



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

FACULTAD DE INGENIERÍA  
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

## **“Estado del arte en Manejo de Sedimentos en cuencas Andinas en el Ecuador, caso de estudio: cuenca del Río Paute”**

Trabajo de titulación previo a la  
obtención de título de Ingeniero Civil

**Autores:**

Jorge Eduardo Orbes Guartatanga

CI: 0106516859

Tania Gabriela Peralta Quizhpi

CI: 0105349831

**Director:**

Ing. MSc. Esteban Alonso Pacheco Tobar

CI: 0102114550

Cuenca – Ecuador

2017



## RESUMEN

El manejo sustentable de sedimentos es un problema poco tratado en Ecuador, sin embargo, es de gran importancia al estar relacionado directamente con los recursos hídricos, con el uso y aprovechamiento de los mismos, y con aspectos ambientales y ecológicos. En la última década se han construido un gran número de obras hidroeléctricas en el país, las mismas que empiezan a sentir la carencia de un plan de manejo de sedimentos. Estas obras representan una interrupción en el tránsito de sedimentos de las partes altas a las partes bajas de las cuencas hidrográficas, así como también un problema y costos en la operación y mantenimiento de los proyectos existentes. Soluciones hidráulicas puntuales en los proyectos pueden contribuir a optimizar el manejo y los procesos de lavado de sedimentos, sin embargo, en algunos casos alrededor del mundo las cargas recibidas de sedimentos superan la capacidad de las obras hidráulicas, siendo un tema que evoluciona con el tiempo según los cambios de uso de suelo dentro de la cuenca hidrográfica. El presente estudio contribuye con el entendimiento y difusión del estado del arte en estudios e investigación en manejo de sedimentos en cuencas andinas en el Ecuador. Tomando la cuenca hidrográfica de Paute como caso de estudio, se identifican las necesidades de estudios en esta temática y se establecen recomendaciones que aporten a iniciativas para proponer y ejecutar planes de manejo sustentables para sedimentos en el Ecuador.

Palabras clave: sedimentos, manejo, cuenca hidrográfica



## ABSTRACT

The sustainable management of sediments is an untreated problem in Ecuador, however, it is of great importance to be directly related to water resources, to the use and use of them, and to environmental and ecological aspects. In the last decade, a large number of hydroelectric projects have been built in the country, which are beginning to feel the lack of a sediment management plan. These works represent an interruption in the transit of sediments from the upper parts to the lower parts of the river basins, as well as a problem and costs in the operation and maintenance of the existing projects. Punctual hydraulic solutions in the projects can contribute to optimize the management and the processes of sediment washing, however, in some cases around the world the loads received from sediments exceed the capacity of the hydraulic works, being a theme that evolves over time According to changes in land use within the river basin. This study contributes to the understanding and diffusion of the state of the art in studies and research on sediment management in Andean basins carried out in Ecuador. Taking the Paute basin as a case study, the study needs are identified in this issue and recommendations are set forth to contribute to initiatives to propose and implement sustainable management plans for sediments in Ecuador.

Keywords: sediments, management, basin

**CONTENIDO**

1.	Introducción.....	12
2.	Caracterización de la zona de estudio .....	13
2.1	Inventario de represas.....	13
2.2	Desarrollo hidroeléctrico del río Paute .....	13
2.3	Información relevante de los embalses del Proyecto Paute Integral.....	14
2.3.1	Mazar .....	16
2.3.2	Amaluza .....	18
2.3.3	Cardenillo.....	20
2.4	Casos de estudio.....	21
2.4.1	Procesos de sedimentación en embalses.....	21
2.4.2	Erosión en el cauce.....	22
2.4.3	Variación espacial en el uso del suelo (cambios de la cobertura vegetal).....	24
2.4.4	Variación espacial en la producción de sedimentos .....	25
2.4.5	Gestión de sedimentos .....	26
3.	Análisis y discusión sobre casos de estudio .....	31
4.	Necesidades en el Ecuador en cuanto a manejo sustentable de sedimentos .....	34
5.	Recomendaciones para la implementación de un plan nacional de manejo de sedimentos .....	35
6.	Conclusiones.....	37
7.	Bibliografía .....	39
8.	Anexos .....	42



## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Proyecto Paute Integral.

Figura 2. Vista Longitudinal Embalse Mazar.

Figura 3. Curva Distancia – Volumen de material sedimentado Mazar.

Figura 4. Curva Cota – Volumen de material sedimentado Mazar.

Figura 5. Capacidad del embalse Amaluza.

Figura 6. Curva Distancia – Volumen de material sedimentado Amaluza.

