

# PROPUESTA METODOLÓGICA PARA EL ANÁLISIS MORFO- SEDIMENTOLÓGICO EN CUENCAS ALTAMENTE URBANIZADAS. CASO DE ESTUDIO QUEBRADA DOÑA MARÍA (COLOMBIA)

Juan Esteban González\*  
Luis Javier Montoya Jaramillo\*\*

Recibido: 30/09/2008

Aceptado: 07/05/2010

## RESUMEN

En este artículo se presenta una propuesta metodológica para hacer el análisis de morfología fluvial y transporte de sedimentos para cuencas altamente intervenidas por la acción humana. En dicha metodología se proponen diferentes actividades las cuales permitirán hacer un análisis detallado de la morfología fluvial y los sedimentos en una cuenca. Entre las etapas que se proponen para implementar esta metodología se tienen: análisis en planta de la cuenca, análisis de los perfiles altimétricos de las principales corrientes, levantamiento de información en campo (aforos líquidos, sólidos y observaciones generales de la morfología de la cuenca) y estimación de la carga y capacidad de carga de sedimentos en la quebrada principal. Una aplicación a la cuenca de la quebrada Doña María (en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, Colombia) es presentada.

**Palabras clave:** transporte de sedimentos, morfología fluvial, cuencas hidrográficas.

---

\* Ingeniero ambiental, candidato a magister en Desarrollo Sustentable, profesor catedrático, Grupo GEMA, Universidad de Medellín. E-mail: jegonzalez@udem.edu.co

\*\* Ingeniero civil, magister en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, profesor asistente, Grupo de Investigación y Mediciones Ambientales GEMA, Universidad de Medellín. E-mail: ljmontoya@udem.edu.co

# **A METHODOLOGICAL PROPOSAL TO MORPH- SEDIMENTOLOGIC ANALYSIS AT URBAN BASINS. CASE STUDY: DOÑA MARIA'S BASIN**

## **ABSTRACT**

This paper shows a methodological proposal to carry out river morphology analysis and sediment transport for urban basins highly intervened by human actions. In this methodology, different activities that will allow doing a detailed analysis for the river morphology and sediment transport in the basin are proposed. Among the steps proposed to implement this methodology, there are: analysis in plant of little basin, altitude profiles analysis of the main sub-basins, field measures (measures of liquid and solid discharge and general observations of the basin morphology), and estimations of sediments load and bed load capacity in the stream. An application to basin of Doña María is showed.

**Key words:** sediment transport, fluvial morphology, hydrologic basins.

## INTRODUCCIÓN

La ordenación de cuencas debe ser entendida como un “proceso de planificación sistemático, previsorio, continuo e integral” [1] para lograr un equilibrio entre el uso y conservación de los recursos naturales en una cuenca hidrográfica [2]. La ordenación, de esta forma entendida, es entonces un mecanismo con que cuenta el Estado para “... el diseño y planificación del uso del territorio y de los recursos naturales renovables de la nación con el fin de garantizar su adecuada explotación y desarrollo sostenible” [3]. En respuesta a diferentes conflictos ambientales por el uso del territorio y los recursos naturales, se debe plantear un ejercicio de ordenamiento. En dicho ejercicio, la unidad natural de ordenación es la cuenca hidrográfica, por la gran cantidad de interrelaciones físicas y ecológicas presentes en ella como resultado de la dinámica hidrológica presente. Los sedimentos constituyen una intersección entre el recurso suelo y el recurso hídrico, particularmente en las corrientes. Cambios en los patrones de sedimentos pueden ser reflejados en cambios en el uso del suelo en la cuenca o en el aprovechamiento de la misma; del mismo modo, intervenciones sobre la corriente casi siempre tienen manifestaciones en el régimen de sedimentos, por lo que estos deben ser adecuadamente diagnosticados y evaluados. El análisis de los sedimentos en la cuenca debe considerar los efectos de la presencia de sedimentos sobre la calidad del agua; en este sentido una alta carga de lavado puede afectar significativamente la calidad del agua en la cuenca. Además, las corrientes no son sistemas estáticos, tienen una dinámica asociada con el transporte de sedimentos. Esta dinámica puede verse como un factor de amenaza, cuando procesos erosivos en el cauce afectan o comprometen obras civiles, cuando generan pérdidas de capacidad hidráulica del cauce por depósito de sedimentos o cuando se generan

avenidas torrenciales por el arrastre de sedimentos. Esto hace que en el proceso de planificación se deba tener en cuenta esta dinámica fluvial y los patrones de transporte de sedimentos.

