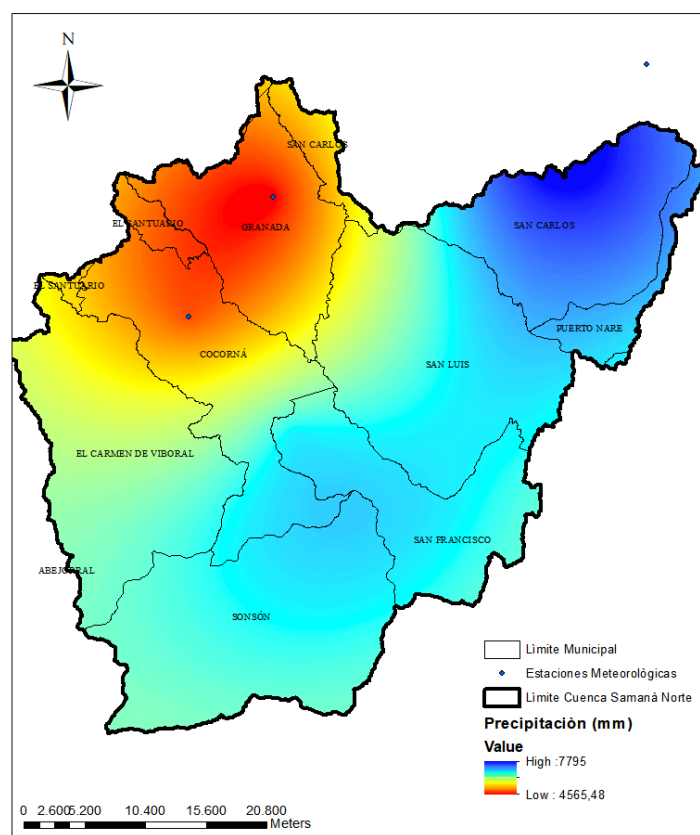


Figura 18. Distribución espacial de la precipitación media anual para el periodo (1989-2019). Fuente: Elaboración propia.

En la figura 19 se muestra la distribución espacial de la Temperatura media multianual, en donde se puede evidenciar que la Temperatura varía de acuerdo con un gradiente altitudinal; presentando temperaturas que van desde los 9 °C para las zonas con mayor elevación, hasta los 28.2 °C para las zonas de menor elevación.

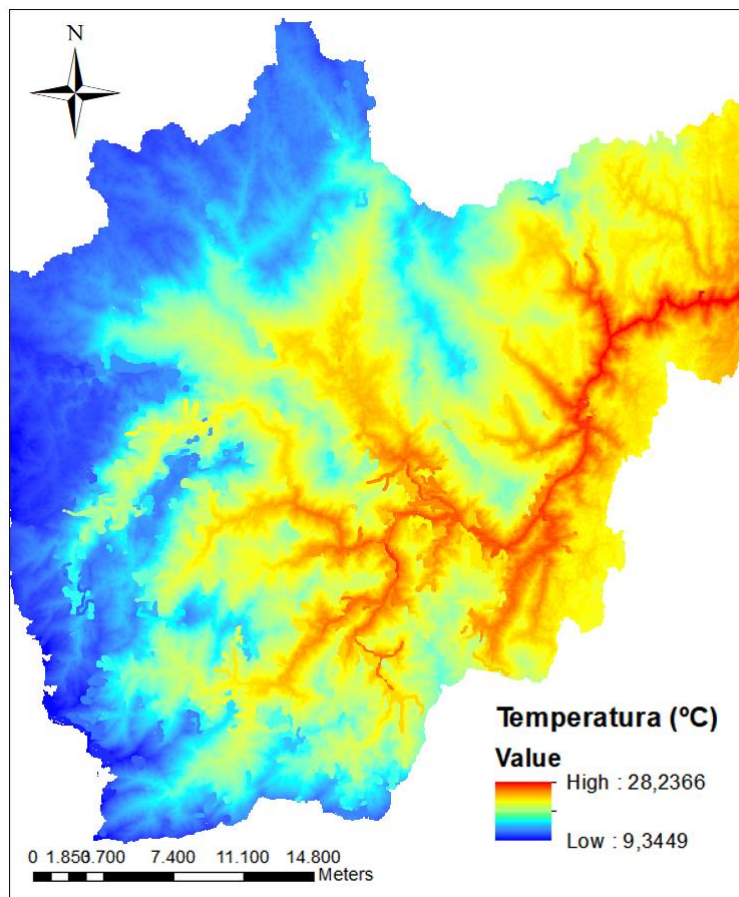


Figura 19. Distribución espacial de la Temperatura media anual. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 20 se puede evidenciar que la ETR varía de acuerdo con el potencial de evaporación de la temperatura y la disponibilidad de agua según la precipitación; en este caso el comportamiento de la ETR es similar al de la Temperatura media.

