

Estudio de Impacto Ambiental



Proyecto Hidroeléctrico **COCORNÁ III**

Río Cocorná, Antioquia

Anexo 5.1.8

Caracterización del Régimen Sedimentológico Natural

Octubre de 2022

Calle 33 A # 71 - 83, Medellín • Tel: (57) (4) 448 47 50
Info@praming.com.co • www.praming.com.co

TABLA DE CONTENIDO

LISTADO DE FIGURAS	iii
LISTADO DE TABLAS	v
LISTADO DE FOTOS.....	vi
LISTADO DE ANEXOS	vii
1 CARACTERIZACIÓN DEL RÉGIMEN SEDIMENTOLÓGICO NATURAL (SIN PROYECTO).....	8
1.1 Localización del Proyecto dentro de la zonificación hidrográfica del IDEAM8	
1.2 Caracterización de los sedimentos.....	11
1.2.1 Caracterización tamaños de sedimentos por granulometría combinada.	12
1.2.2 Caracterización tamaño de sedimentos por Conteo de partículas de Wolman	16
1.2.3 Caracterización solidos suspendidos y su tamaño mediante Coulter .	16
1.2.4 Información complementaria de sedimento en suspensión del proyecto ubicado aguas abajo, PCH Pantágoras.....	17
1.3 Características morfométricas del cauce del río Cocorná en el tramo del proyecto.....	18
1.4 Estimación del régimen de transporte de sedimentos en la cuenca en su condición actual.....	22
1.5 Caracterización física, hidráulica de los tramos representativos del río Cocorná aguas abajo del sitio de captación.....	30
1.6 Balance de sedimentos a nivel de cuenca y en zonas de interés	37
2 DESCRIPCÓN DE INFLUENCIA DEL PROYECTO EN TERMINOS DE LA DINAMICA DE SEDIMENTOS	40
2.1 Granulometría promedia y volumen de los sedimentos atrapados por el desarenador	40
2.2 Volumen de los sedimentos atrapados por el pondaje y descarga de la compuerta de fondo.....	44
2.2.1 Colmatación del pondaje.....	45
2.2.2 Formación de brecha con apertura de compuertas	46
2.2.3 Capacidad de descarga de sedimento con la compuerta de fondo de azud	48
2.3 Implementación de un modelo local de transporte de sedimento en el tramo comprendido entre la captación de PCH Cocorná III y la captación de PCH Pantágoras	50
2.3.1 Métodos	50

2.3.2	Resultados	55
3	CONCLUSIONES	63
	BIBLIOGRAFÍA	64

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1-1. Zonificación hidrográfica área de estudio	9
Figura 1-2. Principales Subcuencas de la Cuenca del Río Cocorná	10
Figura 1-3. Ubicación de la Cuenca del Río Cocorná con respecto a la Cuenca del Río Samaná Norte.....	10
Figura 1-4. Perfil longitudinal del río Cocorná desde su nacimiento hasta su desembocadura al río Calderas.....	11
Figura 1-5. Curva granulométrica de material recolectado en la zona de captación	14
Figura 1-6. Curva granulométrica de material recolectado en la zona de media.....	15
Figura 1-7. Curva granulométrica de material recolectado en la zona de descarga.	15
Figura 1-8. Curva granulométrica de material recolectado aguas debajo de proyecto Cocorná3 como parte del estudio realizado para el proyecto Pantágoras	17
Figura 1-9. Estaciones y cuencas empleadas para el análisis regional de transporte de sedimentos.....	24
Figura 1-10. Curva de duración de caudales adimensional para estaciones y hasta punto de captación de los proyectos Cocorná 3 y Pantágoras	25
Figura 1-11. Relación caudal líquido, concentración de sedimento en las estaciones analizadas y en aforos realizados en proyecto Pantágoras.	26
Figura 1-12. Curva regional de producción de sedimento en suspensión seleccionada	27
Figura 1-13. Rendimiento producción sedimento en suspensión cuencas ríos de Antioquia y otros pertenecientes a la cuenca del Magdalena, recuadro verde río Cocorná hasta la captación de PCH Cocorná III	29
Figura 1-14. Ciclo medio anual carga en suspensión, de fondo y total cuenca del río Cocorná hasta el sitio de captación, condición actual SIN obras	30
Figura 1-15. Planta perfil de subtramos de análisis desde la captación hasta la descarga de Cocorná 3	31
Figura 1-16. Fotografías del cauce en el tramo de interés.....	35
Figura 1-17. Secciones topo-batimétricas disponibles en los subtramos en estudio (líneas en rojo)	36
Figura 2-1. Granulometrías medias para material recolectado en el cauce (Líneas grises), junto con el valor promedio en rojo	40
Figura 2-2. Colmatación pondaje PCH Morro Azul. Fuente: (ENGEO Engenharia e Geologia LTDA, 2016; Hidrológica Ingeniería, 2017).....	45
Figura 2-3. Esquema volumen de colmatación de pondaje (sin escala)	46
Figura 2-4. Esquema volumen de brecha (no se tienen en cuenta escala).....	47
Figura 2-5. Concentraciones máximas diarias estimadas teniendo en cuenta caudales típicos en meses húmedos.....	49
Figura 2-6. Esquema de procesos sedimentológicos en canal (tomado de Montoya, 2008).....	50
Figura 2-7. Esquema modelo local de transporte de sedimento implementado	50
Figura 2-8. Número de purgas de las dos tolvas del desarenador en los años analizados con meses completos de datos	57
Figura 2-9. Número de purgas máximas de las dos tolvas del desarenador en un año	57

Figura 2-10. Número de aperturas de la compuerta de fondo del azud en los años analizados con meses completos de datos	58
Figura 2-11. Número de aperturas de la compuerta de fondo del azud en un año ..	58
Figura 2-12. Comparación de la carga de sedimento transportada en la condición Natural (SIN PROYECTO) y en la condición FUTURA (con proyecto), tramo 1 de cálculo.....	61
Figura 2-13. Comparación de la carga de sedimento transportada en la condición Natural (SIN PROYECTO) y en la condición Futura (CON PROYECTO), tramo 4 de cálculo.....	62

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1-1. Resultado granulometría combinada para muestras recolectadas en zona de captación, media y descarga.	16
Tabla 1-2. Resultado conteo de partículas en Cocorná cerca a área de influencia del proyecto Cocorná 3.	16
Tabla 1-3. Resultados del análisis de tamaño de partículas en suspensión	17
Tabla 1-4. Características estaciones usadas para el análisis regional de transporte de sedimentos.	23
Tabla 1-5. Características morfológicas de cuencas delimitadas hasta estaciones usadas para el análisis regional de transporte de sedimentos.	25
Tabla 1-6. Características generales de los subtramos analizados	32
Tabla 1-7. Tamaños característicos de material de acuerdo con el conteo de partículas realizado.	32
Tabla 1-8. Ecuaciones empíricas para estimar rugosidad de las partículas del cauce en función de diámetros característicos.	33
Tabla 1-9. Factores método de Cowan para estimar el valor de rugosidad de Manning.	34
Tabla 1-10. Método fotográfico de Barnes para estimar el valor de rugosidad de manning	35
Tabla 1-11. Valor de rugosidad calculado con diferentes métodos.	36
Tabla 1-12. Factor y exponente de curvas características de cada tramo	37
Tabla 1-13. Rendimiento y tasa de denudación cuenca río Cocorná definida en puntos de interés de Cocorná 3, estimados a partir de la curva regional del transporte de sedimentos en conjunto con la curva de duración de caudales medios diarios	38
Tabla 1-14. Valores medios mensuales multianuales de la carga en suspensión y de fondo cuenca río Cocorná definida en puntos de interés de proyecto Cocorná 3	38
Tabla 1-15. Valores máximos mensuales multianuales de la carga en suspensión y de fondo cuenca río Cocorná definida en puntos de interés de proyecto Cocorná 339	39
Tabla 2-1. Diámetros característicos granulometría promedia.	40
Tabla 2-2. Características del desarenador.	41
Tabla 2-3. Remoción de sedimento por el desarenador, método de Mery (Mery M., 2013).	42
Tabla 2-4. Resumen representación porcentual fracciones de sedimento atrapado en la tolva del desarenador, método de Mery (Mery M., 2013)	42
Tabla 2-5. Peso específico seco de depósitos de sedimento por rango granulométrico y promedio para la mezcla de sedimento depositado según Wu y Wang (Wu & Wang, 2006) en Julien (Julien, 2010)	43
Tabla 2-6. Cálculo volúmenes y pesos de las fracciones de sedimento atrapadas en una tolva del desarenador	44
Tabla 2-7. Cálculo de pendiente de compensación usando diferentes metodologías	46
Tabla 2-8. Cálculo volúmenes y pesos de las fracciones de sedimento de la brecha involucrada en la apertura de la compuerta de la descarga de fondo	48
Tabla 2-9. Caudales característicos hasta captación para diferentes fases del ENSO.	49

Tabla 2-10. Pendiente y longitud de los 5 subtramos del modelo de transporte de sedimento	51
Tabla 2-11. Caudales medios anuales principales afluentes entre el sitio de captación de PCH Cocorná III y PCH Pantágoras	53
Tabla 2-12. Caudales ambientales a la altura del sitio de captación de la PCH Cocorná III	54
Tabla 2-13. Valoración del modo del proceso de transporte (tomado de Julien, 2010)	55

LISTADO DE FOTOS

Foto 1-1. Sitio captación, toma de batimetría	12
Foto 1-2. Aforo líquido realizado por método de vadeo y suspensión	13
Foto 1-3. Toma de muestras de fondo y en suspensión	13
Foto 1-4. Toma de muestra de material superficial y subsuperficial para análisis granulométrico	13
Foto 1-5. Conteo de partículas de Wolman	14
Foto 1-6. Vista hacia aguas abajo sitio captación	18
Foto 1-7. Vista hacia agua abajo zona intermedia entre captación y casa de máquinas	19
Foto 1-8. Vista hacia agua abajo zona intermedia entre captación y casa de máquinas	19
Foto 1-9. Vista sitio descarga casa de máquinas	20
Foto 1-10. Vista hacia aguas arriba, barra de sedimento margen izquierda	20
Foto 1-11. Vista aérea PCH El Popal, ciclo rojo barra parte interna de la curva (Fuente: https://www.lacascadasasesp.com/)	21
Foto 1-12. Gravas gruesas y cantos pequeños (izquierda), gravas finas y arenas gruesas (derecha) depósito de sedimento en curva interna aguas arriba de la PCH El Popal	22

LISTADO DE ANEXOS

Anexo 1. Régimen actual

Anexo 1.1 Caracterización de los sedimentos

Anexo 1.2 Curva regional de producción de sedimentos

Anexo 1.3 Caracterización hidráulica de los tramos en estudio

Anexo 1.4 Balance de sedimentos condición actual

Anexo 2. Condición con proyecto

Anexo 2.1 Cálculos Desarenador

Anexo 2.2 Cálculos descarga de fondo azud

Anexo 2.3 Cálculos modelo local de transporte de sedimentos

1 CARACTERIZACIÓN DEL RÉGIMEN SEDIMENTOLÓGICO NATURAL (SIN PROYECTO)

La dinámica de sedimentos es un componente importante de la geomorfología fluvial y es inherente a la evolución misma de los cauces y el paisaje (Corenblit et al., 2007). Siendo así, los sedimentos son indispensables en el mantenimiento del ambiente fluvial, así como en los sistemas de canales, planicies de inundación, humedales, estuarios y en el ciclo de nutrientes. En cauces naturales no intervenidos existe un equilibrio entre agradación y degradación (UNESCO, 2010). Actividades antrópicas o eventos extremos pueden alterar la dinámica de los sedimentos y afectar otros procesos naturales de la biosfera, causando desequilibrio (Persichillo et al., 2018). Algunas de las afectaciones producidas por las actividades antrópicas son: remoción de la cobertura vegetal asociada a deforestación, inadecuados usos del suelo, inadecuadas prácticas mineras, intervención a los cauces (diques, captaciones, trasvases, etc.), entre otros. Las afectaciones mencionadas anteriormente tienden a aumentar el suministro de sedimentos al sistema fluvial y por ende alteran la dinámica entre suministro y transporte naturales de la fuente.

La Cuenca del Río Cocorná se caracteriza por ser un área hidrográfica con altos niveles de precipitación. Adicionalmente, en la zona de influencia del proyecto predominan las laderas escarpadas o de alta pendiente. En este capítulo se describe la dinámica actual del transporte de sedimentos en la zona de interés.

1.1 Localización del Proyecto dentro de la zonificación hidrográfica del IDEAM

El proyecto hidroeléctrico Cocorná III está localizado en el municipio de Cocorná en el departamento de Antioquia, sobre el río Cocorná, entre las cotas 1345 msnm y 1122 msnm aproximadamente, en el área hidrográfica del Magdalena – Cauca, zona hidrográfica del Medio Magdalena y subzona hidrográfica del Río Nare (código de la zonificación hidrográfica del IDEAM 2308-03), ver Figura 1-1.

La Cuenca del Río Cocorná, delimitada hasta la desembocadura al río Calderas, está localizada en territorio de los municipios de El Carmen de Viboral, Santuario, Granada y Cocorná, sobre la cordillera Central y desemboca al río Calderas aproximadamente en la cota 746 msnm, en las coordenadas 888.429 Este y 1.157.590 Norte (sistema de coordenadas Magna Sirgas origen Bogotá).

Este importante ecosistema hídrico tiene un área cercana a los 373,7 km², nace a una altura aproximada de 2.843 msnm y se extiende en su totalidad en jurisdicción de Cornare. Sus principales afluentes son los ríos San Lorenzo, San Matías y las quebradas La Linda, La Pisquina, La Rumbona, El Biadal, La Soledad, La Trinidad, La Chorrera y La Hundida. Ver Figura 1-2.

La Cuenca del Río Cocorná hace parte de la cuenca hidrográfica del río Samaná Norte (clasificada por el IDEAM con el código 2308-03), la cual tiene un área cercana

a las 2008,3 km², una altura máxima de 3177 msnm y su punto más bajo a los 150 msnm, descargando sus aguas a la Cuenca del río Nare y este a la cuenca del Río Magdalena a una altura aproximada de 137 msnm en el municipio de Puerto Nare. Figura 1-3.

La cuenca del río Cocorná, hasta la captación del proyecto tiene un área de 119,3 km² y hasta el sitio de descarga de la casa de Máquinas de 131,4 km², siendo sus principales afluentes las quebradas La Hundida, La Linda, El Biadal y el río San Lorenzo. Ver Figura 1-2.

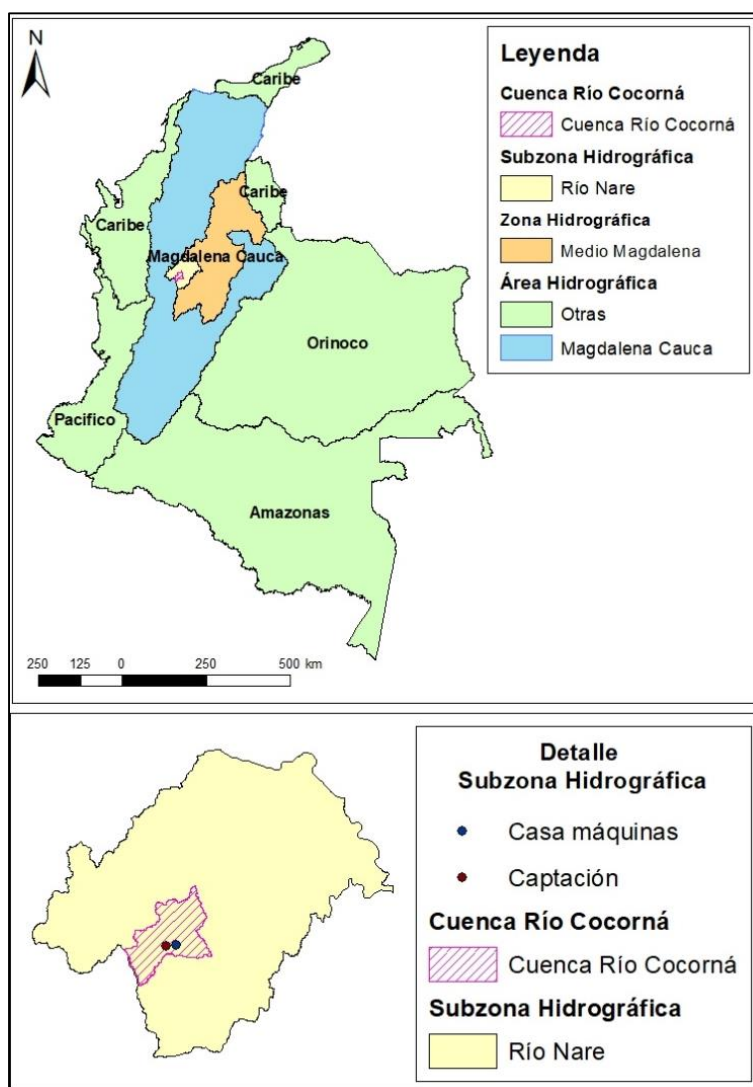


Figura 1-1. Zonificación hidrográfica área de estudio

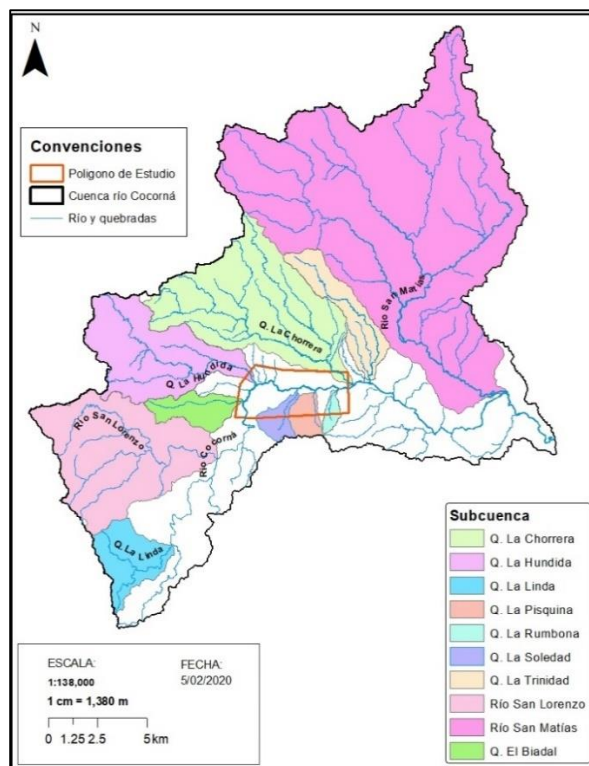


Figura 1-2. Principales Subcuencas de la Cuenca del Río Cocorná
Q: Quebrada

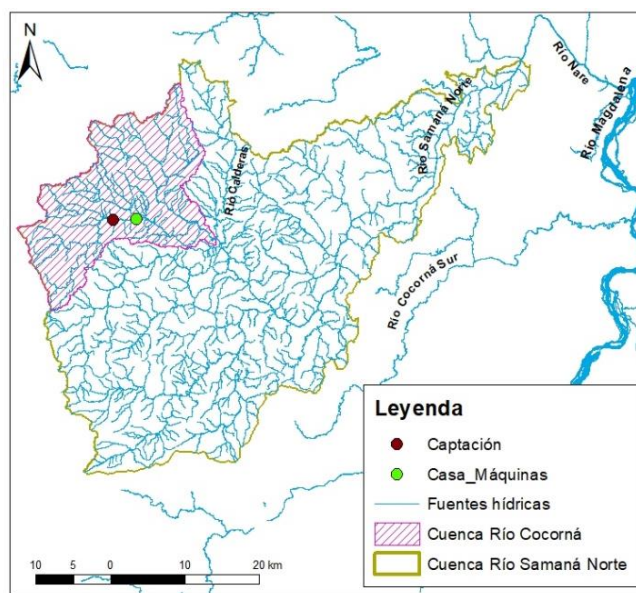


Figura 1-3. Ubicación de la Cuenca del Río Cocorná con respecto a la Cuenca del Río Samaná Norte

En la Figura 1-4 se muestra el perfil longitudinal del cauce del río Cocorná, con el objetivo de asociar el tramo afectado a una clasificación morfológica que permita inferir acerca de la dinámica fluvial del río. El río Cocorná, hasta el sitio de descarga de la PCH, presenta altas pendientes, mayores al 4%, poca sinuosidad y un cauce encañonado.