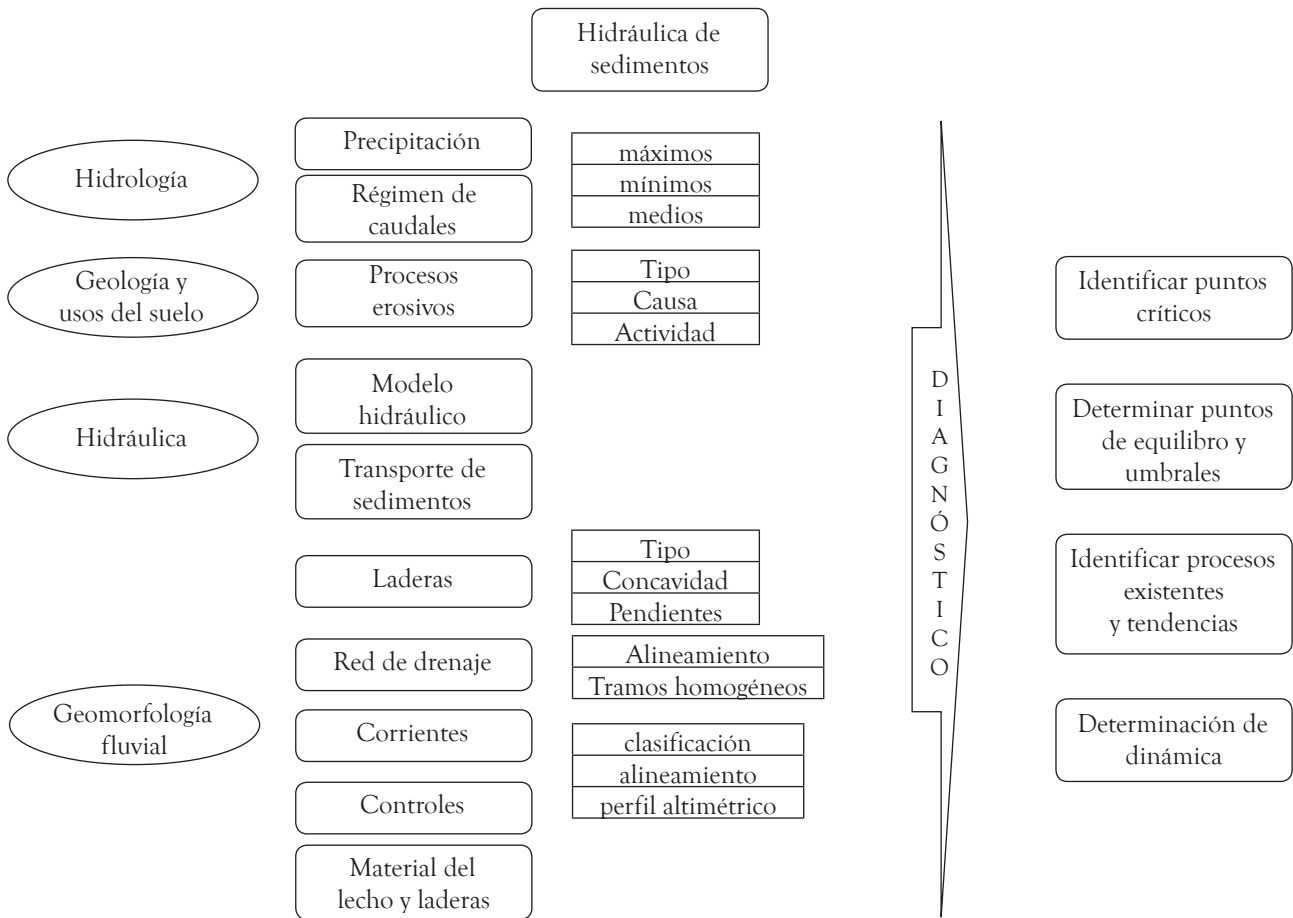
En este artículo se propone una metodología para el análisis de la morfología fluvial y el transporte de sedimentos a partir de la experiencia en la formulación del Planes Integrales de Ordenación y Manejo de Cuencas (decreto 1729/2002) de la quebrada Doña María, la cual es una cuenca altamente urbanizada en la que se pueden identificar gran cantidad de procesos erosivos, deslizamientos, zonas de arrastre de sedimentos y actividades económicas que afectan la dinámica de los sedimentos en la cuenca. Por medio de este estudio de caso, se presenta una propuesta metodológica para incluir los análisis morfo-sedimentológicos en el marco de dichos planes, ofreciendo mayores detalles que los presentados en [4].

## 1 MATERIALES Y MÉTODOS

Dando un marco general amplio para el ordenamiento de diagnóstico recurso hídrico en una cuenca, en [4] se presenta un esquema conceptual para el diagnóstico del recurso hídrico en cuencas altamente urbanizadas, con miras a su ordenamiento. Dicha metodología considera la necesidad de tener en cuenta los sedimentos en la evaluación del recurso agua. En la figura 1 (página siguiente), se presenta un esquema de los principales elementos necesarios para la evaluación de la hidráulica de sedimentos para una cuenca.