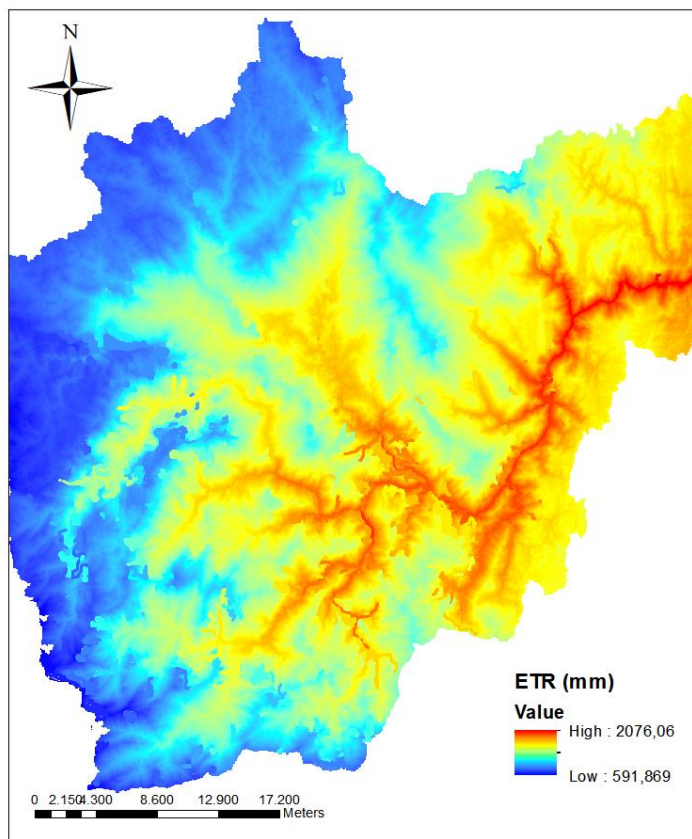


Figura 20. Distribución espacial de la Evapotranspiración real media anual. Fuente:

Elaboración propia.

Los resultados de la aplicación de la metodología de balance hídrico de largo plazo permitieron establecer el caudal medio multianual a lo largo de las fuentes hídricas que conforman el área de estudio. Se obtuvo una variación entre $0.001 \text{ m}^3/\text{s}$ y $410 \text{ m}^3/\text{s}$. En la

tabla 2 se presentan los resultados obtenidos para cada microcuenca y algunas de los parámetros que se tuvieron en consideración.

Tabla 2. Características de las microcuencas estudiadas.

| Microcuenca | Área (km²) | Q (m³/s) | S media | NDVI |
|-----------------------|------------------------------|----------------------------|----------------|-------------|
| Tafetanes | 39,2 | 4,43 | 0,42 | 0,6 |
| Trinidad | 10,5 | 0,3 | 0,4 | 0,75 |
| San Antonio | 2,96 | 0,36 | 0,47 | 0,7 |
| Calera | 7,9 | 0,15 | 0,77 | 0,8 |
| Carbonera | 11,2 | 1,78 | 0,52 | 0,8 |
| Madre Vieja | 5,29 | 1,02 | 0,71 | 0,83 |
| Melcocho (P.Amarillo) | 40 | 9,12 | 0,68 | 0,87 |
| Melcocho | 33,3 | 6,33 | 0,61 | 0,87 |

9.5.Potencia hidráulica específica

Por su parte, la potencia hidráulica específica presentó una amplia variación en los valores registrados en los puntos de muestreo, los valores fluctuaron entre 8.89 W/m² y 258.4 W/m² (Figura 21). Los valores de energía son considerados altos cuando presentan registros mayores a 200 W/m² (Martínez Fernandez et al., 2016), es evidente, que únicamente la estación 7, correspondiente al río Melcocho presentó un valor de esta magnitud. Sin embargo, según lo planteado por (Brookes, 1987) en la gran mayoría de los puntos de muestreo se están favoreciendo procesos de erosión y socavación en el lecho de las fuentes, dado que, sobrepasan el umbral de transición entre los procesos de erosión y deposición (30-35 W/m²).