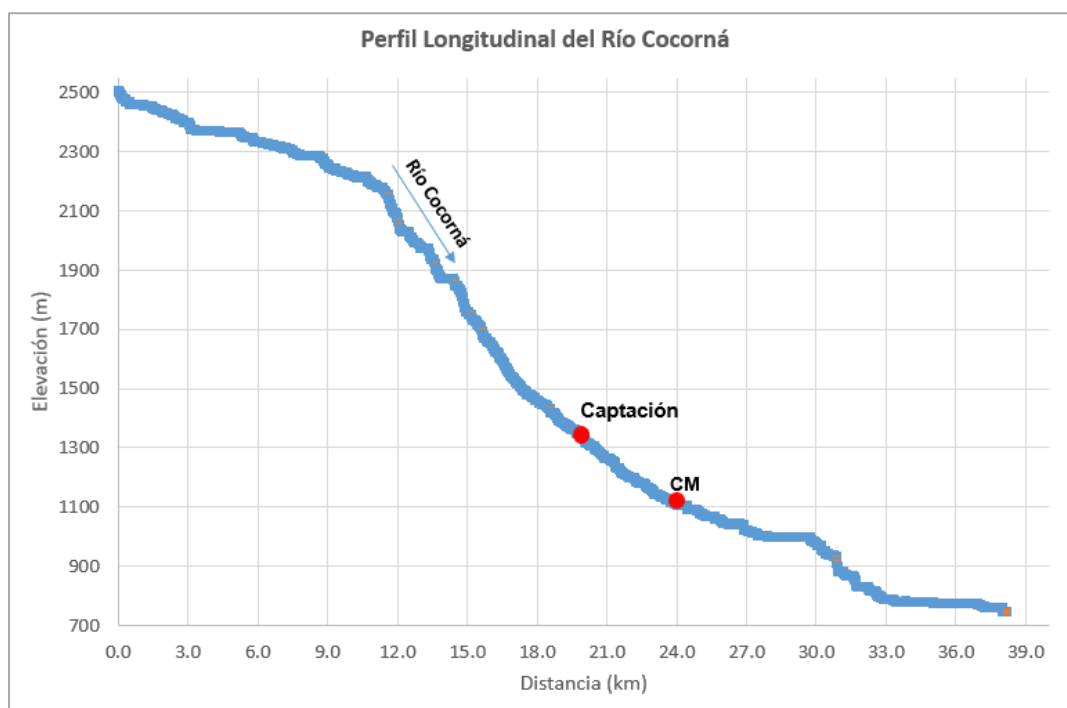


Figura 1-4. Perfil longitudinal del río Cocorná desde su nacimiento hasta su desembocadura al río Calderas

1.2 Caracterización de los sedimentos

Para caracterizar los sedimentos transportados por el cauce durante las campañas de campo se tomaron muestras de material en diferentes lugares a lo largo del cauce, teniendo en cuenta material en captación, tramo medio y descarga. En las zonas mencionadas anteriormente se realizó también conteo de partículas de Wolman, adicionalmente durante las campañas de campo de calidad del agua se recolectaron muestras en las cuales se analizaron los sólidos suspendidos totales y sus tamaños mediante por ensayo Coulter. Finalmente, aguas abajo del área de influencia del proyecto Cocorná 3 se encuentra en estudios otro proyecto de aprovechamiento del recurso Pantágoras, se analiza la información recolectada para dicho proyecto, debido a la cercanía de los proyectos y las características similares del cauce.

1.2.1 Caracterización tamaños de sedimentos por granulometría combinada

Las condiciones del río Cocorná al momento de las visitas de campo no permitieron de forma segura la realización de aforos líquidos y sólidos en todos los sitios clave del proyecto, ya que el río no era vadeable, y no existe infraestructura que en los sitios permita el aforo (Foto 1-1).



Foto 1-1. Sitio captación, toma de batimetría

En los sitios donde fue factible realizar aforos por vadeo o por suspensión (Foto 1-2 y Foto 1-3), al momento de los aforos el transporte de sedimentos era mínimo, con lo cual no fue factible obtener la suficiente cantidad de muestra para realizar su respectivo análisis granulométrico.

Por lo anterior, se tomaron muestras de sedimento transportado en crecientes previas que estaba depositado en zonas accesibles del lecho, considerándose estas como representativas del sedimento que transporta regularmente el río Cocorná (Foto 1-4). Una caracterización adicional del material superficial del lecho sobre barras laterales de sedimento se realizó mediante el conteo de partículas de Wolman (Foto 1-5).



Foto 1-2. Aforo líquido realizado por método de vadeo y suspensión



Foto 1-3. Toma de muestras de fondo y en suspensión



Foto 1-4. Toma de muestra de material superficial y subsuperficial para análisis granulométrico



Foto 1-5. Conteo de partículas de Wolman

En la Figura 1-5 se presentan las curvas granulométricas del material recolectado en la captación, una de las curvas representa el material grueso dominado por gravas y el otro material fino donde predominan las arenas. Las granulometrías del material tomado en el tramo medio tienen mayor presencia de arenas como se observa en la Figura 1-6. En el tramo final de descarga predominan las arenas medias como se presenta en la Figura 1-7.

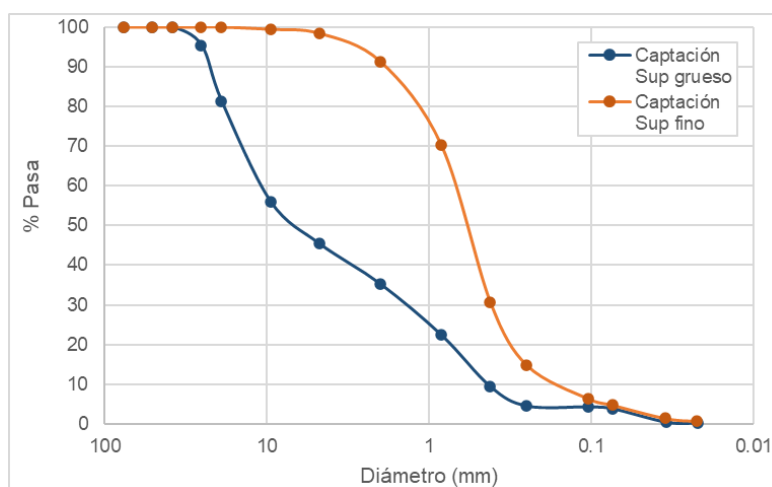


Figura 1-5. Curva granulométrica de material recolectado en la zona de captación

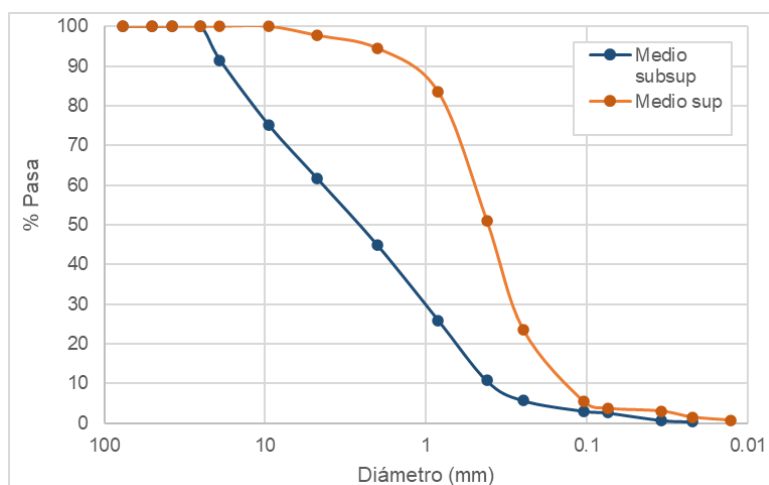


Figura 1-6. Curva granulométrica de material recolectado en la zona de media

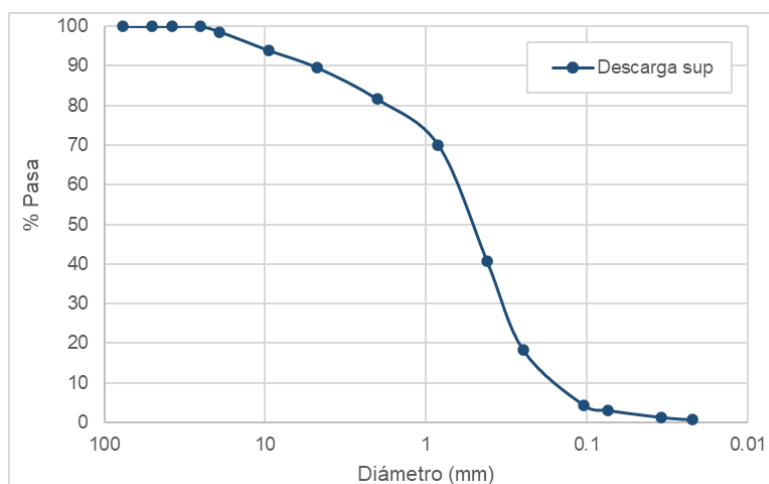


Figura 1-7. Curva granulométrica de material recolectado en la zona de descarga

En la Tabla 1-1 se presenta el resumen de las granulometrías del material recolectado en la zona de interés, se evidencia que en 4 de las 5 muestras recolectas el material predominante son arenas medias. Sin embargo, en una de las muestras tomadas en captación el material predominante son gravas finas. En el Anexo 1.1 a este documento se presentan las granulometrías mencionadas.

Tabla 1-1. Resultado granulometría combinada para muestras recolectadas en zona de captación, media y descarga.

Fecha	Punto	Textura	Grava			Arena			Finos	Tot
			Gruesa	Media	Fina	Gruesa	Media	Fina	Limo o arcilla	
1/29/2019	Cap Cocorná 3	%	0,00	18,62	35,91	10,17	30,70	0,67	3,93	100
		% total	54,53			41,54			3,93	100
1/29/2019	Cap Cocorná 3	%	0,00	0,00	1,57	7,11	76,48	10,01	4,83	100
		% total	1,57			93,61			4,83	100
1/30/2019	Tramo Medio	%	0,00	8,49	29,78	16,91	39,10	3,11	2,60	100
		% total	38,28			59,12			2,60	100
1/30/2019	Tramo Medio	%	0,00	0,00	2,30	3,26	70,80	19,89	3,75	100
		% total	2,30			93,95			3,75	100
1/29/2019	Descarga	%	0,00	1,35	9,04	8,01	63,31	15,25	3,03	100
		% total	10,40			86,57			3,03	100

1.2.2 Caracterización tamaño de sedimentos por Conteo de partículas de Wolman

A lo largo de la zona de interés del proyecto se caracterizó el tamaño del lecho mediante conteo de partículas de Wolman, en este se evidencia que en los diferentes sitios analizados el material predominante son las gravas, los resultados se presentan en la Tabla 1-2.

Tabla 1-2. Resultado conteo de partículas en Cocorná cerca a área de influencia del proyecto Cocorná 3

Lugar	Fecha	Arenas	Gravas	Cantos	Bloques	Total
Puente Arenosa	1/29/2019	6	67	27	0	100
Puente Colgante Mazotes	1/29/2019	6	74	20	0	100
Captación Cocorná 3	1/29/2019	0	84	16	0	100

1.2.3 Caracterización sólidos suspendidos y su tamaño mediante Coulter

En las 3 muestras analizadas durante las campañas de calidad del agua se tiene que los sólidos suspendidos totales tienen una concentración menor a 5 mg/l. En cuanto al tamaño del dicho material se evidencia un tamaño medio cercano 44 micras en las 3 muestras recolectadas, resultado que se presenta en la Tabla 1-3.

Tabla 1-3. Resultados del análisis de tamaño de partículas en suspensión

Punto	Fecha	10%	25%	50%	75%	90%	Media	Mediana	Moda
Pte Arenosas	1/29/2019	17,4	19,4	21,1	37,2	82	42	21	42,1
Pte Mazotes	1/29/2019	16,4	19,5	23,1	39,4	78,5	46,2	23,1	46,1
Captación Cocorná 3	1/29/2019	15,5	18,9	21,5	38,3	89,2	43	21,5	43,1

1.2.4 Información complementaria de sedimento en suspensión del proyecto ubicado aguas abajo, PCH Pantágoras

Para el proyecto localizado aguas debajo de Cocorná 3, Pantágoras, se realizaron campañas durante periodos húmedos y periodos secos. El material analizado se tomó en la zona de captación, media y descarga, las curvas granulométricas entregadas por parte del consultor se presentan en la Figura 1-8, en esta se evidencia que el material caracterizado es el material fino.

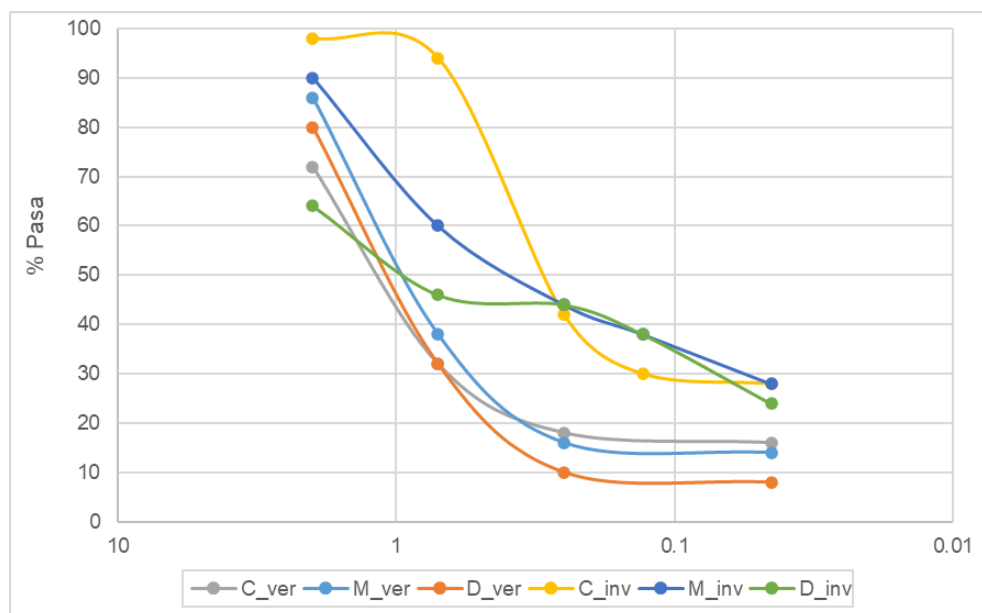


Figura 1-8. Curva granulométrica de material recolectado aguas debajo de proyecto Cocorná3 como parte del estudio realizado para el proyecto Pantágoras

1.3 Características morfométricas del cauce del río Cocorná en el tramo del proyecto

El río Cocorná en el tramo comprendido entre la captación de la PCH Cocorná III y la PCH Pantágoras presenta una configuración de escalones y pozos, con presencia de bloques de orden métrico que conforman chorros de flujo concentrado en condición de caudales medios. El Cocorná es un río con suministro de sedimento limitado desde su cuenca, lo que sumado a la alta capacidad de transporte que le proporcionan las altas pendientes del lecho (que en tramos se encuentran entre el 3% y el 6,8%), y la gran turbulencia que a flujo le proporcionan las macroformas del lecho, hace que no existan depósitos de sedimento fino-granular en el tramo en estudio, ya que el sedimento que llega al tramo es preferencialmente transportado hacia aguas abajo antes de ser depositado, siendo pequeñas fracciones de sedimento fino presentes en el lecho depositadas en las ramas descendentes de las crecientes. Los elementos antes mencionados se aprecian en la Foto 1-6, Foto 1-7, Foto 1-8 y Foto 1-9.

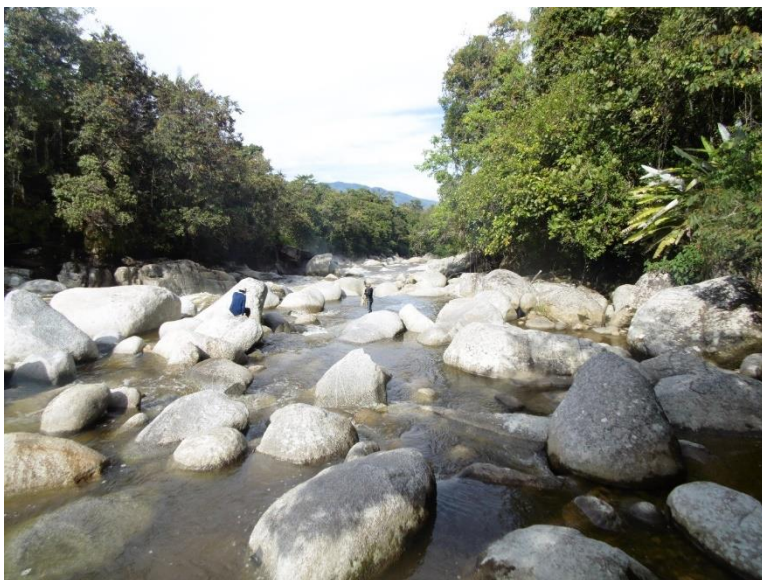


Foto 1-6. Vista hacia aguas abajo sitio captación

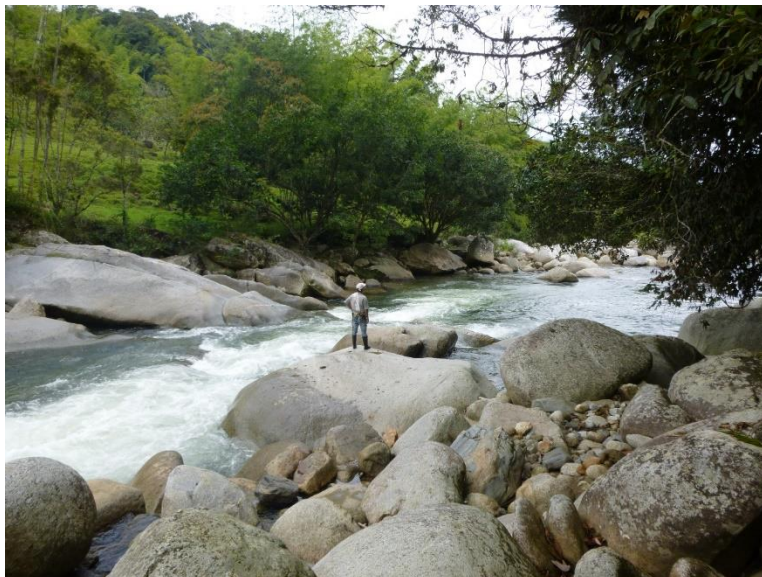


Foto 1-7. Vista hacia agua abajo zona intermedia entre captación y casa de máquinas



Foto 1-8. Vista hacia agua abajo zona intermedia entre captación y casa de máquinas

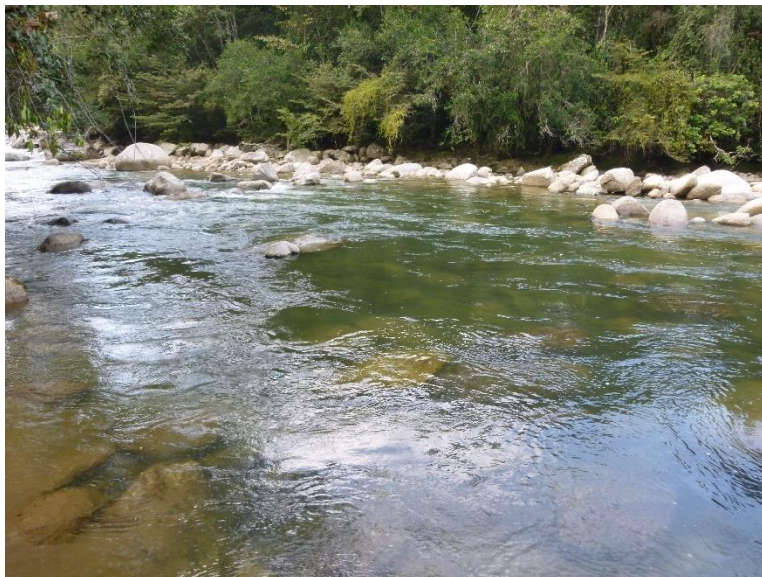


Foto 1-9. Vista sitio descarga casa de máquinas



Foto 1-10. Vista hacia aguas arriba, barra de sedimento margen izquierda

El río Cocorná en la zona en estudio presenta algunos depósitos de sedimento grueso del tipo cantos a bolos (Foto 1-10, Foto 1-4), con ausencia de arenas superficiales, que forman una coraza ante el paso del flujo. Adicional a lo anterior, las bolas de roca de orden métrico presentes en el lecho no son transportadas por flujos regulares a

crecientes medias, lo que proporciona gran estabilidad al lecho frente a la erosión. Conclusiones adicionales en este aspecto se presentan en el apartado de hidráulica en párrafos siguientes.