## 2 RESULTADOS EN EL CASO DE ESTUDIO

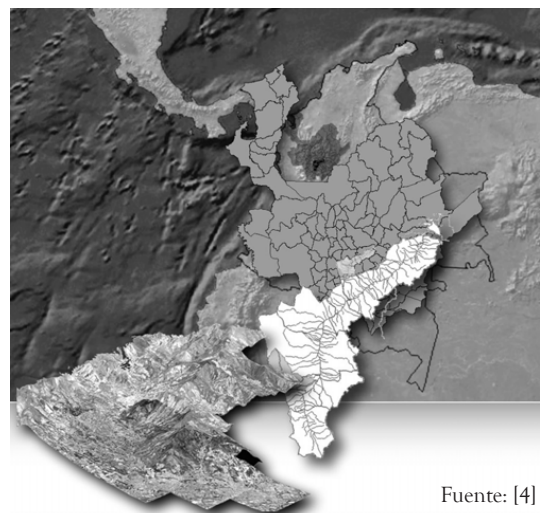
La quebrada Doña María se encuentra ubicada al sur del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (Colombia), tal como se muestra en la figura 2. Se recopiló información cartográfica base a partir



**Figura 1.** Esquema conceptual para el análisis de sedimentos

Fuente: elaboración propia.

de la cual se construyó un modelo digital de elevaciones. También se elaboró una base de datos con eventos históricos de inundaciones, deslizamientos y avenidas torrenciales. Se contaba con registros de precipitación en las estaciones pluviográficas de San Antonio de Prado, el Chuscal y Astillero, y con un mapa geológico y geomorfológico de la cuenca. Se realizó un levantamiento de los procesos erosivos en la cuenca, de su ubicación y algunas características de los mismos, para lo cual se realizaron visitas de reconocimiento; se realizó fotointerpretación a partir de un mosaico de fotografías aéreas de la cuenca disponible con el que se actualizaron los usos del suelo y se apoyó la identificación de procesos erosivos.



Fuente: [4]

**Figura 2.** Localización geográfica de la microcuenca de la quebrada Doña María.

## 2.1 Características generales de la cuenca

Se realizó el diagnóstico general del comportamiento de la cuenca, de su ubicación y de sus características generales y un estudio hidrológico de la misma, el cual buscaba evaluar la disponibilidad espacio-temporal del agua en la cuenca, incluyendo algunas consideraciones sobre su calidad. Se utilizaron estimaciones de estudios previos de caudales máximos, mínimos y medios pues éstos son un insumo fundamental para el análisis hidráulico y el estudio de sedimentos [2]. En la tabla 1 se presenta una descripción morfológica básica de la cuenca y las estimaciones recopiladas para los caudales antes mencionadas.

## 2.2 Variables hidrológicas

Se estudió la variabilidad hidrológica de la corriente, para lo que se realizaron estimaciones de los caudales medios, máximos y mínimos, en diferentes puntos de la cuenca. Se estudiaron crecientes recurrentes con diferentes períodos de retorno y se analizaron algunas características de

las crecientes formadoras del lecho, asumiendo estas como el caudal de banca llena y asociándolo a un período de retorno de 2.33 años. En este caso no se contaba con registros históricos de caudal, por lo que se optó por utilizar las estimaciones de caudal obtenidas por [2] (tabla 2).

**Tabla 1.** Algunas características morfológicas de la cuenca.

Parámetro	Valor
Área de la cuenca [km <sup>2</sup> ]	75,82
Orden de Horton - Strahler	5
Magnitud	1371
Longitud total de canales [km]	229,14
Longitud del canal principal [km]	25,84
Cota máxima de la cuenca [m]	3105
Cota en la salida de la cuenca [m]	1522
Distancia al centroide [km]	13,43
Perímetro [km]	49.075
Pendiente media [%]	57,69
Pendiente promedio del canal principal [%]	5,57

Fuente: [2]

**Tabla 2.** Algunas características hidrológicas de la cuenca.

Caudal medio (m <sup>3</sup> /s)								
Balance hídrico con el método de Cenicafé			Método Regional			Balance hídrico con el método de Turc		
2.53			2.40			2.80		
Caudal Mínimo (m <sup>3</sup> /s)								
Método	$\mu_{\text{Min}}$	$\sigma_{\text{min}}$	Período de retorno (años)					
			2.33	5	10	25	50	100
Modelos de tanques	0.947	0.329	0.842	0.677	0.585	0.499	0.449	0.407
Regionalización de características medias	0.990	0.270	0.901	0.764	0.687	0.616	0.574	0.539
Curva de recesión			0.997	0.928	0.875	0.812	0.769	0.728
Caudales Máximos (m <sup>3</sup> /s)								
Método	Período de retorno (años)							
	2.33	5	10	25	50	100		
Hidrógrafa unitaria de Willams y Hann	126.91	175.05	225.72	287.41	335.96	387.32		

Fuente: [2]

## 2.3 Morfología fluvial

Para el estudio de la morfología fluvial y el transporte de sedimentos en la quebrada Doña María se analizaron las siguientes variables: pendiente de la cuenca y de la corriente principal, descripción de las características geológicas y geomorfológicas y las áreas fuente de sedimentos. Se evaluaron los patrones de alineamiento para tener una aproximación a los procesos dominantes en el cauce y su dinámica.