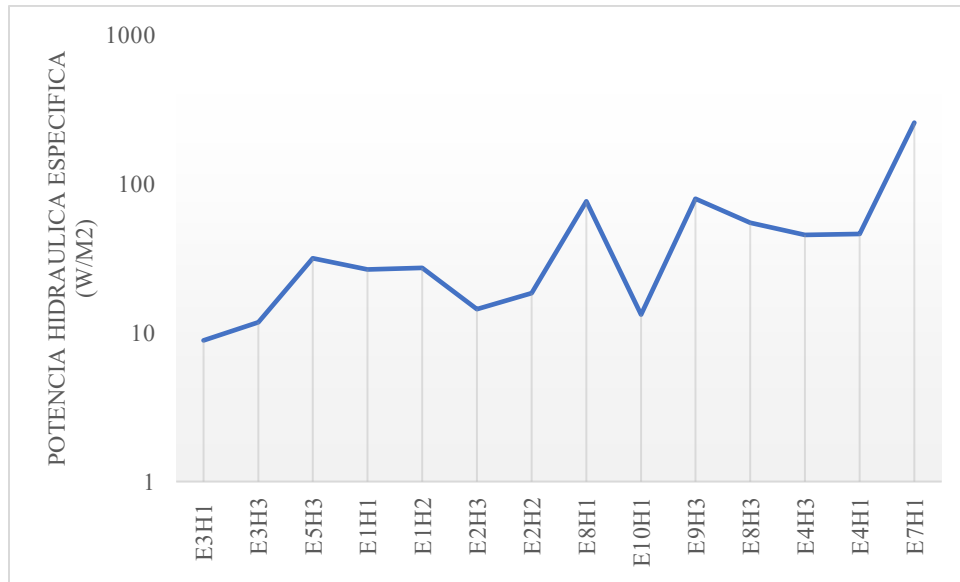


Figura 21. Distribución de la potencia hidráulica específica en los puntos de muestreo.

9.6. Análisis de la influencia

Se realizó la matriz de correlaciones entre todas las variables consideradas (valores no mostrados en el texto), sin embargo, para el análisis actual, se tuvieron en cuenta las variables que presentaron los mayores valores de correlación. Teniendo en cuenta lo anterior y realizando la interpretación de los valores de correlación y de significancia estadística obtenidos (Figura 22 valores subrayados en rojo), se determinó la existencia de una correlación inversa significativa entre el NDVI de la franja de vegetación riparia y el porcentaje de arenas, una correlación muy fuerte entre el D85 y la potencia hidráulica específica y entre el NDVI de la franja de vegetación riparia y el NDVI de las microcuencas (Figura 23).

Pearson's Correlations ▼

| Variable | | ..Arenas | D85 | Potencia..W.m2. | NDVIcuena | NDVI |
|--------------------|-------------|----------|--------|-----------------|-----------|------|
| 1. ..Arenas | Pearson's r | — | | | | |
| | p-value | — | | | | |
| 2. D85 | Pearson's r | -0.222 | — | | | |
| | p-value | 0.447 | — | | | |
| 3. Potencia..W.m2. | Pearson's r | -0.194 | 0.823 | — | | |
| | p-value | 0.507 | < .001 | — | | |
| 4. NDVIcuena | Pearson's r | -0.569 | 0.414 | 0.273 | — | |
| | p-value | 0.034 | 0.141 | 0.345 | — | |
| 5. NDVI | Pearson's r | -0.617 | 0.321 | 0.121 | 0.946 | — |
| | p-value | 0.019 | 0.262 | 0.681 | < .001 | — |

Figura 22. Matriz de correlación de Pearson. Fuente: Elaboración propia.