Un ejemplo del tipo de sedimento que transporta el río Cocorná se encuentra en el pondaje de la PCH Popal, ubicado sobre el río Cocorná aproximadamente 6 km aguas abajo de la descarga del agua turbinada de la PCH Cocorná III, y que entró en operación comercial en marzo de 2014 (<https://www.lacascadasasesp.com>)

El Popal lleva 7 años en operación, y como se aprecia en la Foto 1-11, el proceso de sedimentación no ha colmatado el pondaje en su totalidad, producto posiblemente a la operación de la compuerta configura la descarga de fondo del azud. Igualmente se aprecia la formación de una barra de sedimento en la parte interna de la curva ubicada aguas arriba de la captación en la zona del pondaje.



Foto 1-11. Vista aérea PCH El Popal, ciclo rojo barra parte interna de la curva (Fuente: <https://www.lacascadasasesp.com/>)

La barra de sedimento antes mencionada posee tamaños desde las gravas muy gruesas a cantos finos, y mayoritariamente arenas gruesas a gravas muy finas (Foto 1-12), siendo estos últimos materiales los que son explotados desde el depósito, el cual se formó producto de la sedimentación inducida por la presencia del pondaje.



Foto 1-12. Gravas gruesas y cantos pequeños (izquierda), gravas finas y arenas gruesas (derecha) depósito de sedimento en curva interna aguas arriba de la PCH El Popal

Un aspecto a destacar es que aguas abajo del azud de El Popal no se aprecian depósitos de material fino-granular del sedimento que ha sido libreado desde la descarga de fondo del azud y desde la purga de los desarenadores, lo que muestra qué, aún con el central operando, los caudales remanentes han presentado una capacidad de transporte suficiente para movilizar el sedimento hacia aguas abajo.

1.4 Estimación del régimen de transporte de sedimentos en la cuenca en su condición actual

Las condiciones del lecho del río Calderas en el sitio del proyecto (el cual posee pendientes importantes y está compuesto por rocas de orden métrico), imponen restricciones importantes a la hora de pretender realizar aforos de sedimentos sistemáticos tanto de la carga en suspensión como de la carga de fondo, ya que en especial esta última labor, se requiere generalmente que el río tenga una condición vadeable y a la vez segura para el ingreso del personal.

Por lo anterior, el estudio de cuantificación de los sedimentos producidos por la cuenca del río Calderas en los sitios de captación de los proyectos hidroeléctricos Cocorná III y Pantágoras, se basó en la curva regional de producción de sedimento construida a partir de los registros de sedimento en suspensión de las estaciones hidrométricas disponibles del IDEAM en la zona, las cuales se presentan en la Tabla

1-4. Dada la gran dificultad que se tiene en el aforo de la carga de fondo, el IDEAM no realiza la medición directa de esta fracción del sedimento transportado, luego, la información histórica disponible en la zona de los proyectos está limitada sólo a los datos del sedimento transportado en suspensión.

Tabla 1-4. Características estaciones usadas para el análisis regional de transporte de sedimentos

COD IDEAM	ESTACIÓN	DEPTO	CORRIENTE	LAT	LON	Inicio	Final	Aforos
23087190	GARRUCHA LA	Antioquia	Samaná Norte	1155131	904700	3/13/1979	9/3/2012	78
23077020	PTE FERROCARRIL	Antioquia	Cocorná	1159330	937937	9/1/1975	3/6/2007	101
26187170	HERENCIA LA	Caldas	Arma	1108471	860032	6/23/1994	4/12/2012	95
26187180	ALBANIA	Antioquia	Arma	1103778	860838	6/24/1994	11/30/1999	82
26207040	RODADERO EL	Antioquia	Sinifana	1155537	809268	6/21/1978	3/11/2013	111
23087160	CARAMANTA	Antioquia	Nus	1211410	912877	3/10/1979	6/27/2014	89
26187001	QUITASUENO	Caldas	Arma	1124609	836590	12/4/2008	2/24/2009	236

La ubicación de las estaciones empleadas para realizar el análisis regional de transporte en suspensión se presenta espacialmente en la Figura 1-9, adicionalmente en se presenta el área que tributa a cada una de las estaciones, así como el área que tributa a los proyectos Cocorná 3 y Pantágoras.

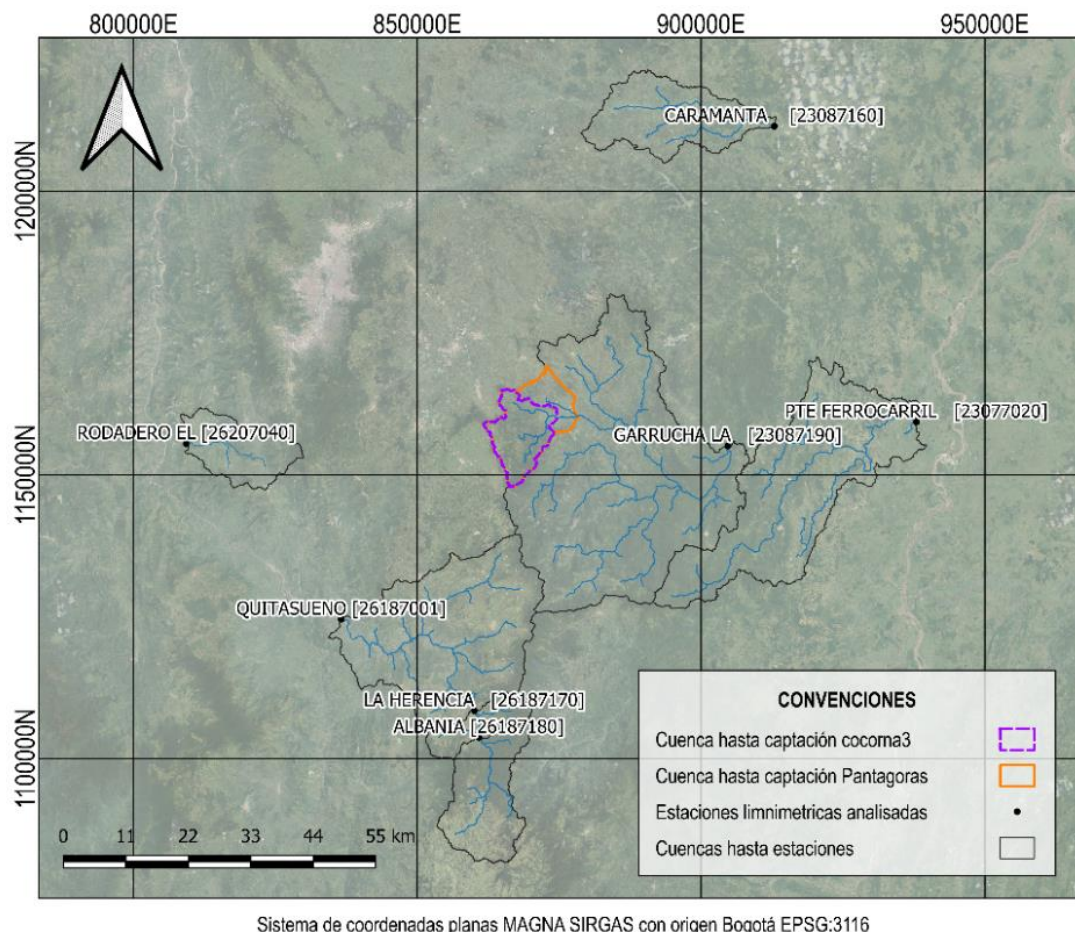


Figura 1-9. Estaciones y cuencas empleadas para el análisis regional de transporte de sedimentos.

A partir de los registros de caudales medio diario en cada una de las estaciones y la estimación realizada para los proyectos se calcularon las curvas de duración de caudales adimensionales, las cuales se presentan en la Figura 1-10. Estas curvas se vuelven adimensionales (empleando el caudal medio de cada serie) con el fin de comparar cuales estaciones presentan un comportamiento hidrológico similar al proyecto en términos de duración de caudales. Se evidencia que las curvas de las estaciones Quita sueño y El Rodadero presentan un comportamiento diferente, razón por la cual no fueron tenidas en cuenta.

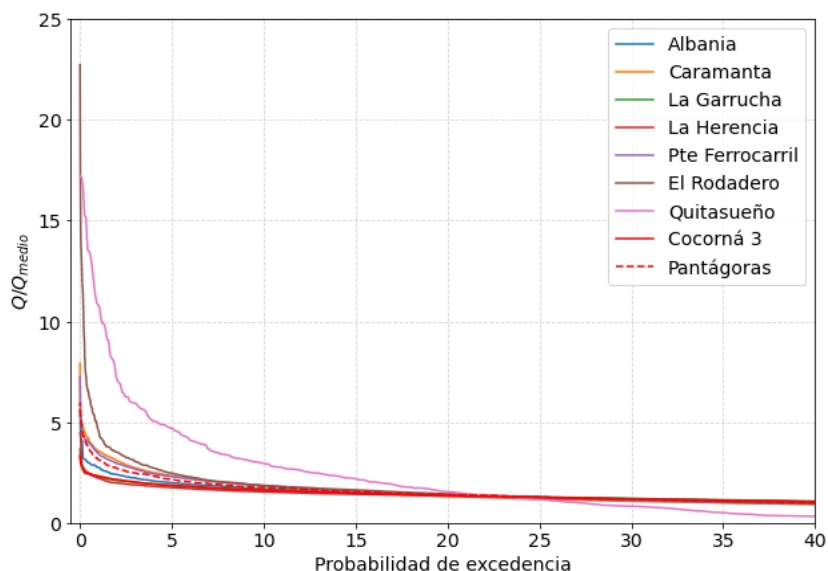


Figura 1-10. Curva de duración de caudales adimensional para estaciones y hasta punto de captación de los proyectos Cocorná 3 y Pantágoras

A partir de las áreas que tributan a cada estación presentada en la Figura 1-9 se estimaron algunas características morfométricas relevantes para el estudio las cuales se presenta en la Tabla 1-5. En esta se evidencia que las estaciones Quita sueño y El Rodadero además de presentar diferencias en el régimen hidrológico también presentan diferencias en la morfología de las cuencas.

Tabla 1-5. Características morfológicas de cuencas delimitadas hasta estaciones usadas para el análisis regional de transporte de sedimentos

Nombre estación	Corriente	Elevación (msnm)	Área tributaria (km ²)	Q med (m ³ /s)	Pendiente (%)	Perímetro (km)	Densidad drenaje (km/km ²)
GARRUCHA LA	Samaná Norte	376	1507,749	189,25	34,131	162,68	1,785
PTE FERROCARRIL	Cocorná	154	778,955	54,04	23,39	153,6	1,816
HERENCIA LA	Arma	1927	347,163	17,00	32,492	77,36	1,63
ALBANIA	Arma	2224	252,686	11,21	32,019	62	1,669
RODADERO EL	Sinifana	643	183,318	5,34	31,997	55,76	1,91
CARAMANTA	Nus	823	300,723	17,39	25,096	78,56	1,88
QUITASUENO	Arma	630	1090,198	22,97	33,101	157,68	1,836

Nombre estación	Corriente	Elevación (msnm)	Área tributaria (km2)	Q med (m3/s)	Pendiente (%)	Perímetro (km)	Densidad drenaje (km/km2)
CAP COCORNÁ III	Cocorná	1365	120,779	11,53	25,492	44,92	1,722
CAP PANTAGORAS	Cocorná	1117	175,998	16,42	25,509	53,28	1,757

En la Figura 1-11 se presentan los valores de caudal y concentración en las diferentes estaciones y en el proyecto Pantágoras. Se observa que los valores tomados en la estación El Rodadero se encuentran tendiendo hacia caudales más bajos, mientras que los datos tomados en la estación Quitasueño presenta valores de concentración mayores que las otras estaciones, corroborando así la necesidad de no tomar en cuenta estas estaciones para el análisis regional. Por otra parte, los datos recolectados en Pantágoras se encuentran dentro de la dispersión de puntos a pesar de que las muestras fueron tomadas en periodo seco (caudales bajos).

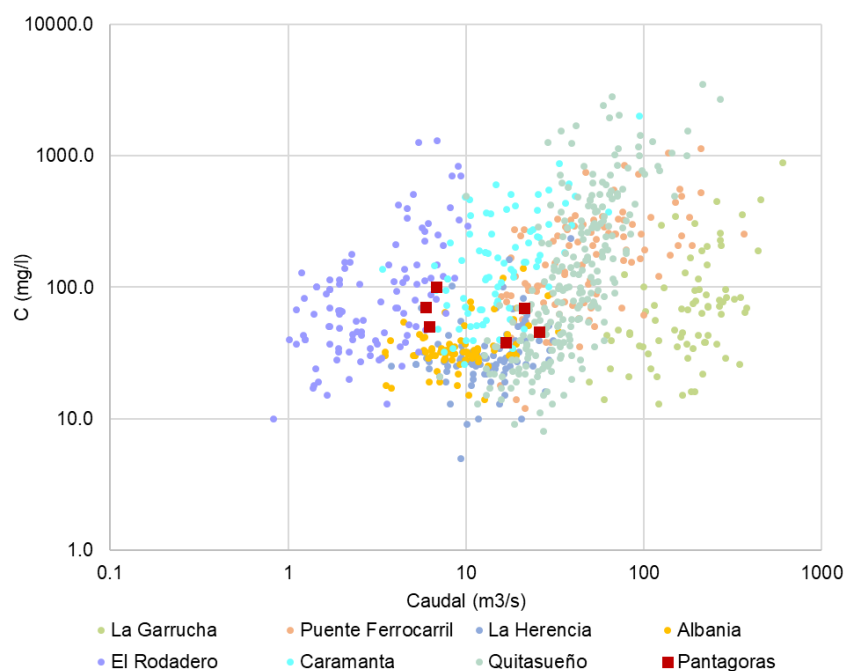


Figura 1-11. Relación caudal líquido, concentración de sedimento en las estaciones analizadas y en aforos realizados en proyecto Pantágoras.

Tomando en consideración lo anterior se realizó la agrupación de las estaciones cuyas cuencas o áreas tributarias que presentan un comportamiento similar al del río

Cocorná cerca al área de interés. En la construcción de la curva regional de producción e sedimento en suspensión se usó el método propuesto en Annandale, Morris y Karki (2016), siendo este: a) Dibujo del caudal versus la concentración de sedimento en suspensión de los distintos aforos disponibles en diferentes escalas (aritmética, semi-log y log-log) y examen del tipo de ecuación que representa mejor la relación; b) usando Excel® se generó una curva inicial de mejor ajuste (mínimos cuadrados); c) se compararon las cargas total y parciales del sedimento predichas con la ecuación y con los datos originales; d) si la carga total no se ajusta con un error inferior al 5% a la carga estimada con la ecuación de mejor ajuste calculada con Excel® (o cualquier otra herramienta o lenguaje de programación que ajuste curvas por mínimos cuadrados), se usa el SOLVER de Excel® para ajustar la ecuación usando como función objetivo la minimización del error en la carga tomando como condición inicial de la optimización los valores obtenidos en el paso previo; e) se chequeó el ajuste en términos del error en la carga del sedimento en suspensión medido y la calculada con la ecuación resultante del proceso de optimización. La curva finalmente obtenida se presenta en la Figura 1-12. En el Anexo 1-2 a este documento se presentan los datos y ajustes realizados para la curva regional.

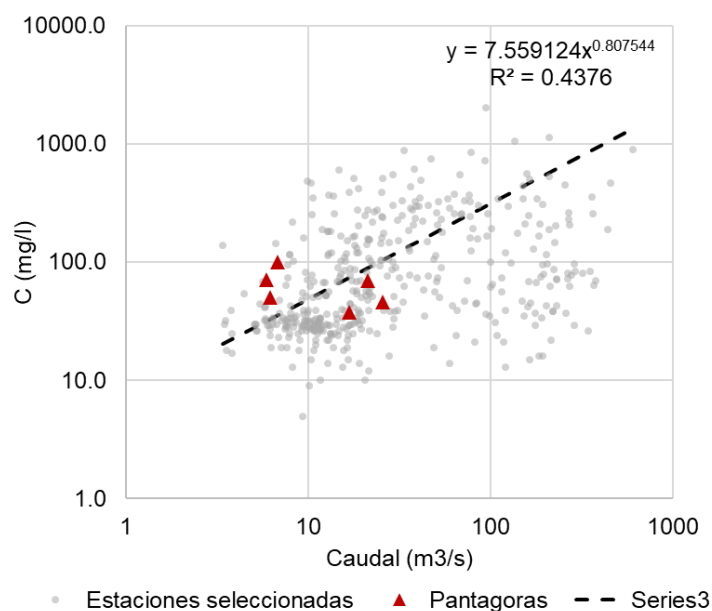


Figura 1-12. Curva regional de producción de sedimento en suspensión seleccionada

Con el fin de estimar la carga de sedimento de fondo que naturalmente llegaría a la captación de los proyectos hidroeléctricos en estudio, se partió de datos de aforos completos (carga de suspensión y de fondo) realizados en cuenca cercanas y en otras cuencas de montaña del departamento de Antioquia, así como de información de referencia de proyectos similares en cuencas aledañas a la del río Cocorná, con

los cuales se aproximó la relación entre la carga de fondo y la de suspensión con la carga total de sedimento.

Así, Posada G. y Montoya, (2000) exponen que la carga de fondo es un porcentaje entre el 5% y el 25% de la carga en suspensión, y para las cuencas de montaña de Antioquia propusieron un valor del 20% (valor empleado en sus cálculos en el río Porce), lo que implica que la carga de fondo según los autores representa en promedio el 17% de la carga total, mientras que la carga en suspensión el 83% restante. Múnera, (2013) en aforos realizados en 4 lugares distintos en el río Negro (oriente Antioqueño) encontró que la carga de fondo representó en promedio un 16% de la carga total, mientras que HMV INGENIEROS (2012) para el río San Matías (cuenca contigua a la del río Calderas) proponen que la carga de fondo a la altura del proyecto hidroeléctrico El Molino representaba aproximadamente el 29% de la carga total, mientras que la carga en suspensión representa el 71% restante. Al respecto, Cataño y Vélez, (2016) exponen que la relación entre la carga de fondo y la carga total de sedimento varía en función de la concentración de sedimento en suspensión, donde, a mayor concentración de sedimento en suspensión menor es la relación mencionada, y para cauces aluviales los autores muestran que la carga de fondo representa entre el 40% y el 70% de la carga total.