Otras variables importantes por tramos fueron la sinuosidad, las características de los meandros (en caso de presentarse), las formas del lecho, la geometría hidráulica de los canales, la conectividad entre corrientes (para lo que se realizó una actualización de detalle de la red hídrica) y la presencia de controles en el flujo y acorazamiento.

### 2.3.1 Caracterización de las corrientes principales

Se utilizó la clasificación propuesta por [5] (tabla 3), a partir de la cual se definió el tipo de canal que se estaba estudiando y a partir de ello

se definieron los análisis de campo necesarios. Se encontró que la corriente tenía en gran parte de su recorrido un cauce perenne, de tipo aluvial, y presenta degradación en algunos tramos del mismo, con un alineamiento entre recto y sinuoso. En la zona baja, en la parte urbana de la cuenca, se presentan algunas restricciones laterales importantes pues se encuentra canalizada. Se seleccionaron tramos homogéneos para su clasificación, utilizando los sistemas propuestos por [6, 7]. La mayoría de los tramos mostraron un comportamiento entre recto y sinuoso, con una pendiente relativamente alta y una relación ancho profundidad relativamente baja. De acuerdo con la clasificación propuesta por Roseen, la corriente principal se caracterizó por tramos que podrían clasificarse como de tipo A (zona alta), tipo B y C (en la zona media y baja).

### 2.3.2 Determinación de tramos con características homogéneas en la horizontal

Se analizó el patrón de alineamiento de la corriente principal y de algunos de sus afluentes principales, determinando puntos de cambio de

**Tabla 3.** Clasificación general de las corrientes según Biedenharn y Suárez

<i>Propiedad</i>	<i>Clasificación</i>	<i>Características</i>
Libertad para moverse	Aluvial	Cambia de tamaño y forma de acuerdo con el caudal y con los sedimentos
	No aluvial	Fondo en roca. No puede moverse
Continuidad del flujo en el tiempo	Perenne	Flujo permanente todo el tiempo
	Intermitente	En temporadas secas el flujo desaparece
	Efímero	Solo tiene flujo en el momento de lluvias
Relación entre erosión y sedimentación	En degradación	El cauce se está profundizando por erosión
	En agradación	El cauce se está levantando por sedimentación
Formas del cauce	Semi-recto	Sinuosidad menor a 1.1
	Sinuoso	Sinuosidad de 1.1 a 1.5
	Trenzado	Se forman trenzas e islas de depósitos dentro del cauce
	Anarramificado	Se forman varios canales independientes
	Torrente	Ríos de alta montaña
	Delta	Se forman canales dentro de los depósitos en la desembocadura
	Meándrico	La sinuosidad es mayor a 1.5

Fuente: [5, 8]

dirección y se buscó relacionar dichos cambios con la litología presente. Se establecieron las zonas de erosión, transporte y depósito en la cuenca de acuerdo con las categorías presentadas por [6], para establecer una zonificación ambiental de acuerdo con la dinámica natural de dichas zonas. Se determinó una primera zona en la parte alta de la cuenca donde tanto el cauce como las laderas tienen pendientes fuertes, los procesos dominantes son de tipo erosivo y se encontraron frecuentes procesos de inestabilidad de laderas. En la zona de transporte en la parte media de la cuenca, la dinámica principal de la corriente es el transporte de sedimentos. Se encontró profundización del cauce muy asociado a la litología de la cuenca y al potencial erosivo de la misma. En esta zona se presentó un valle estrecho, con paredes muy empinadas, también muy sometidas a deslizamientos de gran magnitud y con gran cantidad de procesos erosivos activos, además, varios de los afluentes principales descargan gran cantidad de sedimentos, generando depósitos que son actualmente sometidos a explotación de material aluvial. En la zona baja, en la zona más intervenida de la cuenca, se produce depósito, la quebrada tiene restringido su movimiento lateral pues se encuentra canalizada en gran parte de este tramo; se presentan depósitos que pueden generar problemas por colmatación de las estructuras hidráulicas; además, existe un gran aporte de sedimentos tanto de la zona alta y media de la cuenca como de zonas de cantera en la zona baja. Se buscaron fotografías aéreas de diferentes años para identificar cambios del cauce en estas zonas y realizar así un seguimiento a los depósitos, identificar cauces antiguos y otros elementos que aunque no son parte del cauce actual podrían ser importantes para la determinación de riesgos cuando se presenten eventos extremos; con esto se intentó describir las variaciones que ha sufrido el cauce recientemente, determinar puntos de migración lateral, cambios en el uso del suelo y presencia de procesos erosivos.