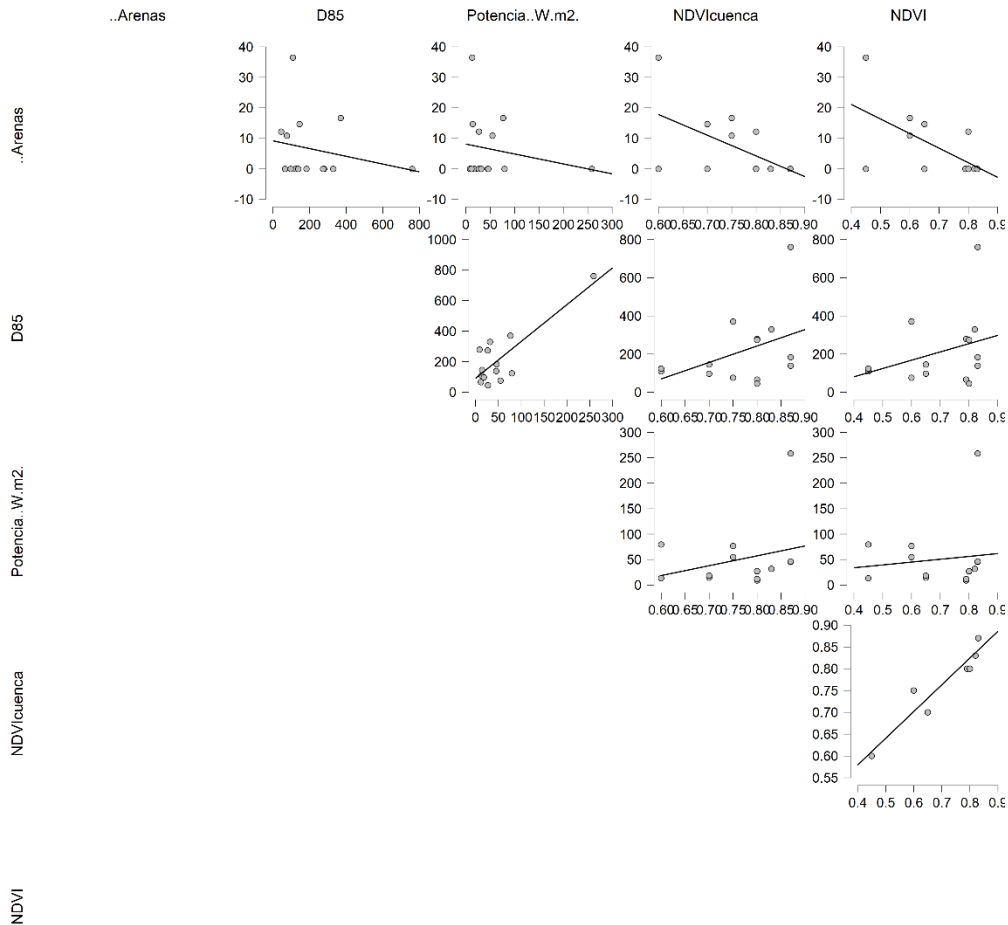


Figura 23. Diagramas de correlación. Fuente: Elaboración propia.

La figura 23 muestra las relaciones encontradas entre la potencia hidráulica específica y el NDVI respecto a las variables asociadas con la distribución del sedimento.

En general, las estaciones con mayor porcentaje de arenas son las que presentan menor valor de NDVI, lo cual se traduce en alto grado de degradación de la vegetación en la zona riparia. Esta relación indica que la vegetación ejerce una acción directa sobre el suelo y sobre los procesos de erosión, dado que, el aumento o la reducción de la vegetación, causa degradación o acumulación de sedimentos en el río según sea el caso. La vegetación de la zona de protección del cauce cohesiona el suelo y a través de su sistema radicular aumenta considerablemente la resistencia a la erosión debido a la fuerza de la corriente, por ende, las zonas ribereñas perturbadas (zonas desnudas) son más vulnerables ante la erosión fluvial.

Estudios realizados por Castro et al. (1998) demostraron que la presencia de vegetación y de sus restos sobre el suelo disminuye considerablemente la velocidad de las aguas. Adicionalmente, Martínez y Navarro (1996) consideran que la cobertura vegetal en la zona de protección del cauce mejora la capacidad de retención e infiltración en las capas superficiales del suelo, por consiguiente, colabora con la reducción de la escorrentía superficial. De igual forma, un bosque de ribera con una buena estructura y composición vegetal es vital para la conservación del propio ecosistema fluvial, ya que la protección que la cubierta vegetal proporciona al río supone una regulación de la temperatura del agua y de la cantidad de luz que llega a la superficie, factores que influyen directamente en el correcto funcionamiento del ecosistema. Así mismo, la vegetación fomenta la diversidad de

microhábitats y de nichos ecológicos, incrementando así la productividad y la capacidad de carga del ecosistema (Molina Leiva, 2008).