Con la información anterior, considerada pertinente para el estudio de sedimentos de la cuenca del río Cocorná, se estimó un valor medio de la representación de la carga de fondo en la carga total, así, empleando el valor del 17% de Posada G. y Montoya, (2000), con el 16% de Múnera, (2013), un 29% de HMV INGENIEROS, (2012), y un valor del 40% de Cataño y Vélez, (2016) (valor inferior del rango que corresponderá a la condición de mayores concentraciones de sedimento suspendido), se obtuvo que en promedio la carga de fondo en ríos de montaña como los de la zona en estudio pueden representar del orden del 25% de la carga total de sedimento transportado por la corriente, y la carga en suspensión el 75% restante de la carga total, siendo estos valores los finalmente empleados en este estudio.

Aplicando la curva regional de producción de sedimento en suspensión obtenida a la serie de caudales del río Cocorná hasta el sitio de captación, obtenemos que la carga media anual producida en la cuenca y que pasa por la zona de la captación, la cual es de aproximadamente 22,773 kTon/año, lo que implica una tasa de denudación del orden de 0,119 mm/año y un rendimiento de 190,88 Ton/km²/año.

El valor de rendimiento anterior fue cotejado con valores de otras cuencas de ríos ubicados en el departamento de Antioquia y otros pertenecientes a la cuenca del río Magdalena (Figura 1-13), empleando los datos reportados por Álvarez y Vélez (2015), Restrepo (2015), Montoya y Montoya (2005) y, Restrepo y Restrepo (2005). La figura muestra a la cuenca del río Cocorná definida hasta el sitio de la captación de PCH Cocorná III, similar a cuencas como la de los ríos Riachón, Fonse, Man, San Andrés, Cabrera y Neiva.

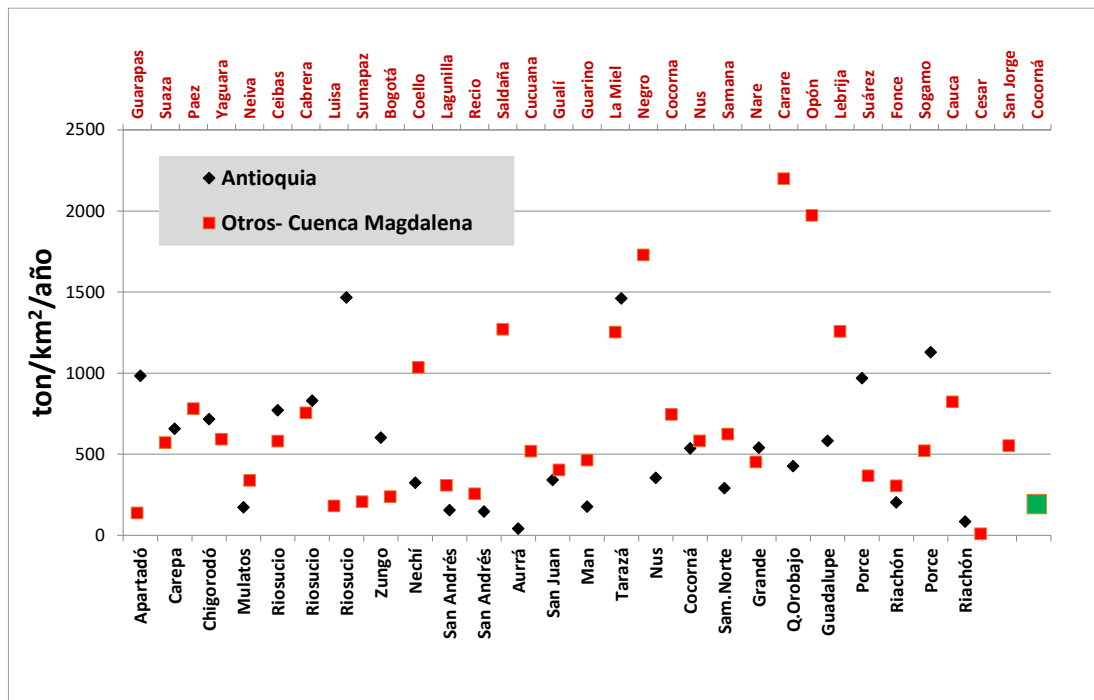


Figura 1-13. Rendimiento producción sedimento en suspensión cuencas ríos de Antioquia y otros pertenecientes a la cuenca del Magdalena, recuadro verde río Cocorná hasta la captación de PCH Cocorná III

Fuente: Elaboración propia, datos de referencia tomados de Álvarez y Vélez (2015), Restrepo (2015), Montoya y Montoya (2005), Restrepo y Restrepo (2005)

Debe considerarse que la curva es incierta para la zona de caudales altos, dada la ausencia en las estaciones consideradas de aforos en dicha condición hidrológica (en creciente). Por lo general en la zona de caudales en creciente la curva no sigue un crecimiento monótono, situación por lo cual no es posible captar por la poca cantidad de datos de concentración para caudales superiores a 100,00 m³/s.

Se empleó la serie de caudales medios diarios estimados en el sitio de captación en el período 1983-2016 (33 años) y la curva de descarga de sedimento en suspensión regional antes mencionada, y la proporción de carga de fondo (25% de la carga total) y carga en suspensión (75% de la carga total) presentada, se estimó el ciclo anual de la carga en suspensión, de la carga de fondo y de la carga total de sedimento al sitio de captación (Figura 1-14).

El ciclo expone un régimen de transporte asociado a la bimodalidad de la hidrología en la zona, con picos en los meses de mayo y octubre, y bajos valores en enero-febrero y julio-agosto. En el mes de menor enero se presentan los menores caudales sólidos con valores medios multianuales de 1,238 kTon/mes de sedimento en suspensión y 0,413 kTon/mes de sedimento como carga de fondo, mientras que en mayo se presentan las mayores afluencias de sedimento con valores medios de 2,873

kTon/mes de sedimento en suspensión, y 0,958 kTon/mes de carga de fondo. Mayores detalles pueden consultarse en el Anexo 1.4.

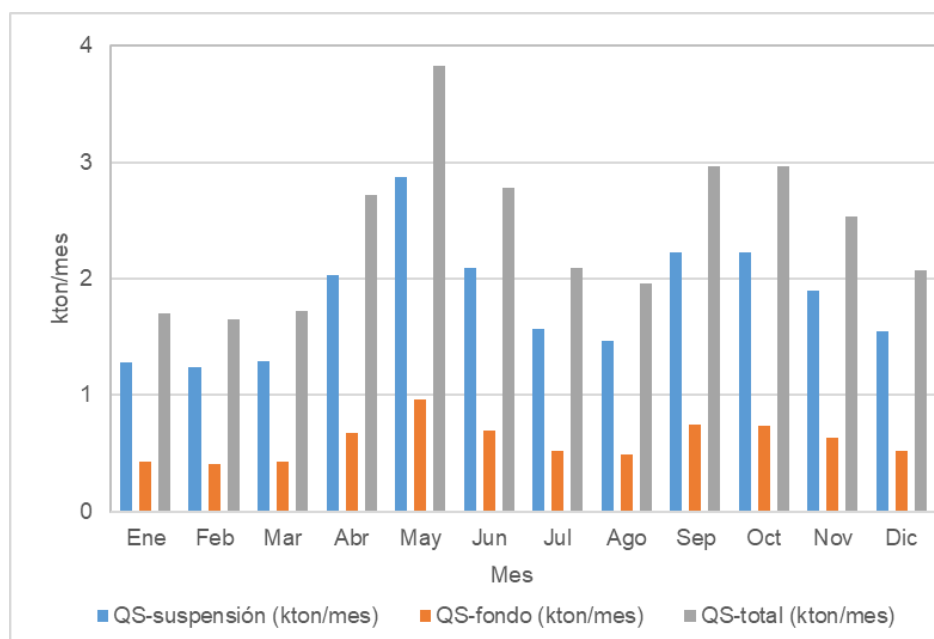


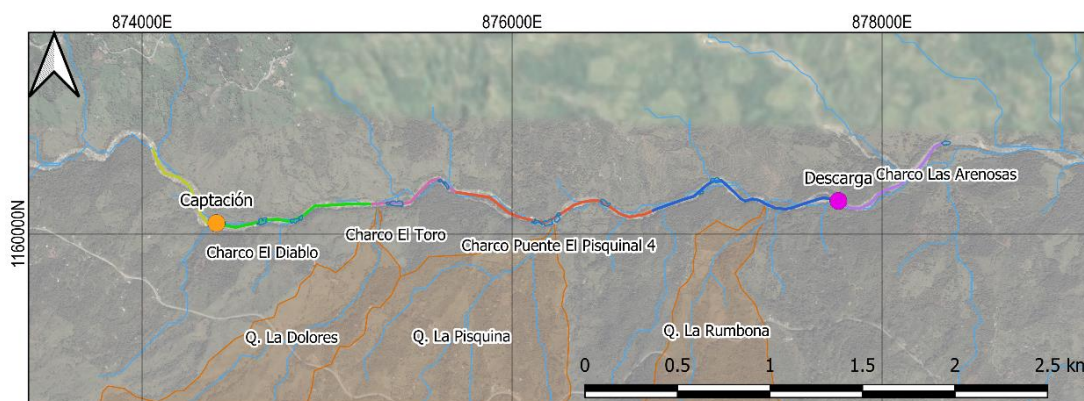
Figura 1-14. Ciclo medio anual carga en suspensión, de fondo y total cuenca del río Cocorná hasta el sitio de captación, condición actual SIN obras

1.5 Caracterización física, hidráulica de los tramos representativos del río Cocorná aguas abajo del sitio de captación

En esta zona de interés del cauce, donde se presentará una reducción de caudales debido al proyecto Cocorná 3, se analizan las características físicas (como cambios bruscos en la pendiente o en la forma del cauce), hidrológicas (convergencia de fuentes hídricas con el río Cocorná), geomorfológicas y estructurales (presencia de islas, deltas, cambios de dirección por presencia de estructuras competentes). Lo anterior con el fin de identificar subtramos representativos del río Cocorná en el tramo de estudio. En dichas zonas se evidencian pocos cambios en el alineamiento vertical y horizontal, debido a esto un criterio importante para definir los subtramos representativos será la ubicación de puntos de especial interés como lo son los charcos de uso recreativo.

En la Figura 1-15 se presenta la planta perfil del cauce desde aguas arriba de la captación hasta aguas abajo de la descarga, cerca de la zona de captación proyectada para Pantágoras. El primer subtramo es el de la captación este tiene incluido el charco El Diablo debido a su cercanía con las obras de captación,

posteriormente viene un tramo medio al cual tributa la quebrada La Dolores y se encuentra el Charco denominado El Toro, aguas abajo se encuentra otro tramo medio donde se encuentran los charcos los Pisauinales y a estos tributa la quebrada La Pisquina y finalmente el tramo de descarga donde no se encuentran charcos de interés y tributa la quebrada La Rumbona.



Sistema de coordenadas planas MAGNA SIRGAS con origen Bogotá EPSG:3116

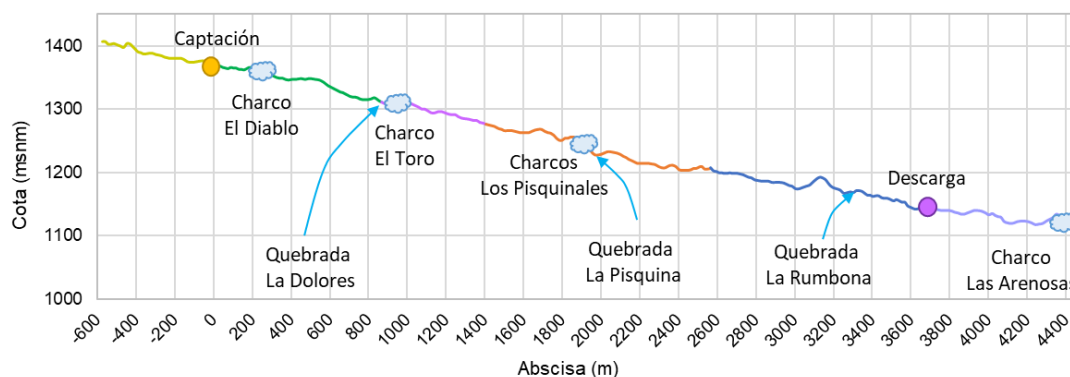


Figura 1-15. Planta perfil de subtramos de análisis desde la captación hasta la descarga de Cocorná 3

En la Tabla 1-6 se presentan algunas características generales de los subtramos, longitud, sinuosidad y pendiente. Se evidencia que la variación de la sinuosidad y la pendiente en los subtramos es baja, razón por la cual cobra sentido definir estos tramos teniendo en cuenta las zonas de interés particular como los son los charcos de uso recreativo.

Tabla 1-6. Características generales de los subtramos analizados

Tramo	Long (m)	Sinuosidad	Pendiente
A_Cap	571,29	1,09	0,061
Cap_El Diablo	877,50	1,03	0,068
Med_El Toro	536,11	1,16	0,062
Med_Pisquinal	1162,42	1,09	0,058
Descarga	1108,99	1,11	0,050
Des_Arenosas	704,70	1,11	0,031

En cada uno de estos tramos se seleccionó un subtramo representativo donde se levantaron secciones con topografía de detalle, en estos se implementa el modelo hidráulico HEC-RAS. Debido a las condiciones del cauce que dificultaron llevar a cabo aforos se definirá el valor de rugosidad de Manning con base en datos empíricos registrados en literatura.

A partir de las granulometrías obtenidas por conteo de partículas de Wolman se calculan algunos tamaños característicos, los cuales se presentan en la Tabla 1-7. A partir de estos diámetros característicos y basados en ecuaciones empíricas desarrollados por diferentes autores se estima un factor de rugosidad asociado al material del lecho, dichos valores se presentan en la Tabla 1-8.

Tabla 1-7. Tamaños característicos de material de acuerdo con el conteo de partículas realizado.

D10 (mm)	6,17	Grava fina (8-4 mm)
D16 (mm)	9,26	Grava media (16-8 mm)
D50 (mm)	25,01	Grava gruesa (32-16 mm)
D75 (mm)	39,90	Grava muy gruesa (64-32 mm)
D84 (mm)	45,25	Grava muy gruesa (64-32 mm)
D90 (mm)	62,23	Grava muy gruesa (64-32 mm)

Tabla 1-8. Ecuaciones empíricas para estimar rugosidad de las partículas del cauce en función de diámetros característicos.

Autor	Valor n_r
Strickler (1923)	0,0224
Anderson (1970)	0,0260
Adcion. Carreteras USA (1975)	0,0214
Simons y Senturk (1976)	0,0210
Garde y Reju (1978)	0,0257
Bray (1979)	0,0321
Subramanya (1982)	0,0254
Posada (1998)	0,0263
Lane y Carlson (1979)	0,0276
Henderson (1966)	0,0271
Bathurst et al (1981)	0,0292
Bray (1979)	0,0317
Peter and Muller (1948)	0,0239
Wong & Parker (in review)	0,0271
VALOR MÁXIMO	0,0321
VALOR PROMEDIO	0,0262
VALOR MÍNIMO	0,0210

Teniendo en cuenta estos valores de rugosidad del grano y la propuesta de Cowan (Chow, 1959), quien propone estimar el valor de n en función de algunos parámetros característicos del cauce, aplicando la siguiente ecuación:

$$n = (n_o + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) * m_5$$

Los valores de n y m se obtienen de tablas función del material del perímetro, irregularidad, variación de la sección transversal, efecto de las obstrucciones, vegetación y curvaturas en planta. En la Tabla 1-9 se presentan os valores seleccionados y la razón por la cual fueron seleccionados, usando estos factores se obtiene un valor de rugosidad de Manning igual a 0,0612.

Tabla 1-9. Factores método de Cowan para estimar el valor de rugosidad de Manning.




Factores	Valor	Observaciones
n_0 (material) (ecuaciones tamaño de grano)	0,0262	Promedio de ecuaciones empíricas a partir de diámetros característicos. ()
n_1 (Grado irregularidad)	0,01	moderada a considerable rugosidad del lecho, y moderadamente erodado en las márgenes. [0.006-0.01]
n_2 (variaciones sección transversal)	0,005	Secciones grandes y pequeñas se alternan ocasionalmente. El flujo va de un lado a otro ocasionalmente por cambios en la sección. [0.001-0.005]
n_3 (efecto obstrucciones)	0,02	Obstrucciones naturales por los bloques y por las columnas del puente apreciable. [0.02-0.03]
n_4 (Vegetación)	0	Las zonas con vegetación las tiene en cuenta específicamente el modelo hidrodinámico con valores particulares según el tipo de vegetación, luego no hay necesidad de agregarle el efecto al lecho.
m_5 (meandros)	1	menor

Durante los recorridos realizados en la zona se identificaron las condiciones del lecho del río Cocorná en el sitio del proyecto, el cual posee pendientes importantes y está compuesto por rocas de orden métrico, como se observa en la Figura 1-16. Basado en la propuesta de Barnes, (1987) se busca en las fotografías presentadas por el algunos cauces con características similares al tramo de interés en el río Cocorná, en la Tabla 1-10 se presentan tres cauces seleccionados, junto con el valor de rugosidad y porque se seleccionó.



Figura 1-16. Fotografías del cauce en el tramo de interés

Tabla 1-10. Método fotográfico de Barnes para estimar el valor de rugosidad de manning

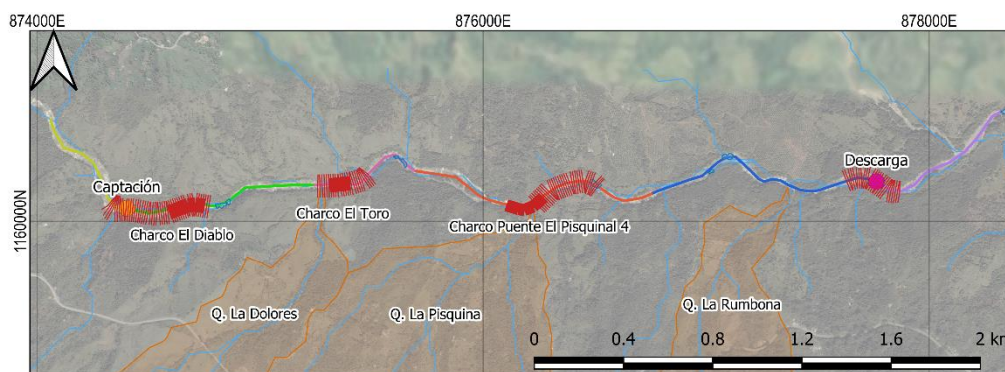
Método fotográfico Barnes (1967)			
Registro	n	Observación	
12-3215	0,073	Anchos y profundidades del registro comparables con condiciones de campo en flujos medios y altos, descripción del material similar.	
10-1550	0,065	Anchos y profundidades del registro comparables con condiciones de campo en flujos bajos y medios, descripción del material y márgenes coincide.	
13-3190	0,043	Descripción material del lecho, profundidades y ancho superficial comparables con las condiciones en campo	

Teniendo en cuenta los valores anteriores y el valor máximo de rugosidad de 0.05 que presenta Chow, (1959) para cauces en corriente montaña, sin vegetación en canal, bancas empinadas, árboles y matorrales en bancas y lecho en gravas, cantos rodados y rocas; se procede a calcular el valor medio de estos valores, obteniendo como resultado un valor de rugosidad igual a 0.057 el cual se presenta en la Tabla 1-11.