### 2.3.3 Características del valle y las laderas y ubicación de procesos erosivos

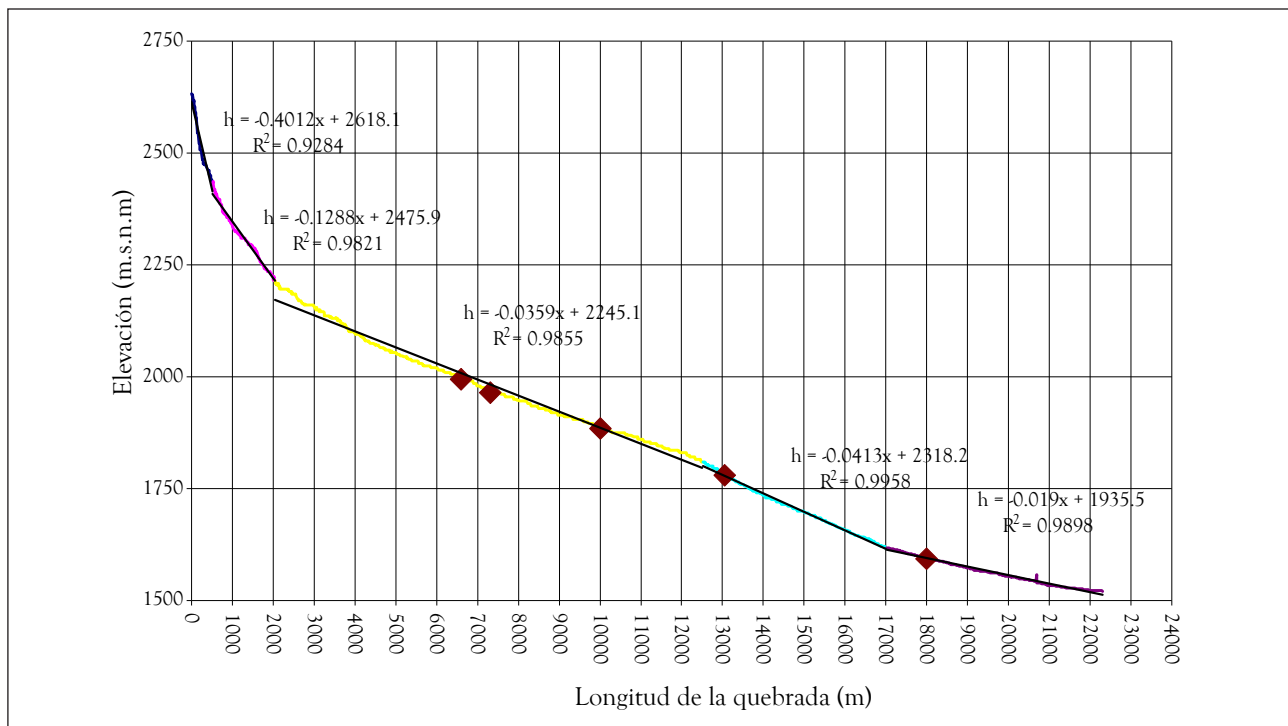
Se realizó un estudio de las formas del valle y de las laderas para cada uno de los tramos identificados. A partir de perfiles de las vertientes obtenidas del modelo digital de elevación, fueron clasificadas y se determinaron puntos donde se presenten cambios significativos en la pendiente de las mismas; en estos puntos se pueden dar procesos de acumulación o inestabilidad de las laderas de acuerdo con la concavidad de los mismos, por lo que se compararon éstos con los procesos morfológicos determinados y con las características geológicas y geomorfológicas de la cuenca. Las características del valle y de las vertientes permitieron analizar las posibilidades del cauce de migración lateral o altitudinal y evaluar la susceptibilidad de cambios en la red hídrica por procesos erosivos en el valle y en las vertientes o por factores antrópicos. Se clasificaron las vertientes de acuerdo con su forma como simples o mixtas. Se encontró que existían zonas altamente encañonadas, en las que deslizamientos sobre el cauce podrían originar represamiento de la quebrada y posibles eventos torrenciales.

Se levantaron en campo y a partir de fotografías aéreas las zonas con presencia de procesos erosivos, realizando una clasificación de los mismos, reportando su tipo, ubicación, el proceso principal, extensión, grado de actividad y el material presente. Se analizaron, además, las características sedimentológicas de las laderas, a partir de observaciones durante el levantamiento de los procesos erosivos. Se identificaron zonas homogéneas, con predominio de procesos erosivos en la cuenca y con procesos activos. La información fue sistematizada mediante un sistema de información geográfica, permitiendo el análisis de la información de forma espacial.