Es importante realizar la salvedad de que la estación E9H3 presenta un NDVI bajo y no se registró porcentaje de arenas en ese tramo en particular, por lo tanto, no se ajusta a la relación encontrada, sin embargo, responde a condiciones hidráulicas particulares, dado que, se evidenciaron altas velocidades en ese punto y una disminución significativa del espejo de agua posiblemente causada por la operación de un trasvase aguas arriba (Trasvase Tafetanes).

Por otra parte, la relación encontrada entre los tramos con mayor energía y los sedimentos de mayor tamaño es favorecida principalmente por las altas pendientes, dado que, mientras más altas son más propensas son las corrientes de sufrir procesos de erosión y cambios en la geometría. Considerando que en los tramos de las corrientes en las que se encontró esta relación no se evidenciaron procesos de deposición y/o acumulación de material en el lecho, es posible deducir que estas poseen una gran capacidad de arrastre y remoción de materiales del lecho. Autores como (Charlton, 2007; Church, 2006; Montgomery & Buffington, 1997) resaltan que cuando la potencia hidráulica específica supera los 35 W/m^2 indica gran capacidad de arrastre de sedimentos y potencial degradación y socavación del lecho, por lo tanto, las estaciones E7H1, E4H1, E4H3, E9H3, E8H1 y E8H3 correspondientes a tramos dentro del Río Melcocho, Río Tafetanes y Quebrada La Trinidad respectivamente, poseen valores de potencia hidráulica específica mayores a 45 W/m^2 , lo

cual es contrastante con lo expuesto en la literatura y permite ratificar la gran capacidad de arrastre de las corrientes.

Adicionalmente, partiendo de que los factores que favorecen el proceso de socavación responden a variables geomorfológicas como la pendiente, variables de transporte como la velocidad y a el tipo de material que conforma el lecho (Melville & Coleman, 2000) es posible afirmar que los grandes diámetros que fueron registrados en campo responden a la exposición del lecho rocoso como consecuencia de procesos de socavación derivadas de la gran cantidad de energía que poseen las corrientes

Finalmente, es importante mencionar que, al evaluar el efecto del caudal, la pendiente y el ancho del cauce de manera individual sobre la distribución del sedimento en la matriz de correlaciones, no se obtuvo ninguna relación estadística significativa, sin embargo, son variables que intervienen en el cálculo de la potencia hidráulica específica y por ende están inmersas dentro de las relaciones encontradas con los diámetros mayores.

10. CONCLUSIONES

- Se identificó que en este tipo de corrientes en las que predominan las altas pendientes la potencia hidráulica específica es una variable indicadora del tamaño o distribución de los sedimentos de gran tamaño (D_{85}) y una variable indicadora de la energía del río para arrastrar el material del lecho, socavar y exponer el lecho rocoso.
- Al evaluar el efecto del caudal, la pendiente y el ancho del cauce sobre la distribución del sedimento, se identificó que estas variables de manera individual no poseen relaciones estadísticas significativas, sin embargo, son variables que intervienen en el cálculo de la potencia hidráulica específica y por lo tanto están inmersas dentro de la relación encontrada con los diámetros mayores. Adicionalmente, de lo observado en campo, es posible afirmar, que la pendiente es indicadora de procesos de arrastre, transporte y almacenamiento de sedimento.
- Se encontró que existe una relación inversamente proporcional entre la vegetación y el porcentaje de arenas, por lo tanto, las zonas desprovistas de vegetación son más vulnerables ante la erosión fluvial, sin embargo, no es posible definir con certeza si esta influencia está asociada únicamente a la vegetación riparia o a la vegetación en toda la cuenca. Por lo tanto, aunque la implementación del NDVI permite valorar de forma fácil y rápida del estado de la vegetación de manera general es de vital importancia evaluar de manera paralela variables que incluyan la composición y

diversidad de la vegetación riparia a través de la aplicación de diferentes índices de diversidad (Riqueza de especies, Individuos, Margalef, Menhinick, Shannon, Simpson, Serie log, Log normal y modelos de abundancia (Serie geométrica, logarítmica, Log normal).