Tabla 1-11. Valor de rugosidad calculado con diferentes métodos

Método	n	Observación
Cowan	0,0612	Según Chow (1994)
Tabulaciones Chow V.T	0,05	Cauce de montaña
Fotográfico Barnes (1967)	0,0730	Mayor valor
Fotográfico Barnes (1967)	0,0430	Menor valor
PROMEDIO	0,057	Todos los métodos

Implementando el modelo HEC-RAS con el valor de rugosidad obtenido se simulaban diversos escenarios hidrológicos en cada subtramo donde se contaba con secciones topo-batimétricas disponibles, Figura 1-17, y a partir de esos resultados se construyeron las curvas caudal-velocidad media, y también para el ancho superficial, radio hidráulico, profundidad máxima, ancho superficial, y profundidad media. Las curvas resultaron del ajuste al modelo potencial del tipo $V=\alpha Q^\beta$ (ejemplo para la velocidad media en la sección transversal del canal en función del caudal), se tiene en cuenta el ajuste al modelo potencial que mejor se ajuste. El valor de factor y exponente para cada variable en cada subtramo se presenta en la Tabla 1-12 (todas correlaciones estadísticamente significativas). Los detalles de la caracterización hidráulica se presentan en el Anexo 1-3.



Sistema de coordenadas planas MAGNA SIRGAS con origen Bogotá EPSG:3116

Figura 1-17. Secciones topo-batimétricas disponibles en los subtramos en estudio (líneas en rojo)

Tabla 1-12. Factor y exponente de curvas características de cada tramo

Tramo	Característica	α	β	R ²
Captación - El Diablo	Velocidad	0,53	0,40	0,39
	Máx. Profundidad	0,48	0,32	0,45
	Profundidad hidráulica	0,24	0,33	0,45
	Área flujo	1,89	0,60	0,54
	Radio hidráulico	0,23	0,32	0,46
	Ancho superficial	7,79	0,27	0,47
Medio - El Toro	Velocidad	0,82	0,29	0,68
	Máx. Profundidad	0,29	0,36	0,71
	Profundidad hidráulica	0,14	0,39	0,76
	Área flujo	1,21	0,71	0,92
	Radio hidráulico	0,13	0,39	0,76
	Ancho superficial	8,92	0,33	0,69
Medio - Pisquinales	Velocidad	0,71	0,33	0,45
	Máx. Profundidad	0,39	0,36	0,58
	Profundidad hidráulica	0,21	0,35	0,56
	Área flujo	1,41	0,67	0,71
	Radio hidráulico	0,21	0,35	0,58
	Ancho superficial	6,60	0,32	0,65
Descarga	Velocidad	0,72	0,32	0,57
	Máx. Profundidad	0,28	0,37	0,74
	Profundidad hidráulica	0,15	0,38	0,72
	Área flujo	1,40	0,68	0,83
	Radio hidráulico	0,15	0,38	0,72
	Ancho superficial	9,26	0,30	0,62

1.6 Balance de sedimentos a nivel de cuenca y en zonas de interés

En las condiciones actuales de la cuenca del río Cocorná al sitio de captación, la carga media anual estimada de sedimento en suspensión es de 22,773 kTon/año (Tabla 1-13), y tomando los coeficientes de partición descritos en la sección anterior

(carga en suspensión equivalente en promedio al 75% de la carga total, y la carga de fondo al 25%) se tendría una carga de fondo del orden de 7,591 kTon/año, para una carga total de 30,364 kTon/año. En la Tabla 1-13 se presenta el rendimiento y tasa de denudación cuenca río Cocorná definida en puntos de interés de Cocorná 3, estimados a partir de la curva regional del transporte de sedimentos en conjunto con la curva de duración de caudales medios diarios, estimados mediante relación de área con los puntos de interés (detalles en el Anexo 1-4).

Tabla 1-13. Rendimiento y tasa de denudación cuenca río Cocorná definida en puntos de interés de Cocorná 3, estimados a partir de la curva regional del transporte de sedimentos en conjunto con la curva de duración de caudales medios diarios

Ubicación	Carga diaria (kton/día)	Carga anual sedimento suspensión (kton/año)	Rendimiento (ton/km2/año)	Denudación (mm/año)
Cocorná 3	0,0624	22,773	190,888	0,119
Charco El Diablo	0,0625	22,781	188,57	0,118
Charco El Toro	0,0631	23,015	189,434	0,1184
Charco El Pisquinal	0,0673	24,549	194,975	0,122
Pantágoras	0,1303	47,54	270,135	0,169

En la Tabla 1-14 se presentan los valores medios mensuales multianuales de las cargas a nivel mensual, estimados a partir de la curva regional de descarga de sedimentos en suspensión construida para el proyecto, junto con los coeficientes de partición de la carga total antes mencionados, y los caudales medios diarios estimados al sitio de captación. Se incluye también el ciclo anual de puntos de interés y proyecto aguas abajo Pantágoras.

Tabla 1-14. Valores medios mensuales multianuales de la carga en suspensión y de fondo cuenca río Cocorná definida en puntos de interés de proyecto Cocorná 3

Ubicación	(kton/mes)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Cocorná 3	QS-sus	1,28	1,24	1,29	2,04	2,87	2,09	1,57	1,47	2,23	2,22	1,90	1,55
	QS-fondo	0,43	0,41	0,43	0,68	0,96	0,70	0,52	0,49	0,74	0,74	0,63	0,52
	QS-total	1,71	1,65	1,73	2,71	3,83	2,79	2,10	1,96	2,97	2,96	2,53	2,07
Charco El Diablo	QS-sus	1,28	1,24	1,30	2,04	2,87	2,09	1,57	1,47	2,23	2,22	1,90	1,55
	QS-fondo	0,43	0,41	0,43	0,68	0,96	0,70	0,52	0,49	0,74	0,74	0,63	0,52
	QS-total	1,71	1,65	1,73	2,72	3,83	2,79	2,10	1,96	2,97	2,96	2,53	2,07

Ubicación	(kton/mes)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Charco El Toro	QS-sus	1,29	1,25	1,31	2,06	2,90	2,11	1,59	1,48	2,25	2,25	1,92	1,57
	QS-fondo	0,43	0,42	0,44	0,69	0,97	0,70	0,53	0,49	0,75	0,75	0,64	0,52
	QS-total	1,72	1,67	1,75	2,74	3,87	2,82	2,12	1,98	3,00	2,99	2,56	2,09
Charco El Pisquinal	QS-sus	1,38	1,33	1,40	2,19	3,10	2,25	1,69	1,58	2,40	2,40	2,05	1,67
	QS-fondo	0,46	0,44	0,47	0,73	1,03	0,75	0,56	0,53	0,80	0,80	0,68	0,56
	QS-total	1,84	1,78	1,86	2,93	4,13	3,00	2,26	2,11	3,20	3,19	2,73	2,23
Pantágoras	QS-sus	3,46	3,34	3,71	4,79	4,93	3,14	2,35	2,95	4,31	4,90	4,87	4,11
	QS-fondo	1,15	1,11	1,24	1,60	1,64	1,05	0,78	0,98	1,44	1,63	1,62	1,37
	QS-total	4,61	4,45	4,95	6,38	6,58	4,19	3,13	3,94	5,75	6,53	6,49	5,48

La diferencia entre los valores medios mensuales (Tabla 1-14) y los máximos mensuales (Tabla 1-15) es importante, ejemplo de ello es mes de mayo (el de mayor carga media de sedimentos), donde en términos de carga total se tiene un valor medio de 3,83 kTon/mes y un valor máximo de 6,83 kTon/mes (mes de mayo de 2012), mostrando un incremento 2 veces la carga media, evidenciando la variabilidad temporal de importancia que al hidrología impone a la generación y transporte de sedimentos.

Tabla 1-15. Valores máximos mensuales multianuales de la carga en suspensión y de fondo cuenca río Cocorná definida en puntos de interés de proyecto Cocorná 3

Ubicación	(kton/mes)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Cocorná 3	QS-sus	2.71	2.44	2.60	4.54	5.12	4.00	3.40	3.70	3.94	4.36	3.46	3.06
	QS-fondo	0.90	0.81	0.87	1.51	1.71	1.33	1.13	1.23	1.31	1.45	1.15	1.02
	QS-total	3.61	3.25	3.46	6.05	6.83	5.34	4.54	4.94	5.25	5.81	4.61	4.08
Charco El Diablo	QS-sus	2.71	2.44	2.60	4.54	5.12	4.00	3.41	3.71	3.94	4.36	3.46	3.06
	QS-fondo	0.90	0.81	0.87	1.51	1.71	1.33	1.14	1.24	1.31	1.45	1.15	1.02
	QS-total	3.61	3.25	3.47	6.06	6.83	5.34	4.54	4.94	5.26	5.82	4.62	4.08
Charco El Toro	QS-sus	2.74	2.46	2.63	4.59	5.18	4.04	3.44	3.74	3.98	4.41	3.50	3.09
	QS-fondo	0.91	0.82	0.88	1.53	1.73	1.35	1.15	1.25	1.33	1.47	1.17	1.03
	QS-total	3.65	3.28	3.50	6.12	6.90	5.39	4.59	4.99	5.31	5.88	4.66	4.12
Charco El Pisquinal	QS-sus	2.92	2.63	2.80	4.89	5.52	4.31	3.67	3.99	4.25	4.70	3.73	3.30
	QS-fondo	0.97	0.88	0.93	1.63	1.84	1.44	1.22	1.33	1.42	1.57	1.24	1.10
	QS-total	3.89	3.50	3.73	6.53	7.36	5.75	4.89	5.32	5.66	6.27	4.97	4.40
Pantágoras	QS-sus	7.55	10.23	7.84	9.75	10.49	8.44	5.96	9.10	8.74	9.79	9.28	9.81
	QS-fondo	2.52	3.41	2.61	3.25	3.50	2.81	1.99	3.03	2.91	3.26	3.09	3.27
	QS-total	10.07	13.64	10.45	13.01	13.98	11.26	7.95	12.13	11.65	13.05	12.37	13.08

2 DESCRIPCIÓN DE INFLUENCIA DEL PROYECTO EN TERMINOS DE LA DINAMICA DE SEDIMENTOS

2.1 Granulometría promedia y volumen de los sedimentos atrapados por el desarenador

Teniendo en cuenta la información recolectada de sedimentos presentada en el capítulo anterior (Capítulo 1), se decide estimar la granulometría media de los sedimentos en el tramo de interés con base en las granulometrías tomadas en la zona de captación, media y descarga del proyecto Cocorná 3. Se considera que estas granulometrías representan de manera adecuada el material grueso y fino transportado por el cauce. En la Figura 2-1 se presentan las granulometrías de los materiales recolectados en la zona y la granulometría media seleccionada, representada con una línea color rojo.

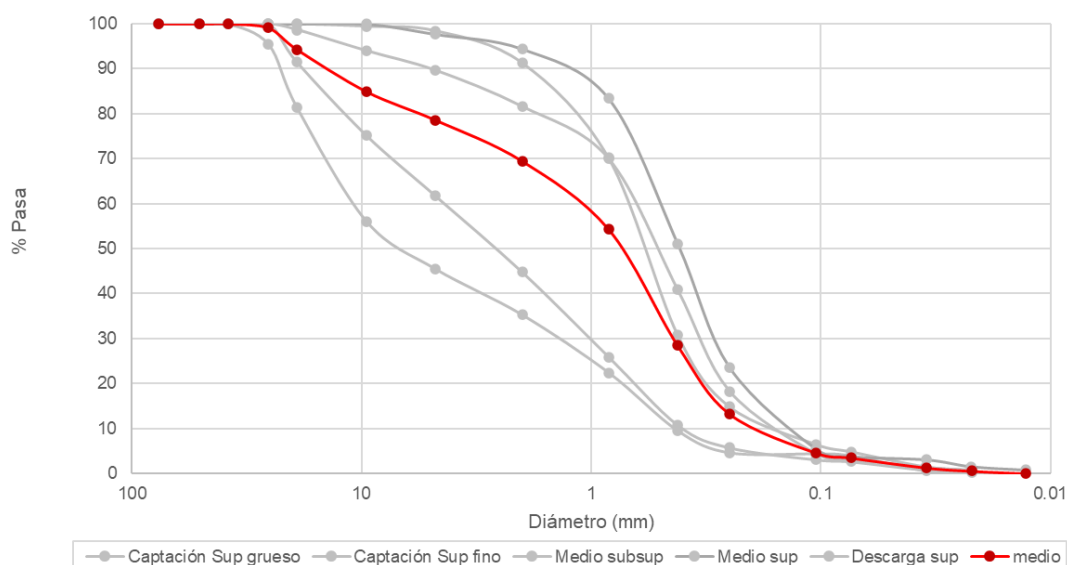


Figura 2-1. Granulometrías medias para material recolectado en el cauce (Líneas grises), junto con el valor promedio en rojo

A partir de la granulometría media seleccionada presentada en la Figura 2-1 se calculan algunos diámetros característicos los cuales se muestran en la Tabla 2-1.

Tabla 2-1. Diámetros característicos granulometría promedia

Di	(mm)	Escala de gradación
D ₁₀	0,195	Arena fina [0,125-0,250 mm]
D ₁₆	0,280	Arena media [0,250 – 0,500 mm]

Di	(mm)	Escala de gradación
D ₅₀	0,769	Arena gruesa [0,5 - 1,0 mm]
D ₈₄	8,814	Grava media [8,0 - 16,0 mm]
D ₉₀	14,697	Grava media [8,0 - 16,0 mm]
D _m	5,525	Diámetro medio aritmético. Grava fina [4,0 - 8,0mm]

A revisar los resultados del análisis Coulter (Tabla 1-3) se evidencian valores similares en los percentiles inferiores al 75, tamaños representativos de la carga de lavado, lo que implica que en las condiciones hidrológicas en las que fueron realizados los distintos muestreos, el tamaño de los sedimentos asociados a procesos de erosión del suelo de la cuenca mostró baja variación.

Por otra parte, el desarenador tiene un tamaño de partícula de diseño de 0,30 mm; lo que implica que tamaños mayores a este serán atrapados en un 100%, mientras que tamaños inferiores serán atrapados parcialmente con una eficiencia menor en función de su tamaño. Algunas de las características del diseño del desarenador se presentan en la Tabla 2-2.

Tabla 2-2. Características del desarenador

Características del desarenador	Valor
Unidades	2
Ancho de la entrada del tanque desarenador (m)	3,0
Ancho ampliado del tanque desarenador (m)	7,0
Longitud del desarenador (m)	40,0
Caudales de diseño de cada unidad (m ³ /s)	5,28
D ₅₀ de la partícula a remover (mm)	0,30
Profundidad del tanque (m)	11,5
Volumen total de cada unidad (m ³ /s)	764,0
Área transversal tolva por módulo (m ²)	6,06
Longitud tolva (m)	25,0
Volumen tolva (m ³)	151,59
Área transversal desde el vertedero hasta el inicio de la tolva	24,50
Volumen desde el vertedero hasta el inicio de la tolva	612,50
Alto de la compuerta de purga	2,00
Ancho de la compuerta de purga	2,00

En la Tabla 2-3 se presenta la remoción de tamaños que realizaría el desarenador en una condición ideal de flujo dentro del mismo, calculada mediante el método del factor de remoción expuesto en Mery (Mery M., 2013). Según los resultados, un 4,6% del sedimento con tamaño inferior a 0,30 mm sería retenido por el desarenador, y con la retención de los tamaños mayores al de diseño de la estructura, la retención total del desarenador en términos de la granulometría media de sedimento transportado por el río será del 98,6%.

Tabla 2-3. Remoción de sedimento por el desarenador, método de Mery (Mery M., 2013)

DIAMETRO (mm)	% QUE PASA	Pi (%)	Dg (mm)	Di (mm)	Di*Pi	ω (mm/s)	ω/ω_0	Pi * (ω/ω_0)
76,20	100,00	-	-	-	-	-	-	
50,80	100,00	0,00	62,22	63,50	0,00	852,39	24,96	0,00
38,10	100,00	0,00	43,99	44,45	0,00	738,19	21,62	0,00
25,40	95,42	4,58	31,11	31,75	145,35	602,73	17,65	0,81
19,10	81,38	14,04	22,03	22,25	312,50	522,66	15,31	2,15
9,52	56,07	25,30	13,48	14,31	362,11	369,00	10,81	2,73
4,76	45,47	10,60	6,73	7,14	75,70	260,92	7,64	0,81
2,00	35,30	10,17	3,09	3,38	34,36	163,73	4,80	0,49
0,84	22,42	12,88	1,30	1,42	18,29	85,12	2,49	0,32
0,42	9,48	12,95	0,59	0,63	8,16	40,40	1,18	0,15
0,25	4,60	4,88	0,32	0,34	1,63	31,17	0,91	0,04
0,11	4,38	0,22	0,16	0,18	0,04	6,18	0,18	0,00
0,07	3,93	0,45	0,09	0,09	0,04	2,77	0,08	0,000362
0,03	0,54	3,40	0,05	0,05	0,18	0,71	0,02	0,000706
0,02	0,27	0,27	0,03	0,03	0,01	0,19	0,01	0,000015
0,013	0,00	0,27	0,02	0,02	0,00	0,14	0,00	0,000011
				Dm (mm)	9,58		Σ	0,046

Teniendo en cuenta la granulometría media presentada en la Figura 2-1 y el método propuesto por Mery, se logra discriminar por fracción de tamaño el material atrapado en la tolva del desarenados. En la Tabla 2-4 se presenta el porcentaje atrapado de acuerdo con la fracción de tamaño.

Tabla 2-4. Resumen representación porcentual fracciones de sedimento atrapado en la tolva del desarenador, método de Mery (Mery M., 2013)

Tipo	Pi	Pi (%)
arcillas	0,0000	0,00%
limos	0,0349	3,49%

Tipo	Pi	Pi (%)
arenas	0,7511	75,11%
gravas muy finas	0,2140	21,40%
$\Sigma P_i =$		100,00%

La masa específica de cada una de las fracciones de tamaño de la mezcla de sedimento depositado en el desarenador se considera en una condición sin compactar, dado el poco tiempo de retención que el sedimento tiene al interior del desarenador, junto con la baja presión a la que se ven sometido al ser los módulos del desarenador estructuras de poca profundidad (condiciones someras del flujo).

Los valores de densidad se toman a partir de la propuesta de Wu y Wang (Wu & Wang, 2006) presentada por Julien (Julien, 2010). En la Tabla 2-5 se presenta el cálculo de la densidad ponderada teniendo en cuenta cada porcentaje de fracción de tamaño.

Tabla 2-5. Peso específico seco de depósitos de sedimento por rango granulométrico y promedio para la mezcla de sedimento depositado según Wu y Wang (Wu & Wang, 2006) en Julien (Julien, 2010)

Di	Und.	Tipo	pi	Di*pi
750,00	kg/m ³	arcillas	0,0000	0,00
1100,00	kg/m ³	limos	0,0349	38,39
1800,00	kg/m ³	arenas	0,7511	1351,98
2100,00	kg/m ³	gravas	0,2140	449,40
$\Sigma D_i * p_i$				1839,77 kg/m ³

El volumen en cada módulo del desarenador de una tolva a tope es de aproximadamente 151,59 m³. Según la retención media calculada anteriormente, el sedimento atrapado por el desarenador tendrá una composición de 0,00% arcillas, 3,49% limos, 75,11% arenas y 21,4% gravas (Tabla 2-4). Teniendo en cuenta las características del material presentadas anteriormente y considerando una tolva totalmente llena, se obtuvieron los volúmenes y pesos de arcillas, limos, arenas y gravas para una tolva de un módulo del desarenador mostrados en la Tabla 2-6.