### 2.3.4 Características altimétricas

Se construyeron perfiles altimétricos tanto para el cauce principal como para los afluentes





**Figura 3.** Perfil altimétrico de la quebrada Doña María

Fuente: [9]

directos principales. La figura 3 presenta el perfil altimétrico del cauce principal. A partir de éstos se determinaron tramos con pendientes homogéneas y que tengan similares condiciones de alineamiento. Se consideró la ubicación de los puntos de extracción de material y las condiciones geológicas y geomorfológicas, analizando los efectos asociados a la ocurrencia de deslizamientos y zonas de depósito de sedimentos. Esto permitió determinar cinco zonas con características similares para el análisis en la corriente principal. En cada una de estas zonas se realizó un reconocimiento más detallado en campo en puntos específicos que puedan ser considerados como típicos de la zona. Estos perfiles permitieron identificar zonas de generación de sedimentos, otras zonas identificadas como zonas de transporte o transferencia en la corriente (apoyados en los perfiles altimétricos de las mismas) y, finalmente, zonas de sedimentación.

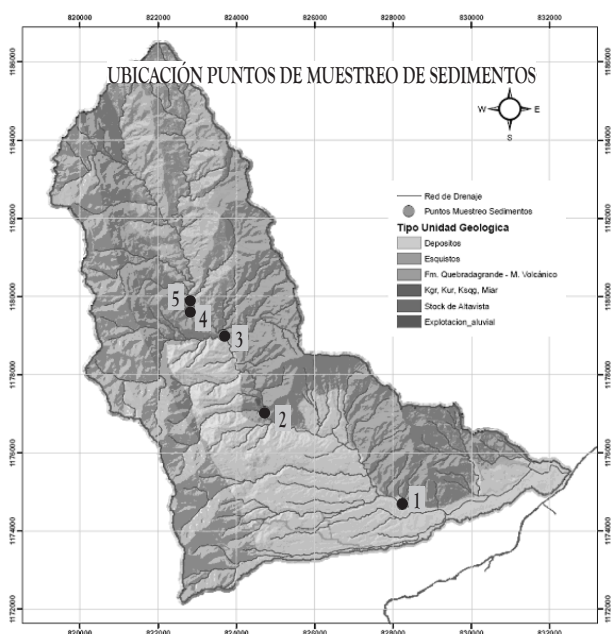
### 2.3.5 Geometría hidráulica

Se realizó un análisis de secciones del cauce principal y algunos afluentes importantes para cada una de las zonas identificadas, ayudando en la clasificación de los cauces a partir de parámetros morfológicos. Dichas secciones fueron obtenidas del modelo hidráulico utilizado para la modelación de crecientes en la cuenca [9]. Se registraron las obras hidráulicas presentes en el cauce, como coberturas, resaltos, azud, puentes, diques, muros de contención, presas, tuberías y ductos, entre otras, analizando el material de la misma, sus principales dimensiones, su funcionalidad y su estado al momento del reconocimiento. Dicha información también fue integrada al modelo hidráulico.

### 2.4 Mediciones de campo

El reconocimiento de campo permitió realizar una aproximación por tramos de los siguientes





**Figura 4.** Ubicación de puntos de muestreo

Fuente: [4]

aspectos: la formas en el lecho, la geometría hidráulica, el ancho de banca llena, los niveles de terrazas, el tamaño medio del material superficial, la presencia o no de acorazamiento en el lecho de la quebrada. Los aspectos mencionados anteriormente permiten realizar una clasificación del cauce en dicha zona, determinando con mayor nivel de detalle los patrones de alineamiento del cauce principal, las formas del valle y de las laderas. Se identificaron las zonas más propensas a inundaciones, información que fue contrastada con la obtenida a partir de un modelo hidráulico. Se realizaron mediciones de caudal, materiales del lecho y de las orillas y carga de sedimentos. Además, en caso de que se presentara algún tipo de proceso erosivo, de socavación o agradación, éste también fue registrado, analizando el tipo de proceso existente y sus posibles causas. Se recolectó información para determinar la dinámica de transporte en la cuenca, realizando aforos líquidos y sólidos en diferentes épocas. Para los aforos líquidos se siguió la metodología descrita en la Cartilla del Servicio Colombiano de Meteorología e Hidrología [10].

Se realizaron muestreos de sólidos suspendidos, se recolectó material de arrastre de fondo utilizando un muestreador tipo Helley Smith en varios puntos de la sección, se recolectaron muestras del lecho y del material de las orillas, y se hizo un conteo de Wolman. La ubicación de los puntos de muestreo se presenta en la figura 4.