11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alvarado-García, V., & Zúñiga-Amador, M. A. (2018). Vegetación nativa como factor de control de erosión y restauración ecológica, San José, Costa Rica. *La Calera*, 18(30), 39–47. <https://doi.org/10.5377/CALERA.V18I30.7738>
- Arévalo-Mendoza, G., Ramos-Cañón, A. M., & Prada-Sarmiento, L. F. (2017). Análisis numérico de la influencia de la granulometría para la generación de flujos secos de detritos mediante el DEM. *TecnoLógicas*, 20(38), 95. <https://doi.org/10.22430/22565337.576>
- Bagnold, R. A. (1966). *An Approach to the Sediment Transport Problem From General Physics PHYSIOGRAPHIC AND HYDRAULIC STUDIES OF RIVERS UNITED STATES DEPARTMENT OF THE INTERIOR.*
- Bagnold, R. A. (1977). Bed load transport by natural rivers. *Water Resources Research*, 13(2), 303–312. <https://doi.org/10.1029/WR013i002p00303>
- Basile, & A., P. (2018). *Transporte de Sedimentos y Morfodinámica de Ríos Aluviales.* <http://rephip.unr.edu.ar/xmlui/handle/2133/10738>
- Beechie, T. J., Liermann, M., Pollock, M. M., Baker, S., & Davies, J. (2006). Channel pattern and river-floodplain dynamics in forested mountain river systems. *Geomorphology*, 78(1–2), 124–141. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.01.030>
- Belletti, B., Dufour, S., & Piégay, H. (2015). What is the Relative Effect of Space and Time to Explain the Braided River Width and Island Patterns at a Regional Scale? *River Research and Applications*, 31(1), 1–15. <https://doi.org/10.1002/rra.2714>
- Bizzi, S., & Lerner, D. N. (2015). The Use of Stream Power as an Indicator of Channel Sensitivity to Erosion and Deposition Processes. *River Research and Applications*, 31(1), 16–27. <https://doi.org/10.1002/RRA.2717>
- Brierley, G. J., & Fryirs, K. A. (2005). *Geomorphology and river management : applications of the river styles framework.* 398.
- Brookes, A. (1987). The distribution and management of channelized streams in Denmark. *Regulated Rivers: Research & Management*, 1(1), 3–16. <https://doi.org/10.1002/RRR.3450010103>
- Castro, A.; Carrión, B.; González S.; Santamaría C. X. 1998. Ríos, ribeiras e chairas de asolagamento. Razóns para conservalos. Técnicas para restauralos. INTERNET <http://www.arrakis.es/~alcrique/paginan2.htm#Vexetación> Junio 12, 2007.
- Cataño Álvarez, S. (2015). *Modelo conceptual agregado de transporte de sedimentos para cuencas de montaña en Antioquia.*
- Chang, H. H. (1979). Minimum stream power and river channel patterns. *Journal of Hydrology*, 41(3–4), 303–327. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(79\)90068-4](https://doi.org/10.1016/0022-1694(79)90068-4)
- Charles, J., & Rondón, D. (2008). ECOLOGÍA DE UN RÍO DE MONTAÑA DE LOS

ANDES COLOMBIANOS (RÍO TOTA, BOYACÁ). *Universidad Nacional de Colombia*.

- Charlton, R. (2007). Fundamentals of fluvial geomorphology. *Fundamentals of Fluvial Geomorphology*, 1–234. <https://doi.org/10.4324/9780203371084/FUNDAMENTALS-FLUVIAL-GEOMORPHOLOGY-RO-CHARLTON>
- Church, M. (2006). BED MATERIAL TRANSPORT AND THE MORPHOLOGY OF ALLUVIAL RIVER CHANNELS. <Http://Dx.Doi.Org/10.1146/Annurev.Earth.33.092203.122721>, 34, 325–354. <https://doi.org/10.1146/ANNUREV.EARTH.33.092203.122721>
- Corenblit, D., Steiger, J., Gurnell, A. M., Tabacchi, E., & Roques, L. (2009). Control of sediment dynamics by vegetation as a key function driving biogeomorphic succession within fluvial corridors. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34(13), 1790–1810. <https://doi.org/10.1002/ESP.1876>
- Crippen, R. E. (1990). Calculating the vegetation index faster. *Remote Sensing of Environment*, 34(1), 71–73. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(90\)90085-Z](https://doi.org/10.1016/0034-4257(90)90085-Z)
- Cuya Matos, O. A. (2016). Variación del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) en relación con la gradiente altitudinal en las lomas de Atocongo (Lima – Perú). *Universidad Ricardo Palma*. <http://repositorio.urp.edu.pe/handle/urp/972>
- Dumitriu, D., Condorachi, D., & Niculiță, M. (2011). Downstream Variation in Particle Size: a Case Study of the Trotus River, Eastern Carpathians (Romania). *Analele Universității Din Oradea – Seria Geografie*, 21(2), 222–232.
- Elosegi, A., & Sabater, S. (2009). *Conceptos y técnicas en ecología fluvial* (Fundación BBVA). Rubes. https://www.fbbva.es/microsites/ecologia_fluvial/index.htm
- Ferguson, R. I. (2005). Estimating critical stream power for bedload transport calculations in gravel-bed rivers. *Geomorphology*, 70(1–2), 33–41. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.03.009>
- Fryirs, K. (2003). Guiding principles for assessing geomorphic river condition: Application of a framework in the Bega catchment, South Coast, New South Wales, Australia. *Catena*, 53(1), 17–52. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(02\)00199-6](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(02)00199-6)
- Fryirs, K. A., & Brierley, G. J. (2012). Geomorphic Analysis of River Systems. In *Geomorphic Analysis of River Systems*. <https://doi.org/10.1002/9781118305454>
- Gregory, S. V., Boyer, K. L., & Gurnell, A. M. (2003). The Ecology and Management of Wood in World Rivers. In *American Fisheries Society Symposium* (Vol. 37). www.fisheries.org
- Gregory, S. V., Swanson, F. J., Mckee, W. A., & Cummins, K. W. (1991). *An Ecosystem Perspective of Riparian Zones Focus on links between land and water*.
- Harrelson, C. C., Rawlins, C. L., & Potyondy, J. P. (1994). *Stream Channel Reference Sites: An Illustrated Guide to Field Technique*.
- Horacio, J., & Ollero, A. (2011). Clasificación geomorfológica de cursos fluviales apartir