Tabla 2-6. Cálculo volúmenes y pesos de las fracciones de sedimento atrapadas en una tolva del desarenador

Valor	Unidades/detalles	Notas/operación
1839,77	kg/m ³ (masa específica seca mezcla material tolva) (A)	Tabla 2-5
151,59	m ³ (volumen de una tolva) (B)	Tabla 2-2
193,62	Ton. (peso seco del sedimento en la tolva) (C)	A*F/1000
0,31	Porosidad de la mezcla de sedimento en tolva (D)	1-(A/2650)
46,35	m ³ (volumen de vacíos en la tolva) (E)	D*B
105,24	m ³ (volumen de sedimento en la tolva) (F)	B-E
0,00	m ³ (arcillas en una tolva) (G)	F*(% arcillas Tabla 2-4)
3,67	m ³ (limos en una tolva) (H)	F*(% limos Tabla 2-4)
79,05	m ³ (arenas en una tolva) (I)	F*(% arenas Tabla 2-4)
22,52	m ³ (gravas en una tolva) (J)	F*(% gravas Tabla 2-4)
0,00	Ton. (arcillas en una tolva)	G*(Di arcillas Tabla 2-5)
4,04	Ton. (limos en una tolva)	H*(Di limos Tabla 2-5)
142,28	Ton. (arenas en una tolva)	I*(Di arenas Tabla 2-5)
47,30	Ton. (gravas en una tolva)	J*(Di gravas Tabla 2-5)

2.2 Volumen de los sedimentos atrapados por el pondaje y descarga de la compuerta de fondo

La metodología propuesta para el manejo de sedimentos durante la operación corresponde a la ejecución periódica de maniobras de flushing o remoción hidráulica de sedimentos, realizando aperturas de la compuerta radial de 4 m de alto y 4 m de ancho, que controla la descarga de fondo del pondaje, ubicada hacia la margen izquierda del azud, frente a las rejas laterales de captación. Una rápida reducción del nivel del agua mediante la apertura progresiva de la compuerta radial crea un flujo cercano al del río a lo largo del pondaje, que permite socavar y transportar hacia aguas abajo parte del sedimento previamente depositado, y que posibilita la liberación del área contigua a la estructura de toma.

El volumen de material depositado en el pondaje no se reduce significativamente, dado que esta maniobra permite únicamente la formación de una brecha de lavado que se estabiliza una vez el canal alcanza la pendiente de equilibrio (ejemplo de formación de brecha PCH Morro Azul, Figura 2-2).

La relación entre la capacidad del pondaje y las afluencias medias de sedimentos anuales, definen la necesidad de realizar un manejo de los sedimentos en el proyecto

que implica una apertura periódica de las compuertas radiales. La consigna de operación consiste en disponer de una zona libre de sedimentación en el área contigua a las obras de toma.

A partir del momento en que, para una condición hidrológica normal, el sedimento acumulado logre igualar la capacidad de almacenamiento del pondaje, será necesario realizar las primeras aperturas de la compuerta radial.



Figura 2-2. Colmatación pondaje PCH Morro Azul. Fuente: (ENGEO Engenharia e Geologia LTDA, 2016; Hidrológica Ingeniería, 2017)

Con el fin de evaluar la estrategia de apertura frente a las concentraciones de sedimento hacia aguas abajo de la captación, se consideró a continuación el escenario donde se ha alcanzado la colmatación del pondaje y la operación se realiza en épocas de crecida o caudales altos. Las consideraciones tenidas en cuenta para calcular el volumen de pondaje, características de formación de la brecha como la estimación de concentraciones de presenta a continuación.

2.2.1 Colmatación del pondaje

A largo plazo, después de una intervención en el cauce incluso los sedimentos del lecho más erosivos tienden a estabilizarse en algún gradiente mayor a 0 (Tulu, 1999). Este se denomina pendiente compensación, la cual es el gradiente entre la parte superior de la presa de retención y la zona donde se vuelve a conservar la pendiente natural del cauce. Adicionalmente se debe tener en cuenta que la rejilla de captación tiene una cota menor a la cresta del azud y por ende esta ejerce un control en la forma del pondaje.

Se considera que el material forma un ángulo de 31° con la horizontal en la zona de la rejilla de captación, teniendo en cuenta que el material predominante son arena media a gruesa (Julien, 2010). Características similares a las descritas anteriormente se presentan en otras PCH del país como es el caso del proyecto Morro Azul, en la Figura 2-2 se presenta la colmatación del pondaje de dicho proyecto.

Teniendo en cuenta la pendiente del lecho aguas arriba de la captación, se estimó la pendiente de compensación mediante diferentes métodos (según Suárez, 1993), obteniendo en promedio una pendiente de 0,04. Los resultados se presentan en la Tabla 2-7.

Tabla 2-7. Cálculo de pendiente de compensación usando diferentes metodologías

Formula	Sc
Formula Romiti	0,038
Japones	0,036
Italiana	0,041
USA	0,044
Recomendada	0,041
Promedio	0,040

De manera esquemática se presenta el volumen de pondaje en condición colmatada en la Figura 2-3, teniendo en cuenta la topografía disponible se estimó un volumen total de 5855 m³. Lo anterior se considera conservador, según lo antes mencionado para el caso de la PCH El Popal.

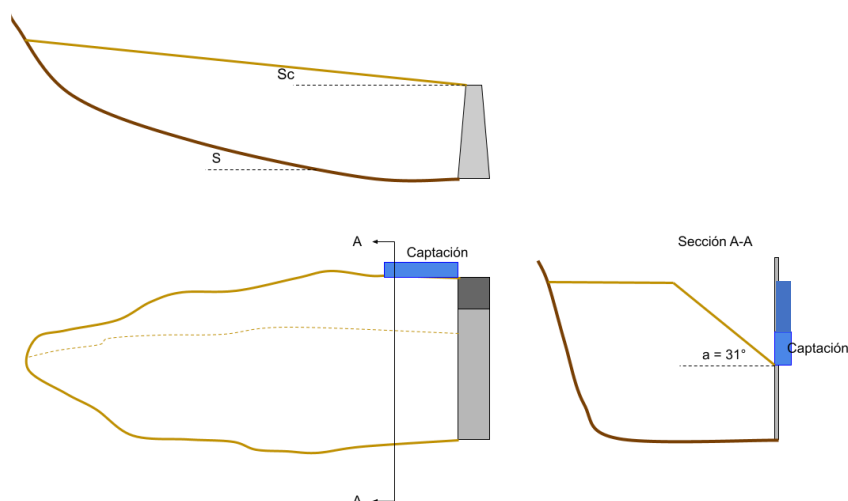


Figura 2-3. Esquema volumen de colmatación de pondaje (sin escala)

2.2.2 Formación de brecha con apertura de compuertas

Teniendo en cuenta la serie de caudal estimada para la zona de captación y las características de la compuerta se evaluó el caudal máximo para que la compuerta trabaje libre con apertura de 100% (es decir no ejerce control hidráulico que lleve a la

entrada en carga del orificio). Se encontró que este caudal es de $63 \text{ m}^3/\text{s}$, mayor al máximo de los caudales medios diarios. Adicionalmente se encontró que la compuerta es capaz de evacuar los caudales máximos diarios ($38 \text{ m}^3/\text{s}$) sin sumergirse con una apertura de 2,2m.

Siendo así, al operar la compuerta 100% abierta no se ejerce control hidráulico que lleve a la entrada en carga del orificio, luego se configura en todos los caudales la condición de flujo libre necesaria para la formación libre de la brecha.

Considerando el ancho de la compuerta de 4m y el ángulo de reposo para un material tipo arena media a gruesa de 31° (Julien, 2010) se estimó el volumen total de la brecha, de manera esquemática se presenta en la Figura 2-4, con un volumen calculado es de 1688.7 m^3 .

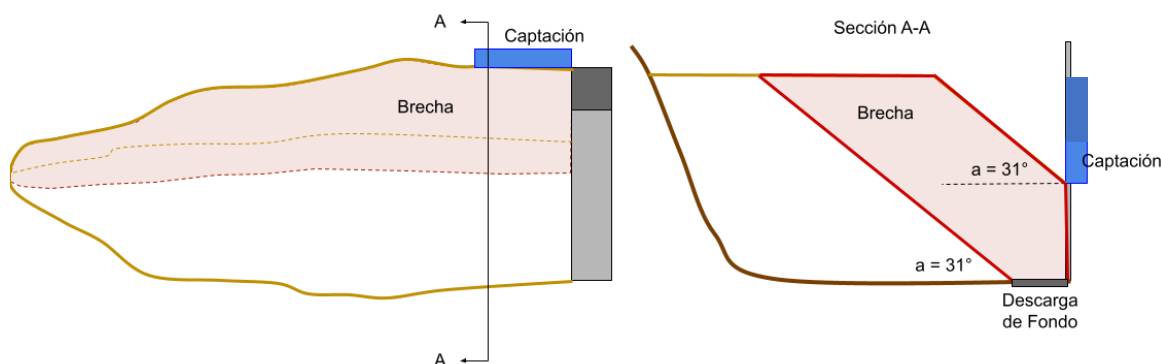


Figura 2-4. Esquema volumen de brecha (no se tienen en cuenta escala)

Para el cálculo del volumen y peso de la mezcla de sedimento involucrado en el proceso de remoción en el azud con la formación de la brecha al realizar la apertura de la descarga de fondo, se consideró la misma granulometría media del sedimento transportado por el río empleada en el caso del desarenador (Figura 2-1 y Tabla 2-1), al igual que el peso específico de la mezcla para el depósito de material alcanzado con la misma granulometría para una condición sin compactación (Tabla 2-5). Así, se calculó según la Tabla 2-8 un peso total seco del sedimento removido con la formación de la brecha de 2156,92 Ton ($1172,38 \text{ m}^3$ de sedimento seco).

En el caso del sedimento potencialmente atrapado en la zona del material removido con la formación de la brecha, se consideró que ahí se tendrían preferencialmente gravas (carga de fondo), mientras que una proporción mayor de la carga en suspensión (arenas) pasaría por las rejillas de la captación. Para lo anterior, y empleando el método antes expuesto en el caso del desarenador para el cálculo de la eficiencia de atrapamiento (Mery M., 2013), y para un tamaño de partícula objetivo del proceso de sedimentación de 4 mm (grava fina), se calculó que en la zona de la brecha se tendría una eficiencia de atrapamiento del orden del 85% del material total

(ver Anexo 2-2), lo que implica que antes de colmatarse la zona de la brecha, por la captación estaría ingresando directamente el 15% de la carga total del sedimento asociada al caudal captado.

Tabla 2-8. Cálculo volúmenes y pesos de las fracciones de sedimento de la brecha involucrada en la apertura de la compuerta de la descarga de fondo

Valor	Unidades/detalles	Notas/operación
1839,77	kg/m ³ (masa específica seca mezcla del material) (A)	Tabla 2-5
1688,70	m ³ (volumen de la brecha) (B)	Tabla 2-2
2156,92	Ton. (peso seco del sedimento en la brecha) (C)	A*F/1000
0,31	Porosidad de la mezcla de sedimento en la brecha (D)	1-(A/2650)
516,32	m ³ (volumen de vacíos en la brecha) (E)	D*B
1172,38	m ³ (volumen de sedimento en la brecha) (F)	B-E
0,00	m ³ (arcillas en la brecha) (G)	F*(% arcillas Tabla 2-4)
40,92	m ³ (limos en la brecha) (H)	F*(% limos Tabla 2-4)
880,58	m ³ (arenas en la brecha) (I)	F*(% arenas Tabla 2-4)
250,89	m ³ (gravas en la brecha) (J)	F*(% gravas Tabla 2-4)
0,00	Ton. (arcillas en la brecha)	G*(Di arcillas Tabla 2-5)
45,01	Ton. (limos en la brecha)	H*(Di limos Tabla 2-5)
1585,04	Ton. (arenas en la brecha)	I*(Di arenas Tabla 2-5)
526,87	Ton. (gravas en la brecha)	J*(Di gravas Tabla 2-5)

2.2.3 Capacidad de descarga de sedimento con la compuerta de fondo de azud

Empleando como base el método del cálculo hidráulico de una compuerta descargando libremente presentado en Srivastava (2008) (ecuaciones 4.27 y 4.29 de la referencia bibliográfica), para el rango de caudales medios diarios presente a la altura de la captación en el período 1983-2016 (Tabla 2-9), y para el volumen máximo de la brecha y el peso específico de la mezcla de sedimento, y considerando que la remoción del material en la brecha se realizaría en no más de un día, se estimaron las concentraciones pico diarias de sedimento total para diferentes caudales mostradas en la Figura 2-5.

Tabla 2-9. Caudales característicos hasta captación para diferentes fases del ENSO.

Caudal (m3/s)	Niña	Neutro	Niño
min	6,6	3,98	3,23
medio	15,08	15,35	13,93
max	34,63	37,5	34,59

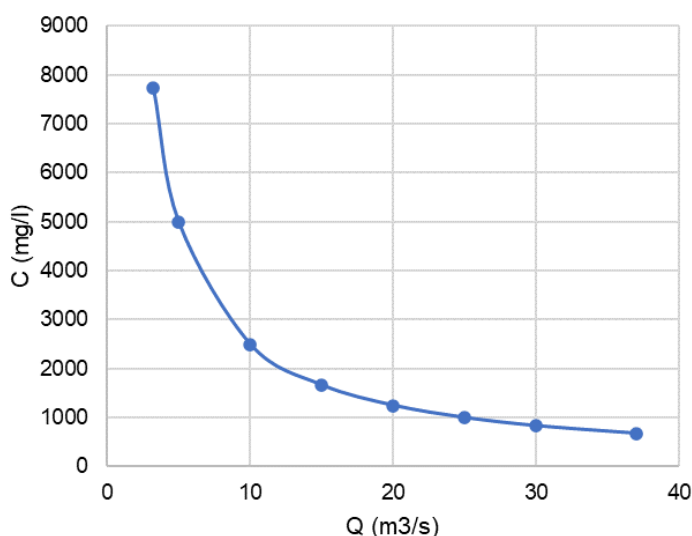


Figura 2-5. Concentraciones máximas diarias estimadas teniendo en cuenta caudales típicos en meses húmedos.

Como se mencionó previamente, en el tramo en estudio del río Cocorná no se tienen precedentes de aforos de sedimento sistemáticos que permitan valorar las concentraciones extremas de sedimento que se dan cuando el río se encuentra en condición de creciente, e igualmente, en las campañas de campo realizadas no se capturó al río en condición de transporte de sedimento. Por lo anterior, no es factible para esta consultoría comparar las concentraciones de la Figura 2-5 con las máximas históricas en el cauce y, para manejar esto, y una vez se encuentre construida la infraestructura de la captación de Cocorná III, deberán realizarse aforos sistemáticos de la carga de sedimento del río con preferencia en condición de creciente, apoyándose en la seguridad que proporciona la obra de captación para este tipo de labores.

2.3 Implementación de un modelo local de transporte de sedimento en el tramo comprendido entre la captación de PCH Cocorná III y la captación de PCH Pantágoras

2.3.1 Métodos

Se implementó un modelo de transporte local de sedimento basado en el esquema propuesto en Montoya (2008), Figura 2-6. Así, el tramo del río Cocorná comprendido entre la captación de PCH Cocorná III y la captación de la PCH Pantágoras se dividió en 5 tramos característicos en función de la pendiente media del lecho (Tabla 2-10), de las afluencias y difluencias de caudal, y según las estructuras principales de las centrales hidroeléctricas. La caracterización hidráulica de cada uno de los tramos se realizó en función de las curvas características cuyos factores y exponentes se presentan en la Tabla 1-12, con las cuales se calcularon variables hidráulicas medias para cada tramo (velocidad del flujo, profundidad hidráulica, ancho de la lámina del agua, radio hidráulico) en función del caudal.

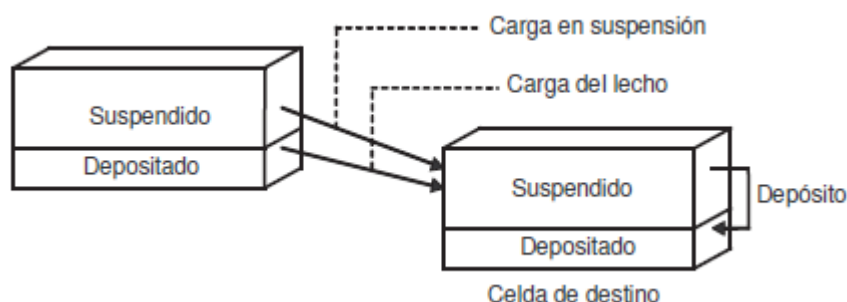


Figura 2-6. Esquema de procesos sedimentológicos en canal (tomado de Montoya, 2008)

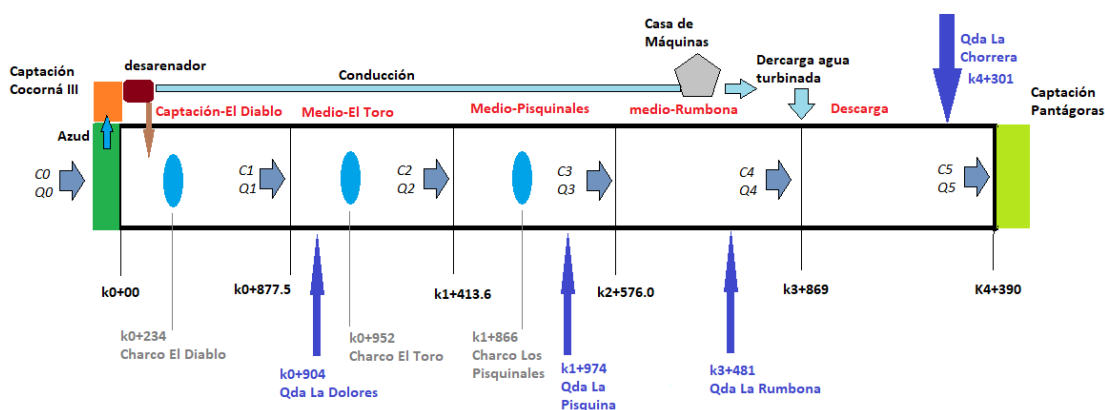


Figura 2-7. Esquema modelo local de transporte de sedimento implementado

Tabla 2-10. Pendiente y longitud de los 5 subtramos del modelo de transporte de sedimento

Tramo	S (m/m)	Longitud - Δx (m)
T1 (k0+00 a k0+877,5)	0,07	877,50
T2 (k0+877,5 a k1+413,6)	0,06	536,10
T3 (k1+413,6 a k2+576)	0,06	1162,40
T4 (k2+576 a k3+869)	0,05	1293,00
T5 (k3+869 a k4+390)	0,03	521,00

En el modelo de cálculo de la capacidad de transporte, el sedimento se dividió en la fracción de gravas (tamaños mayores a los 2 mm) y en la fracción de arenas (tamaños menores a los 2 mm). Para las gravas la capacidad potencial de transporte de sedimento se calculó empleando la ecuación de Smart presentada en el año de 1984, según las expresiones expuestas en Wohl (2010), ya que dicha expresión según la autora fue desarrollada para ríos de montaña con morfometría de Saltos y Pozos, y en un rango de pendientes del lecho entre 0,04% y el 20%, y para un rango de tamaño representativo de la mezcla de sedimento $D_m=2,0$ mm a 10,5 mm, donde ambos rangos acogen las condiciones del tramo del río en estudio. Para la aplicación del método de Smart se empleó la propuesta de Yager et al. (2007), válida para el cálculo de la carga de fondo en canales de alta pendiente con presencia de bolos de roca (como es el caso en estudio), donde la tasa de transporte calculada se escala por la proporción del lecho total (A_t) que sería ocupado por el sedimento en movimiento (A_m), donde en el caso del río Cocorná, se estimó a partir de inspección visual, que debido a la presencia de los bloques métricos de roca dicha proporción sería del orden del 40% ($A_m/A_t=0,40$).