## 2.5 Transporte de sedimentos

Se analizó la concentración media de sedimentos en suspensión en diferentes épocas climáticas (épocas seca y lluviosa). Se analizó también la capacidad hidráulica de transportar sedimentos de la corriente y la carga de fondo en puntos identificados como críticos.

En la tabla 4, se presenta un resumen de los resultados del muestreo de sedimentos. Como es de esperarse, hay un aumento en los caudales hacia aguas abajo. Si se analizan los sólidos totales, estos van aumentando en esta misma dirección; se puede notar un aumento grande entre el punto 3 y el punto 2 donde pasa de 69 mg/L a 145 mg/L; esto puede explicarse porque en esta zona se concentra la mayor cantidad de explotaciones mineras, además, existen canteras abandonadas y zonas descubiertas de vegetación en las laderas que aumentan la carga en suspensión. Se puede observar también un aumento en la carga de fondo hacia aguas abajo, sin embargo, hay una anomalía en el punto 2, situación que se puede presentar por la alta explotación minera que existe en esta zona.

**Tabla 4.** Análisis de la carga de sedimentos durante las campañas de medición.

Punto	Carga fondo (ton/día)	D <sub>50</sub> (mm) Material de arrastre	Sólidos Totales (mg/l)	Carga suspensión (ton/día)
Muestreo de octubre de 2007				
1	11.86	13.95	146	47.48
2	2.52	20.62	145	29.37

Punto	Carga fondo (ton/día)	D <sub>50</sub> (mm) Material de arrastre	Sólidos Totales (mg/l)	Carga suspensión (ton/día)
3	6.95	1.84	69	16.95
4	2.32	7.22	66	9.79
5	2.33	1.70	45	9.60
Muestreo de julio de 2008				
1	7.67	2.88	328	174.17
2	15.45	1.59	257	66.98
3	3.51	1.7	257	60.04
4	41.93	8.46	239	46.69
5	2.79	1.33	187	17.98

Fuente: [4]

Se puede identificar un incremento en la carga en suspensión a partir del punto 3; esto se da por la actividad minera y por la presencia de algunas canteras artesanales en el cauce y en los afluentes, por un aumento en la carga de lavado en la zona media de la cuenca y por la gran cantidad de procesos erosivos activos, los cuales dejan descubiertas grandes áreas de terreno propensas a la erosión; esto también explica los incrementos en la carga en los eventos de lluvia. En la zona baja, también se tiene gran cantidad de zonas intervenidas, muchas de ellas propensas a la erosión, como taludes y grandes extensiones en explotaciones mineras, por lo que la carga de lavado en esta zona puede ser muy alta, especialmente durante los eventos de precipitación.

Para analizar la carga de fondo, se estudió la capacidad de la quebrada de mover partículas presentes en su lecho. Para evaluar la condición de transporte presente en las campañas de campo se cuenta con las mediciones de Helley Smith.

### 2.5.1 Análisis de la carga de fondo

Hay que señalar que los puntos 2 y 4 corresponden a puntos donde existe una explotación activa

de material aluvial, por lo que serán posteriormente analizados. Considerando los otros puntos 1, 3 y 5, se puede observar que la carga de fondo aumenta hacia la parte baja de la cuenca; también se observa un aumento en el diámetro del material de arrastre; esto puede ser explicado por la mayor capacidad de la corriente en arrastrar sedimentos al aumentar el caudal en la zona estudiada, que es el área de transporte de la cuenca. Los puntos 2 y 4 no cumplen exactamente el mismo comportamiento, manifestando fuertemente la influencia de la explotación de material aluvial en ellos; en ellos la dinámica de sedimentos se encuentra alterada, por la extracción de materiales, ya que ésta se ve sometida a procesos que hacen que se genere un desequilibrio local en el transporte de sedimentos en dichos puntos.

Al analizar las cargas entre los diferentes muestreos se observa que existen alteraciones en la carga de sedimento casi en todos los puntos, excepto en el punto 5, que corresponde al punto en el cual la quebrada no se encuentra tan intervenida.

### 2.5.2 Análisis de la carga en suspensión

Los sólidos suspendidos están constituidos principalmente por carga de lavado en la cuenca. En ella se observó un crecimiento de dicha carga hacia la parte baja de la cuenca. Se presenta un crecimiento especialmente notorio a partir del punto 4, zona en donde está concentrada gran parte de la actividad humana y los procesos erosivos activos. Al comparar los resultados entre los dos muestreos se encuentra que el segundo muestreo presenta un incremento en los sólidos totales y en la carga en suspensión en todas las estaciones; esta situación se genera por las fuertes lluvias que se presentaron en días previos al muestreo durante la campaña del 9 de julio de 2008.