- de sistemas de información geográfica (S.I.G.). *Boletín de La Asociación de Geógrafos Españoles*, 56, 373–396.
- Jarrett, R. D. (1990). HYDROLOGIC AND HYDRAULIC RESEARCH IN MOUNTAIN RIVERS. *Journal of the American Water Resources Association*, 26(3), 419–429. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1990.tb01381.x>
- Kale, V. S., & Hire, P. S. (2007). Temporal variations in the specific stream power and total energy expenditure of a monsoonal river: The Tapi River, India. *Geomorphology*, 92(3–4), 134–146. <https://doi.org/10.1016/J.GEOMORPH.2006.06.047>
- Levin, N., Shmida, A., Levanoni, O., Tamari, H., & Kark, S. (2007). Predicting mountain plant richness and rarity from space using satellite-derived vegetation indices. *Diversity and Distributions*, 13(6), 692–703. <https://doi.org/10.1111/J.1472-4642.2007.00372.X>
- Marchetti, M. (2000). *Geomorfología fluvial*.
- Martínez Fernández, V., González del Tánago, M., & García de Jalón, D. (2016). *El uso de la potencia hidráulica del río como indicador de procesos geomorfológicos*. XIV Reunión Nacional de Geomorfología.
- Martínez A.; Navarro, J. 1996. Hidrología Forestal. El Ciclo Hidrológico. Serie: Manuales y Textos Universitarios, Ciencias 18, Universidad de Valladolid, 286 p.
- Melville, B. W., & Coleman, S. E. (2000). *Bridge scour*. 550.
- Merg, P. C., Petri, D., Bodoira, F., Nini, M., Fernández, M., Schmidt, F., Montalva, R., Guzmán, L., Rodríguez, K., & Blanco, F. (2011). *Mapas Digitales Regionales De Lluvias , Índice Estandarizado De Precipitación E Índice Verde Regional Digital Maps of Rainfall , Standardized Precipitation Index and Vegetation Index*. 1–11.
- Mesa, O., Poveda, G., Vélez, J. I., Barco, J., Botero, B., Cuartas, A., Hoyos, C., Mantilla, R., Mejía, J. F., & Montoya, M. (1999). *Hidro-Sig : Una Herramienta Para La Estimación De Balances Hidrológicos De Colombia*.
- Molina Leiva, F. J. (2008). Retención de sedimentos por la vegetación de la zona. *Universidad Austral de Chile*.
- Montgomery, D. R., & Buffington, J. M. (1997). *GSA Bulletin: Channel-reach morphology in mountain drainage basins*. 2(5), 596–611. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1997\)109<0596:CRMIMD>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1997)109<0596:CRMIMD>2.3.CO;2)
- Montoya Jaramillo, L. J. M. R. (2005). Transporte de sedimentos en las corrientes del departamento de antioquia. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 4, 101–109. <https://www.redalyc.org/pdf/750/75004710.pdf>
- Nanson, G. C., & Croke, J. C. (1992). A genetic classification of floodplains. *Geomorphology*, 4(6), 459–486. [https://doi.org/10.1016/0169-555X\(92\)90039-Q](https://doi.org/10.1016/0169-555X(92)90039-Q)
- Ollero, A. (2007). Algunos apuntes sobre la dinámica fluvial: Los ríos actuales como resultado de su propia libertad y de la intervención humana en sus riberas. *Decálogo De Iniciativas a Favor De Los Ríos*, January 2007, 21.