Smart:

$$\phi = 4 \left[\left(\frac{D_{90}}{D_{30}} \right)^{0.2} S^{0.6} C \tau_*^{0.5} (\tau_* - \tau_c) \right] \left[\frac{A_m}{A_t} \right]$$

$$\phi = \frac{q_b}{[g(s-1)D_m^3]^{0.5}}$$

$$C = \frac{V}{(ghS)^{0.5}}$$

$$\tau_* = \frac{R_h S}{1.65 D_m}$$

Donde D_{90} y D_{30} (mm) son tamaños característicos del material de lecho transportado, D_m el tamaño medio del sedimento (mm), S (m/m) es la pendiente media del cauce, g

la aceleración de la gravedad ($9,81 \text{ m/s}^2$), $s=2,65$; h la profundidad hidráulica (m), R_h el radio hidráulico (m), τ_* es el parámetro adimensional de Shields, τ_c es el parámetro de movilidad del sedimento, V la velocidad media del flujo (m/s), y q_b es la descarga volumétrica de sedimento (carga de lecho) por metro de ancho de canal.

En el caso de la carga de fondo también se realizaron cálculos con la ecuación de Peter y Muller (según Maza y Flórez, 1996), y con la ecuación de Fernández Luque y Van Beek (según Yager et al., 2007), pero sus resultados no fueron finalmente considerados ya que entre las tres ecuaciones calculadas, la de Peter y Muller mostró los menores valores y la de Luque y Van Beek los mayores valores de tasas de transporte, ubicándose Smart en la zona media de la banda de resultados, y además, esta última fue la que mejor se ajustó en términos de sus límites de aplicación a las condiciones específicas del río Cocorná. También para el caso de la expresión de Smart, se usó un valor crítico del esfuerzo cortante adimensional (de Shields) de $\tau_c = 0,058$; atendiendo a la sugerencia dada por Yager et al. (2007) y García (2008) para el cálculo en cauces como el del río Cocorná.

La tasa potencial de transporte de sedimento de las arenas y limos se calculó empleando la ecuación de Engelund y Hansen desarrollada en el año de 1967, según las ecuaciones presentadas en Maza y Flórez (1996). Este método calcula la capacidad de transporte total para arenas, y ha sido ampliamente recomendado por su adecuado desempeño en la estimación de las tasas de transporte para arenas según exponen autores como Montoya (2008) y Wu et al. (2004). Engelund y Hansen es aplicable para diámetros de sedimento D_{50} entre 0.0625 mm a 2 mm y velocidades medias del agua entre los 0,20 m/s a 1,93 m/s (FLEISNER, 2013, y U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, 2006), condiciones presentes en el tramo del río estudiado.

Engelund y Hansen:

$$q_{BT} = \frac{0.05 * 2650V^2(1000R_hS)^{1.5}1000^{0.5}}{g^{0.5}1650^2D_{50}}$$

Donde D_{50} (mm) es tamaño característico del material del lecho transportado tipo arena, y q_{BT} es el transporte de fondo (carga total) por unidad de ancho del canal en kgf/s.m.

El modelo local de transporte de sedimento en su configuración mostrada en la Figura 2-7, fue usado en una escala temporal diaria ($\Delta t=1$ día). Los caudales en tránsito fueron calculados utilizando una regla normal de operación propia para este tipo de centrales a filo de agua, así:

- Caudal máximo turbinado= $Q_{\text{max_tur}}=10,6 \text{ m}^3/\text{s}$ (2 unidades de $5,3 \text{ m}^3/\text{s}$ cada una), la central no puede turbinar más que esto.
- Caudal mínimo turbinado=si funciona 1 sola unidad Pelton= 20% del caudal de diseño de la unidad= $Q_{\text{min_tur}}=0,2*5,3=1,06 \text{ m}^3/\text{s}$.

- Qnatural es el caudal que el río trae aguas arriba de la captación.
- Se calcula el caudal disponible para generar teniendo en cuenta que siempre debe garantizarse mínimo el caudal ambiental (un valor propuesto para cada mes del año), si no se garantiza no se puede generar, $Q_{disp} = Q_{natural} - Q_{ecológico\ del\ mes\ i}$.
- Si $Q_{disp} > Q_{min_tur}$ puedo turbinar, y pueden darse las siguientes opciones:
 - Si $Q_{disp} > Q_{max_tur}$ entonces el caudal turbinado $Q_{tur} = Q_{max_tur}$, y me queda un caudal remanente aguas abajo de captación $Q_{remanente} = (Q_{disp} - Q_{max_tur}) + Q_{ecológico_mes_i}$.
- Si $Q_{disp} < Q_{max_tur}$ entonces el caudal turbinado $Q_{tur} = Q_{disp}$, y el caudal remanente sería el caudal ecológico de cada mes i, $Q_{remanente} = Q_{ecológico_mes_i}$.
- Si $Q_{disp} < Q_{min_tur}$ no puedo turbinar y el caudal remanente será $Q_{remanente} = Q_{disp} + Q_{ecológico_mes_i}$.
- Si $Q_{natural} < Q_{ecológico_mes_i}$ no puedo generar y el caudal remanente aguas abajo de la captación $Q_{remanente} = Q_{natural}$

Hacia aguas abajo de la captación de Cocorná III, se fueron agregando los caudales medios multianuales de los principales afluentes por ambas márgenes, según los valores presentados en la Tabla 2-11. Igualmente, los caudales ambientales considerados son los expuestos en la Tabla 2-12, siendo su cálculo ampliamente sustentado en el apartado de hidrología del EIA.

Tabla 2-11. Caudales medios anuales principales afluentes entre el sitio de captación de PCH Cocorná III y PCH Pantágoras

Afluente	Qmedio (m³/s)	Abscisa (m)	Tramo
Qda.La Chorrera	3,82	4301	T5
Qda.La Rumbona	0,14	3463	T4
Q_SN_7	0,05	3121	T4
Q_SN_6	0,03	2326	T3
Qda.La Pisquina	0,32	2153	T3
Q_SN_5	0,01	1834	T3
Q_SN_4	0,04	1526	T3
Q_SN_3	0,04	1185	T2
Qda.Dolores	0,29	1073	T2
Q_SN_2	0,01	846	T1

Tabla 2-12. Caudales ambientales a la altura del sitio de captación de la PCH Cocorná III

Mes	Caudal Ambiental (Grecco) (m3/s)
Enero	2,4
Febrero	2,4
Marzo	2,6
Abril	3,4
Mayo	4,5
Junio	3,7
Julio	2,3
Agosto	2,2
Septiembre	3,1
Octubre	4,3
Noviembre	4,4
Diciembre	3,9

El balance de sedimento se realizó empleando el concepto de reposo de sedimentos según lo expuesto en Montoya (2008), donde en cada tramo (Figura 2-6) se dan los procesos de transporte y depósito de sedimentos, de acuerdo con la capacidad de transporte de sedimentos del caudal que pasa por cada celda de cálculo. Los sedimentos transportados o erosionados se trasladan como carga en suspensión o de fondo a la celda de destino, donde posteriormente se depositan o transportan según la velocidad del agua, su profundidad y la velocidad de sedimentación de cada fracción de tamaño de sedimento o diámetro característico considerado. Si en un paso de tiempo se presenta depósito de sedimento, este se almacenará en la celda o tramo de cálculo hasta el paso de tiempo siguiente donde podrá ser transportado hasta que la capacidad de transporte exceda el sedimento depositado y transportado en el tramo.

En el proceso de cálculo se estima la capacidad de transporte de las fracciones de gravas y de arenas, y si la capacidad de transporte de sedimento es menor a la cantidad de sedimento en tránsito se presentará depósito, y en caso contrario habrá erosión. Como limitador temporal de la depositación se usó el coeficiente de eficiencia de depósito C_d (US Army Corps of Engineers, 2020; Montoya, 2008), donde ω_i es la velocidad de caída para una partícula de diámetro i , Δt el paso de tiempo, y D_e la profundidad efectiva de la columna de agua donde el sedimento de tamaño i será transportado.

$$C_d = \frac{\omega_i * \Delta t}{D_e}$$

La velocidad de caída de las partículas de sedimento se calculó con la ecuación de Rubey según Julien (2010), empleando una temperatura media del agua de 19,6°C, valor promedio calculado de los monitoreos de calidad del agua realizados en el río Cocorná en los años 2015 y 2018. El modo de transporte se estimó a partir de la relación entre la velocidad cortante (u_*) y la velocidad de caída del sedimento (w_i), según la escala de valoración propuesta en Julien (2010) (Tabla 2-13).

Tabla 2-13. Valoración del modo del proceso de transporte (tomado de Julien, 2010)

u_*/w	Ro	Mode of transport
< 0.2	> 12.5	no motion
0.2 to 0.5	5 to 12.5	bedload
0.5 to 2	1.25 to 5	mixed load
2 to 5	0.5 to 1.25	suspended load
> 5	< 0.5	suspended load

Con el caudal de los afluentes mencionados en la Tabla 2-11 también se consideró el aporte de sedimento correspondiente, calculado según la Figura 1-12 (curva regional de producción de sedimento en suspensión) y los coeficientes de partición de la carga total estimados en el numeral 1.4.

En el sitio de captación se realizó un balance de sedimento en cada paso de tiempo (1 día), donde se partió de una condición de pondaje donde el volumen de sedimento de la brecha que se conforma con la apertura de la compuerta de la descarga de fondo del azud estaba vacío, y se llenaba de sedimento depositado según las afluencias a la captación atrapando sedimento con una eficacia del 85% hasta colmar el máximo volumen considerado (según lo expuesto en el numeral 2.2.2), mientras que el 15% del sedimento restante pasa hacia el desarenador colmando la tolva de los dos módulos de sedimento. Cuando se colmate ya sea la zona de la brecha o las tolvas del desarenador, se abrirá la descarga de fondo evacuando la totalidad del sedimento depositado en la brecha, y/o se purgarán las tolvas de los desarenadores a través de sus compuertas de fondo, trasladando dicho sedimento al interior del arranque del tramo 1 de cálculo, donde dicho sedimento inicia su tránsito de hacia aguas abajo de la captación.

Con la anterior operación y balances, se estimó el número de veces en que debe purgarse el desarenador y las veces en que debe abrirse la compuerta de la descarga de fondo. Igualmente, en el balance de sedimento en la captación de Cocorná III se tuvo en cuenta la carga de sedimento asociado a los flujos de exceso que transitarán sobre la cresta del azud.

2.3.2 Resultados

El análisis se realizó al interior del período 1983-2016. Dado que la serie de caudales medios diarios a la altura de la captación de PCH Cocorná III en este lapso presenta datos faltantes en diferentes períodos, el cálculo de transporte de sedimentos de desarrolló en los siguientes 8 sub-períodos de tiempo donde fue posible establecer

series completas, rellenado datos diarios faltantes a partir de estrategias simples como el promedio entre valores de días antecedentes y precedentes al dato diario faltante:

01/abril/1983 – 31/dic/1987

01/ene/1989 – 31/oct/1993

02/jun/1994 – 31/dic/1999

01/may/2001 – 31/mar/2003

01/jul/2005 – 30/jun/2009

01/ene/2010 – 30/jun/2012

01/oct/2012 – 31/may/2014

01/oct/2014 – 31/dic/2016

El estudio de los períodos de tiempo anteriores permitió para los años con meses completos (de enero a diciembre), establecer el número de eventos de purgas de ambas tolvas del desarenador al interior de distintos años (Figura 2-8), donde el mínimo número de eventos de purga fue de 7 al año y el máximo valor de 13 purgas al año. Igualmente, al interior del ciclo anual, se estableció que el máximo de eventos de purga mensual sería alrededor de dos y de una purga en los meses de febrero-marzo y agosto-septiembre (Figura 2-9). Sobre los resultados anteriores, debe considerarse que los mismos obedecieron a un régimen de caudales medios diarios, y frente al paso de una creciente podrían verse afectados si la misma se permite ingrese por captación hacia los desarenadores.

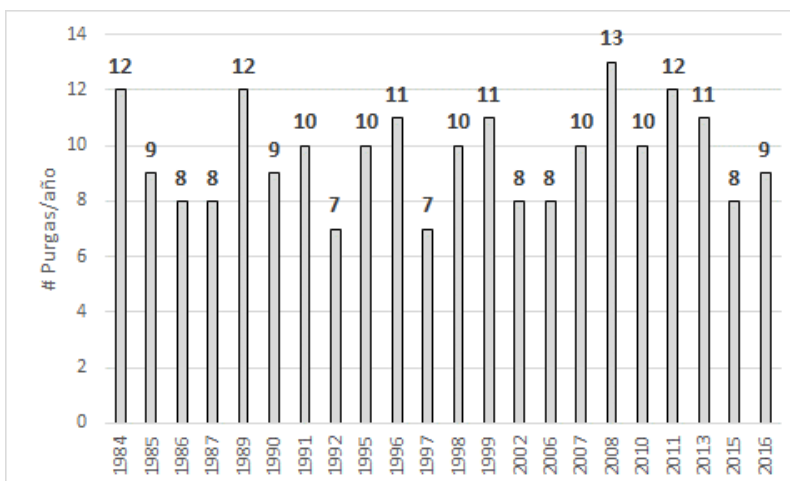


Figura 2-8. Número de purgas de las dos tolvas del desarenador en los años analizados con meses completos de datos

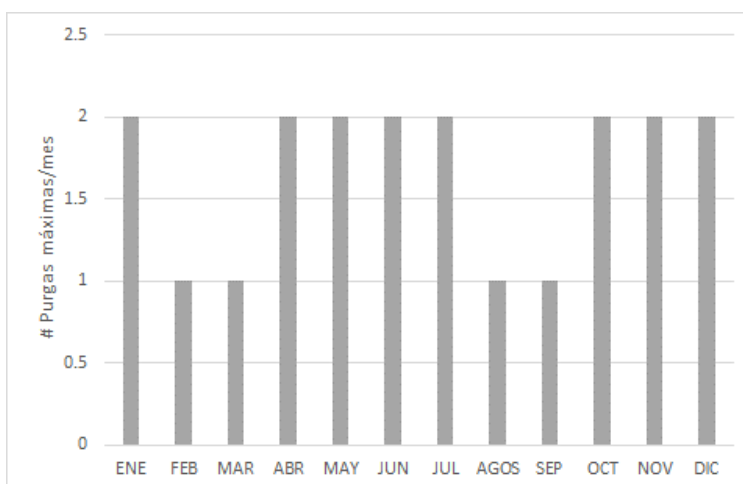


Figura 2-9. Número de purgas máximas de las dos tolvas del desarenador en un año

En el caso del manejo de sedimentos en el azud (y de forma igual a como se hizo con las tolvas del desarenador), el número de aperturas de la compuerta de fondo se calculó a partir de los caudales medios diarios y en los años con meses completos, mostrando un número de apertura total de compuerta por año entre 7 y 13 (Figura 2-10), donde la maniobra de apertura tiende a realizarse en mayor número en los meses de mayo-junio y septiembre-noviembre (Figura 2-11).

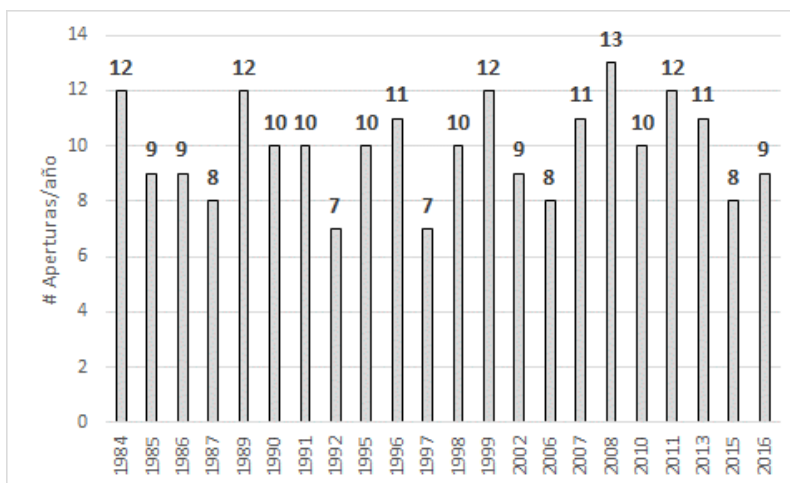


Figura 2-10. Número de aperturas de la compuerta de fondo del azud en los años analizados con meses completos de datos

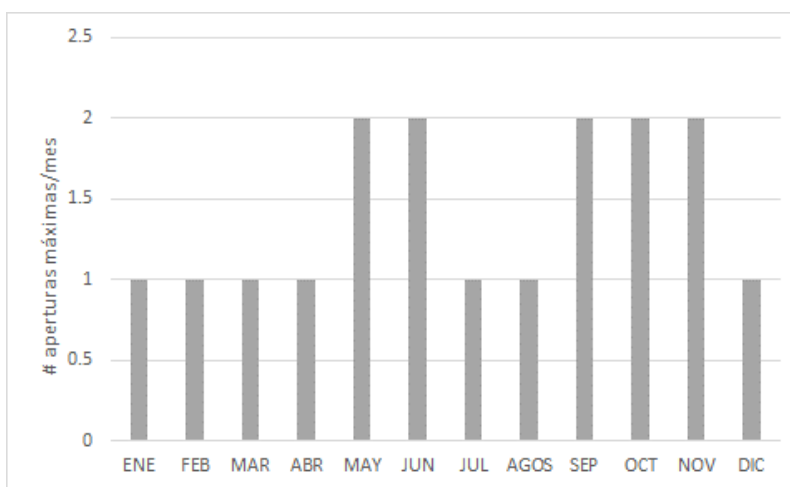


Figura 2-11. Número de aperturas de la compuerta de fondo del azud en un año

Los anteriores resultados parten de asumir premisas de manejo de la central hidroeléctrica, como el mantener en proceso constante de limpieza la zona de la brecha asociada a la compuerta de fondo del azud, buscando con ello capturar el material más grueso para que no llegue a la reja de captación, y a su vez aliviando el proceso de colmatación de las tolvas del desarenador.

En lo que respecta al balance entre la capacidad de transporte de sedimento y el suministro de sedimento transportado, en todos los casos evaluados se encontró que en la escala temporal de análisis (a nivel medio diario), la capacidad de transporte superó el suministro en todos los periodos de tiempo analizados, incluidas las

maniobras de apertura de la compuerta de fondo del azud y las purgas de las tolvas del desarenador.

Por ejemplo, en la simulación del día 26 de octubre de 2014 el caudal remanente aguas abajo del azud (incluido el caudal ecológico) fue de $7,88 \text{ m}^3/\text{s}$ y tenía una carga de sedimento asociada calculada en 24654 kg/día , y en ese día se realizó la apertura de la compuerta de la descarga de fondo ingresando al tramo uno (inicial de cálculo) $2,1569 \times 10^6 \text{ kg/día}$ de sedimento, y en el mismo día se realizó purga de las tolvas del desarenador adicionando $0,387 \times 10^6 \text{ kg/día}$ de sedimento, siendo lo anterior la condición crítica de operación en cuanto a carga de sedimento ingresada por la captación, pero la capacidad de transporte estimada para las condiciones hidráulicas medias del cauce fue de $28,244 \times 10^6 \text{ kg/día}$ para las arenas y de $29,13 \times 10^6 \text{ kg/día}$ para la carga de fondo (gravas), valores que superan las cargas de sedimento ingresadas desde la operación de la captación y desarenador, por eso la tendencia al transporte de ese sedimento tipo arenas y gravas hacia aguas abajo que presenta el río Cocorná en el tramo en estudio.