### 3 DISCUSIÓN

Existen diferentes factores tanto sociales como naturales que afectan las dinámicas morfo-sedimentológicas en una cuenca. La forma como es ocupada y como es utilizada la cuenca impacta de forma positiva o negativa dicha dinámica. La carga de sedimentos es una variable muy sensible a dichos factores y a cambios en la cuenca, por lo que refleja la situación en la cuenca y sus intervenciones. Para ello, se debe tener una aproximación a la dinámica natural de sus sedimentos, para identificar cambios que reflejen alteraciones en la ella. Se deben identificar, además, puntos críticos donde las alteraciones en la dinámica son de tal magnitud que han desencadenado procesos que pueden producir desequilibrios en la cuenca, o que se encuentran cercanos a umbrales para dichos desequilibrios. Cualquier intervención sobre una cuenca debe considerar esta dinámica, se deben planear intervenciones integrales, donde se consideren, entre otros factores, la afectación hidráulica y sobre el régimen de sedimentos.

### 4 CONCLUSIONES

La quebrada Doña María tiene un alineamiento recto, con una secuencia de rápidos y pozos en la zona alta de la cuenca y un alineamiento sinuoso en la parte media y baja, con algunos tramos rectos en las zona urbana por las intervenciones realizadas, donde los controles impuestos por las coberturas no permiten desplazamiento lateral de la quebrada. Al analizar la forma del valle se puede observar que en la parte alta y media de la cuenca la quebrada forma un cañón estrecho en forma de V. En la zona baja cerca a la desembocadura con el río Aburrá, el cauce tiene una llanura más amplia, con una vertiente en la margen izquierda. Se identificaron 5 tramos de acuerdo con la pendiente, con valores del 40%, 12.8%, 3.5%, 4 % y 1.9%. La cuenca

presenta una zona de producción muy marcada, con altas pendientes.

En la cuenca se encontró una gran cantidad de explotaciones aluviales artesanales. Dichas explotaciones se ubican principalmente sobre el cauce de la quebrada Doña María y algunos afluentes principales cerca de la desembocadura.

De acuerdo con las mediciones realizadas, la cuenca se caracteriza por transportar gran cantidad de materiales. Se detectaron cinco tramos con características homogéneas en el cauce principal de la cuenca para analizar la dinámica de los sedimentos. En la parte alta, una zona con alta producción de sedimentos y una zona media con una gran capacidad de transporte y con altos aportes de las vertientes. Las explotaciones aluviales artesanales presentes en la cuenca afectan la dinámica de transporte natural de los sedimentos. En la cuenca existe un incremento significativo de la carga de lavado particularmente en la zona media y baja, la cual está asociada a la presencia de zonas de la cuenca descubiertas de vegetación, que son más propensas a la erosión.

### AGRADECIMIENTOS

Al convenio interinstitucional Cátedra del Agua, liderado por el Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia, quienes han permitido el desarrollo de esta propuesta metodológica. Al Área Metropolitana del Valle de Aburrá por sus aportes en la aplicación de esta metodología al caso de la quebrada Doña María.

### REFERENCIAS

- [1] MINAMBIENTE, "Decreto 1729 de 2002 (agosto 6) por el cual se reglamenta la Parte XIII, Título 2, Capítulo III del Decreto-ley 2811 de 1974 sobre cuencas hidrográficas, parcialmente el numeral 12 del artículo 5o. de la Ley 99 de 1993 y se dictan otras disposiciones," 2002.

- [2] AMVA et al., *Estudio para la reglamentación del aprovechamiento, uso y administración de las aguas de la quebrada Doña María, incluidas todas las subcuencas o microcuencas de sus quebradas afluentes, hasta su desembocadura en el río Aburrá, localizada entre los Municipios de la Estrella, Itagüí y Medellín.*, Medellín, 2007.
- [3] Colombia, "Ley 99 de 1993 (diciembre 22), por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA y se dictan otras disposiciones," 1993.
- [4] AMVA et al., *Metodología para la formulación de planes de Ordenación y Manejo de Microcuencas altamente urbanizadas en el Valle de Aburrá*, Medellín: Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia, 2008.
- [5] D. S. Biedenharn et al., "Stream bank Stabilization Handbook ", Veri-Tech Inc., 1998.
- [6] S. A. Schumm, *The fluvial system*, New York: John Wiley & Sons, 1977.
- [7] D. L. Rosgen, y H. L. Silvey, *Applied River Morphology*, Fort Collins: Wildland Hydrology Books, 1996.
- [8] J. Suárez, *Control de erosión en zonas tropicales*, Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, Corporación Autónoma Regional para la defensa de la Meseta de Bucaramanga, 2004.
- [9] AMVA, y CTA, "Plan de Ordenación y Manejo de la microcuenca de la quebrada Doña María, municipios de Itagüí, La Estrella y Medellín," 2008.
- [10] HIMAT, y W. Klohn, "Aforos con molinete y actividad de las comisiones de aforo. Nota técnica sobre procedimientos de aforo con molinete," Publicación Aperiódica - Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras (Colombia). (no. 3). 1977.