<https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2414.1843>

- Opperman, J. J., & Merenlender, A. M. (2011). The Effectiveness of Riparian Restoration for Improving Instream Fish Habitat in Four Hardwood-Dominated California Streams. *Changed Publisher: Wiley*, 24(3), 822–834. <https://doi.org/10.1577/M03-147.1>
- Parasiewicz, P. (2007). The MesoHABSIM model revisited. *River Research and Applications*, 23(8), 893–903. <https://doi.org/10.1002/RRA.1045>
- Pérez, A. L., & Menes, M. R. M. (2015). Análisis Morfométrico E Índice De Vegetación. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, VI(1), 10–15.
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222015000100007
- Ramírez, C., García, J. L., Ramírez, O., & Bocanegra, R. A. (2004). CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES DEL LECHO DEL RÍO CAUCA. *Ingeniería de Recursos Naturales y Del Ambiente*, I(1), 10–17.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=231117826001>
- Reinfelds, I., Cohen, T., Batten, P., & Brierley, G. (2004). Assessment of downstream trends in channel gradient, total and specific stream power: A GIS approach. *Geomorphology*, 60(3–4), 403–416. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2003.10.003>
- Richards, J. A., & Jia, X. (2006). Remote sensing digital image analysis: An introduction. *Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction*, 1–439.
<https://doi.org/10.1007/3-540-29711-1>
- Rouse, J. W. . J., Haas, R. H., Schell, J. A., Deering, D. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *NASA. Goddard Space Flight Center 3d ERTS-1 Symp., Vol. 1, Sect. A.*
- Sahu, B. K. (1964). Depositional mechanisms from the size analysis of clastic sediments. *Journal of Sedimentary Research*, 34(1), 73–83. <https://doi.org/10.1306/74D70FCE-2B21-11D7-8648000102C1865D>
- Schumm, S. A. (Stanley A. (1977). *The fluvial system*. 338.
- SEA. (2016). *GUÍA METODOLÓGICA PARA DETERMINAR EL CAUDAL AMBIENTAL PARA CENTRALES HIDROELÉCTRICAS EN EL SEIA*. www.graficametropolitana.cl
- Steiger, J., Gurnell, A. M., Ergenzinger, P., & Snelder, D. (2001). Sedimentation in the riparian zone of an incising river. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26(1), 91–108. [https://doi.org/10.1002/1096-9837\(200101\)26:1<91::AID-ESP164>3.0.CO;2-U](https://doi.org/10.1002/1096-9837(200101)26:1<91::AID-ESP164>3.0.CO;2-U)
- Thorndycraft, V. R., Benito, G., & Gregory, K. J. (2008). Fluvial geomorphology: A perspective on current status and methods. *Geomorphology*, 98(1–2), 2–12.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.02.023>
- Thorne, C. R., Hey, R. D., Newson, M. D., Thorne, C. R., Hey, R. D., & Newson, M. D. (1997). *Applied fluvial geomorphology for river engineering and management*. 376.
- Tinkler, K. J., & Wohl, E. E. (1998). *Rivers Over Rock: Fluvial Processes in Bedrock*

Channels. *Geophysical Monograph Series*, 107, 323.

Universidad Nacional De Colombia. (2010). *CURSOS DE CAPACITACIÓN HIDROSIG 4.0 -MAPWINDOW ESTIMACION DE CAUDALES*.

Volonté, A. (2017). *Geomorfología fluvial aplicada al peligro de crecidas. Cuenca del arroyo San Bernardo, Sistema de Ventania, Argentina*. 182.
[https://repositoriodigital.uns.edu.ar/bitstream/handle/123456789/3453/TESIS DOCTORAL_VOLONTE.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositoriodigital.uns.edu.ar/bitstream/handle/123456789/3453/TESIS_DOCTORAL_VOLONTE.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Wentworth, C. K. (1992). *A SCALE OF GRADE AND CLASS TERMS FOR CLASTIC SEDIMENTS*'.