Como se mencionó en el numeral 1.3, en el río Cocorná aguas abajo de PCH Cocorná III y en un tramo del río con características morfológicas similares, se encuentra operando desde hace 7 años la PCH Popal, la cual en dicho período de tiempo ha realizado un número no determinado de aperturas de la compuerta de fondo del azud y de purgas de sus desarenadores, que no han generado depósitos de material permanente tipo arenas y gravas asociados al sitio de la captación, validando la evaluación cualitativa que se desprende de los análisis realizados para PCH Cocorná III, frente a que la capacidad de transporte del río incluso con la operación de la central, es suficiente para transitar hacia aguas abajo el sedimento que es temporalmente retenido tanto en el pondaje como en las tolvas del desarenador.

Con el fin de evaluar lo anterior en el tiempo para PCH Cocorná III, y empleando los resultados del modelo local de transporte de sedimento en los 8 sub-períodos de tiempo evaluados, incluida la operación de las estructuras en captación, se comparó el ciclo anual de transporte de sedimento en los escenarios Actual (SIN PROYECTO) y Futuro (CON PROYECTO) en dos tramos específicos, en el tramo 1 de cálculo el cual es el que recibe en su inicio las descargas de sedimento desde las estructuras en captación y no tiene afluentes importantes de caudal, y el tramo 4 por ser el que se ubica previo a la descarga del agua turbinada (Figura 2-7) con lo cual no tiene el incremento en la capacidad de transporte que proporcionaría dicho aporte, y a su vez el sedimento ha tenido que transitar desde tres tramos aguas arriba con lo cual capturaría posibles depósitos temporales de sedimento en ellos.

Como se observa en la Figura 2-12 para las cargas de sedimento en suspensión, de fondo y total, en el tramo 1 el efecto de la operación de la central Cocorná III en el ciclo anual de transporte de sedimento no es significativa, siendo las variaciones identificadas en los meses de marzo, abril y junio asociadas a dos aspectos (y en menor grado en otros meses), el redondeo de decimales en los cálculos programados y, principalmente a los almacenamientos temporales de sedimento en la zona de la brecha asociada a la operación de la compuerta de fondo del azud y a las tolvas del

desarenador, que en la contabilidad del modelo al interior de los días calendario, por pocos días se pasan de un mes al otro al momento de realizar las labores de limpieza de las estructuras.

Al analizar los resultados en el tramo 4 (Figura 2-13), se aprecia una situación igual a la encontrada en el tramo 1, exponiendo, como se mencionó previamente, que en el tramo de caudales reducidos los caudales remanentes tendrían la capacidad de transporte suficiente para movilizar los sedimentos descargados como pulsos desde el pondaje y desde el desarenador, hacia aguas abajo, y al recibir el cauce el caudal turbinado, la capacidad de transporte se incrementará facilitando aún más el tránsito de sedimento hacia aguas abajo de los sitios de obras principales de la PCH Cocorná III. En el Anexo 2.3 se presentan las memorias de cálculo del transporte de sedimento mediante el modelo local implementado en este estudio.

Según lo anterior, es posible conceptualizar, que no se influenciará de forma significativa la cantidad de sedimento que en el tiempo (al interior del ciclo anual) llega naturalmente hoy día al sitio de la futura central hidroeléctrica Pantágoras. Igualmente, los resultados muestran que, en el tránsito del sedimento por el tramo de caudales reducidos, no habría tendencia a generar zonas de depósito de sedimentos permanentes del tipo arenas y gravas.

Los párrafos anteriores han tratado el tema del depósito de sedimentos y las tendencias que al respecto muestran tendría el río Cocorná al operar la central Cocorná III, sin embargo, en lo referente a la Erosión como proceso se requiere un análisis particular.

Como punto de partida se tiene que en la condición Actual (SIN PROYETO) la capacidad de transporte del río Cocorná es mayor que el suministro de sedimento tipo arenas y gravas, sin embargo, el cauce NO presenta signos o tendencias de degradación por erosión, ya que las rocas (bolos) de orden métrico y su disposición en la sección del canal, proporcionan estabilidad al lecho, ya que dichas rocas y las macroformas del lecho que ellas conforman no son movilizadas por los flujos medios y crecientes regulares del río, protegiendo el lecho dándole estabilidad en el tiempo frente a la gran capacidad de transporte que tiene el río pero par sedimentos tipo arenas y gravas.

Cuando se presente la condición futura del cauce CON PROYECTO la situación actual antes descrita no cambiará, esto se evidencia en los resultados hidráulicos asociados al tránsito de sedimento presentado en el Anexo 2.3 en los 8 sub-períodos de tiempo valorados, donde los valores de la velocidad cortante del flujo NO muestran capacidad de movilizar sedimento de mayor tamaño al de bloques pequeños a medios (tamaños <512 mm a 256 mm), ya que las velocidades cortantes no superan los 0,67 m/s (según umbrales del movimiento para sedimento no uniforme propuesto en Julien, 2010, tabla 7.1 de la referencia).

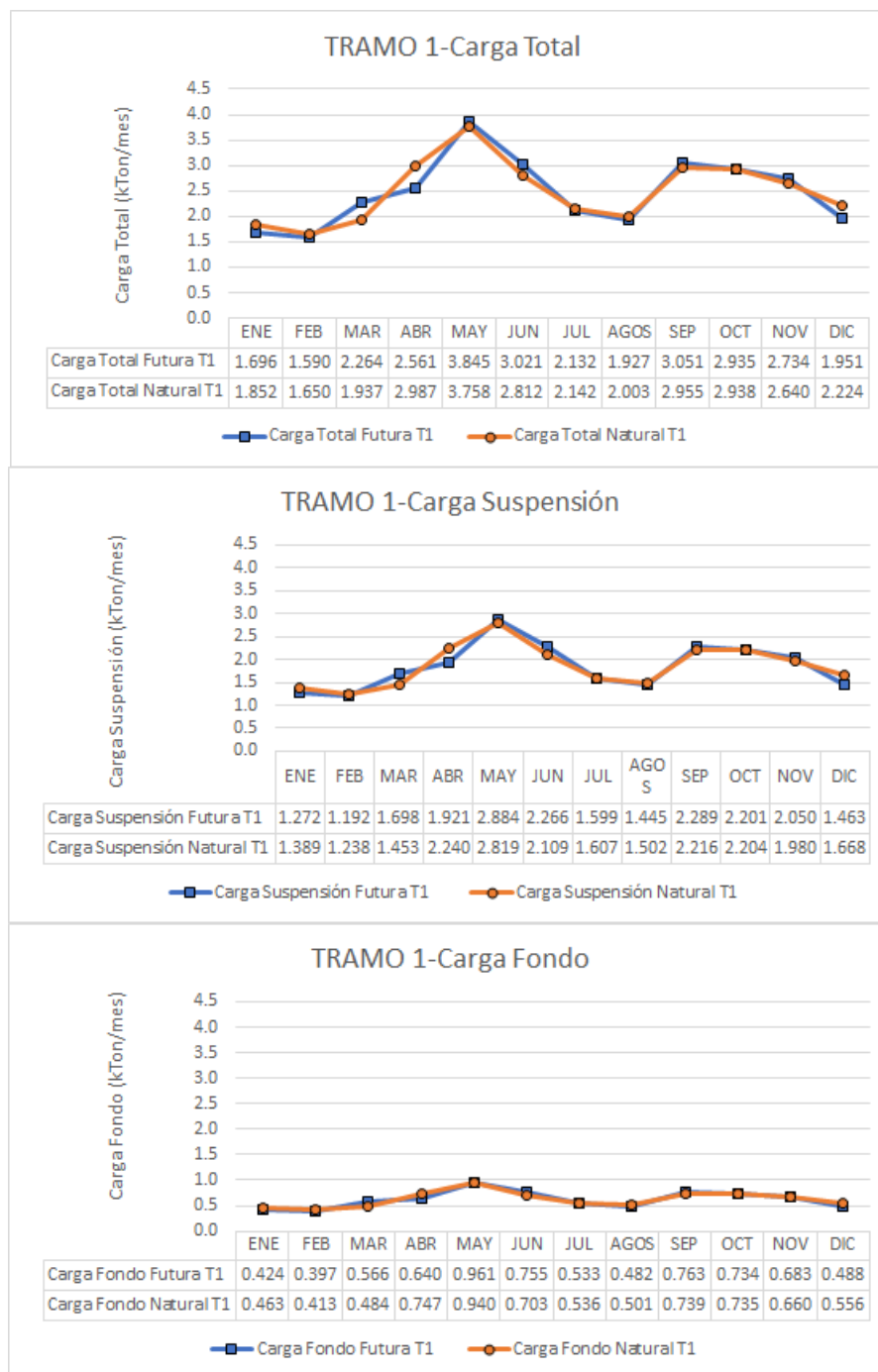


Figura 2-12. Comparación de la carga de sedimento transportada en la condición Natural (SIN PROYECTO) y en la condición FUTURA (con proyecto), tramo 1 de cálculo

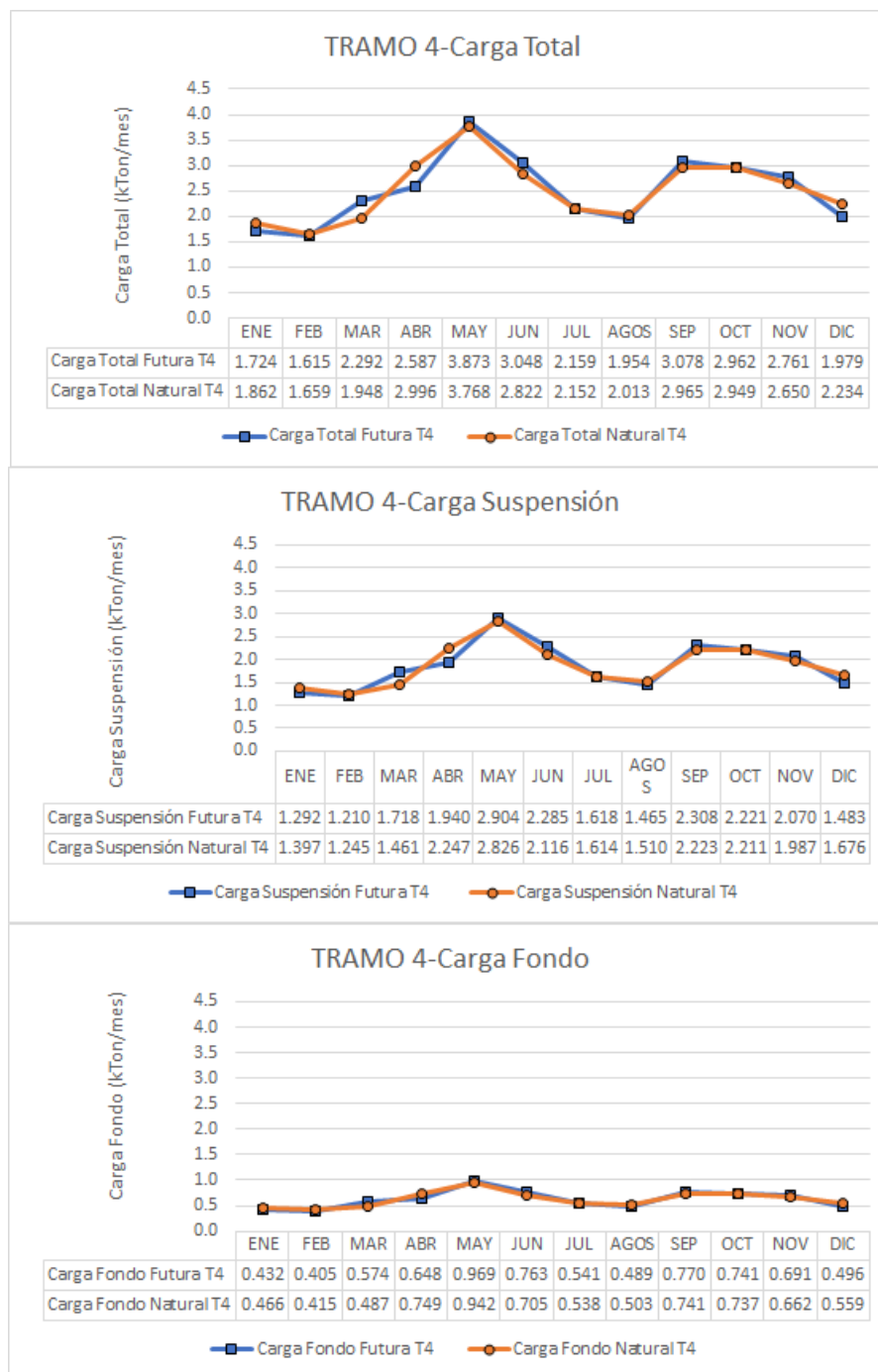


Figura 2-13. Comparación de la carga de sedimento transportada en la condición Natural (SIN PROYECTO) y en la condición Futura (CON PROYECTO), tramo 4 de cálculo

3 CONCLUSIONES

El río Cocorná en el tramo en estudio es un cauce que transporta material del lecho tipo arenas y gravas (en todo su rango) e incluso cantos (según la escala Wentworth de clasificación de tamaños de sedimento), donde el suministro de dicho sedimento es inferior a la capacidad de transporte del cauce, lo que ocasiona actualmente una tendencia al transporte de sedimento y no al depósito.

Los resultados obtenidos con el modelo local mostraron que la gran capacidad de transporte de sedimento que tiene el río Cocorná se mantiene aún en el tramo de caudales reducidos y con la presencia y operación de la PCH Cocorná III, y dicha capacidad es capaz de transitar el sedimento hacia aguas abajo sin tendencia al depósito permanente, conservando la condición actual del cauce, aun cuando se realicen descargas de sedimento puntuales desde el azud o desde el desarenador.

Adicional a lo anterior, se cualificó que el ciclo de transporte de sedimento Actual (natural) no se ve influenciado de forma significativa con la presencia y operación de la PCH Cocorná III, ya que el material no tiene tendencia a depositarse en el tiempo, y por ello no se retiene en el tramo de caudales reducido (entre captación y descarga de agua turbinada), ni tampoco aguas abajo de casa de máquinas, con lo cual se mantiene el tránsito del sedimento hacia aguas abajo, por lo que tampoco se cualifica que en el tema de transporte de sedimentos, Cocorná III impacte negativamente a PCH Pantágoras y al río Cocorná hacia aguas abajo de la central hidroeléctrica.

La condición actual del río Cocorná es de desequilibrio entre el suministro de sedimento y la capacidad de transporte, donde la primera es inferior a la segunda, esto no lo modifica la presencia y operación de PCH Cocorná III y, adicionalmente, tampoco se modifica la estabilidad del cauce frente a la Erosión, ya que los tamaños métricos de rocas presentes mayoritariamente en el lecho no son movilizados por los caudales regulares y las crecientes frecuentes actuales del río, situación que tampoco modifica la central Cocorná III, con lo cual la estabilidad del lecho frente a la erosión tendría una tendencia a mantenerse en el tiempo aún con la presencia de la central.

BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez J. y Flores M. 1996. Transporte de Sedimentos, capítulo 10 del Manul de Ingeniería de Ríos. Instituto de Ingeniería UNAM.531 p.
- Annadale G., Morris G. y Karki P. 2016. Extending the life of Reservoirs, Sustainable sediment management for Dams and Run-of-River Hydropower. World Bank Group. 168 p
- Barnes, H. (1987). *Roughness Characteristics of Natural Channels*. U.S. GEOLOGICAL SURVEY WATER-SUPPLY PAPER 1849.
- Cataño, S., & Vélez, J. I. (2016). Modelo conceptual agregado de transporte de sedimentos para cuencas de montaña en Antioquia-Colombia. *Boletín de Ciencias de La Tierra* (39), 38–48.
- Chow, V. Te. (1959). *Open Channel Hydraulics* .
- Corenblit, D., Tabacchi, E., Steiger, J., & Gurnell, A. M. (2007). Reciprocal interactions and adjustments between fluvial landforms and vegetation dynamics in river corridors: A review of complementary approaches. *Earth-Science Reviews*, 84(1–2), 56–86. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2007.05.004>
- ENGEO Engenharia e Geologia LTDA. (2016). *Obras de Geração de Energia*. <https://www.engeoengenhariaegeologia.com/obras-de-geracao-de-energia>
- Hidrológica Ingeniería. (2017). *CARDER SUSPENDE EL USO DEL RECURSO HÍDRICO A LA PEQUEÑA CENTRAL HIDROELÉCTRICA MORRO AZUL*. <https://www.hidrologicaing.com/single-post/2017/08/29/carder-suspende-el-uso-del-recurso-hidrico-a-la-pequeña-central-hidroeléctrica-morro-azul>
- HMV INGENIEROS. (2012). *Proyecto hidroeléctrico El Molino, ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL, VOLUMEN ii CAPÍTULO 3*.
- Julien, P. Y. (2010). *Erosion and sedimentation*. Cambridge university press.
- Mery M., H. (2013). *Hidráulica Aplicada al Diseño de Obras*. https://www.academia.edu/41977764/Hidráulica_Aplicada_al_Diseño_de_Obras_Horacio_Mery_M
- Montoya J. 2008. Desarrollo de un modelo conceptual de producción, transporte y depósito de sedimentos. Tesis Doctoral Universidad Politécnica de Valencia. Valencia. 267 p.
- Munera, C. (2013). *Análisis comparativo de los modelos HEC-RAS, CHE2D, G-SATRS y BRI-STARS, para la modelación hidráulico-morfológica de un cauce aluvia. Apliación al río Negro (Antioquia)*. Universidad Nacional de COLOMBIA.

- Persichillo, M. G., Bordoni, M., Cavalli, M., Crema, S., & Meisina, C. (2018). The role of human activities on sediment connectivity of shallow landslides. *Catena*, 160, 261–274. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.09.025>
- Posada G., L., & Montoya, L. (2000). Capacidad de transporte de sedimentos en cuencas con información escasa. *Hidrología, XIV Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología*.
- Restrepo J. 2015. El impacto de la deforestación en la erosión de la cuenca del río Magdalena (1980-2010). *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.* 39(151):250-267.
- Restrepo, J.C. y Restrepo J.D. 2005. Efectos naturales y antrópicos en la producción de sedimentos de la cuenca del río Magdalena. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 29 (111):239-254.
- Srivastava R. 2008. Flow through open channels. Oxford University Press.
- Suárez L. 1993. Presas de corrección de torrentes y retención de sedimentos. Ministerio del ambiente y de los recursos naturales renovables. República de Venezuela.
- Tulu, T. (1999). Optimum check dam spacing for gully stabilization. *International Journal of Tropical Agriculture*, 17(1/4), 69–76.
- UNESCO. (2010). *Engineering: Issues Challenges and Opportunities for Development*.
- US Army Corps of Engineers. 2020. HEC RAS Sediment Transport. 356 p.
- U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation. (2006). Erosion and sedimentation manual.
- Wohl E. 2010. Mountain rivers revisited. Water Resources Monograph 19. American GEOPHYSICAL Union. Washington. 576 p.
- Wu B., Molinas A. y Julien P. 2004. Bed-Material Load computations for Nonuniforms Sediments. *Journal of Hydraulic Engineering*. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2004)130:10(1002).
- Wu, W., & Wang, S. S. Y. (2006). Formulas for Sediment Porosity and Settling Velocity. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(8), 858–862. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9429\(2006\)132:8\(858\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9429(2006)132:8(858))
- Yager E., Kirchner j. Y Dietrich W. 2007. Calculating bed load transport in steep boulder bed channels. *Water Resources Research*, Vol.43, W07418