Figura 7. Curva Cota – Volumen de material sedimentado Amaluza.

Figura 8. Reducción de niveles en crecidas.

Figura 9. Esquema de corriente de turbidez.



**INDICE DE TABLAS**

- Tabla 1. Inventario represas de la cuenca del Paute.
- Tabla 2. Centrales hidroeléctricas ubicadas en la cuenca del Paute.
- Tabla 3. Tasa media de sedimentación calculada para Amaluza (1983-2009).
- Tabla 4. Razón de almacenamiento en los embalses Amaluza y Mazar.



**CLÁUSULA DE LICENCIA Y AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL**

Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

JORGE EDUARDO ORBES GUARTATANGA en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Estado del arte en Manejo de Sedimentos en cuencas Andinas en el Ecuador, caso de estudio: cuenca del río Paute", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 22 de noviembre de 2017

Jorge Eduardo Orbes Guartatanga

C.I: 0106516859



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio  
Institucional

---

TANIA GABRIELA PERALTA QUIZHPI en calidad de autora y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Estado del arte en Manejo de Sedimentos en cuencas Andinas en el Ecuador, caso de estudio: cuenca del río Paute", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 22 de noviembre de 2017

---

Tania Gabriela Peralta Quizhpi

C.I.: 0105349831



## CLÁUSULA DE PROPIEDAD INTELECTUAL

### Cláusula de Propiedad Intelectual

JORGE EDUARDO ORBES GUARTATANGA, autor del trabajo de titulación "Estado del arte en Manejo de Sedimentos en cuencas Andinas en el Ecuador, caso de estudio: cuenca del río Paute", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 22 de noviembre de 2017

Jorge Eduardo Orbés Guartatanga

C.I: 0106516859



### Cláusula de Propiedad Intelectual

---

TANIA GABRIELA PERALTA QUIZHPI, autora del trabajo de titulación "Estado del arte en Manejo de Sedimentos en cuencas Andinas en el Ecuador, caso de estudio: cuenca del río Paute", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autora.

Cuenca, 22 de noviembre de 2017

---

Tania Gabriela Peralta Quizhpi

C.I: 0105349831



### **Agradecimientos**

Quiero agradecer primeramente a Dios por haberme guiado, y acompañado a lo largo de mi carrera; a toda mi familia y en especial a mis padres por haberme dado la oportunidad de tener una excelente educación, por la ayuda y apoyo incondicional en cada momento de mi vida.

A mi director de trabajo de titulación y demás docentes por brindarme sus conocimientos y consejos que me supieron guiar para llevar a cabo la carrera.

**Jorge Orbes**

Agradezco ante todo a Dios porque sin él, nada de esto hubiera sido posible. A mis padres y a mi querido hermano, por su apoyo incondicional y su confianza a toda costa. A toda mi familia que nunca me ha dejado sola.

A nuestro director y docentes lectores del trabajo de titulación; a todas las personas que a lo largo de mi carrera han sido soporte para el desarrollo de la misma, ya sea como docentes de la institución o como apoyo de cualquier índole.

**Tania Peralta**

## Estado del Arte en Manejo de Sedimentos en cuencas Andinas en el Ecuador, caso de estudio: cuenca del Río Paute

### 1. INTRODUCCIÓN

Los ríos transportan más agua que sedimentos por lo que se requeriría de un tiempo mucho mayor para llenar un depósito de sedimentos que con el agua, tanto más que la acumulación gradual de sedimentos tiende a ser ignorado (Morris y Fan, 2010). Sin embargo, esto ha hecho que no se le otorgue la debida importancia a la acumulación gradual de sedimentos en proyectos de consultoría y de investigación.

Los embalses representan un componente fundamental para el adecuado aprovechamiento de los recursos hidráulicos, permitiendo modular el suministro de agua a las necesidades de consumo. Sin ellos, un porcentaje muy grande del agua dulce terminaría sin uso en los océanos, mientras que, en el caso de la generación eléctrica, implicaría un uso mucho más intensivo de recursos fósiles (Jiménez *et al.*, 2005). En los Andes del Ecuador, el aumento de la presión demográfica en el campo va de la mano con el uso de la tierra y cambios de cobertura acelerada del suelo. En general se supone que la intensificación del uso de la tierra agrícola y el avance de la frontera agroproductiva en zonas con fuerte pendiente, han aumentado la producción de sedimentos por erosión hídrica y han aumentado en consecuencia la descarga de sedimentos a los ríos (Morris y Fan, 1997). La rápida utilización del suelo y el cambio de la cubierta vegetal han transformado cada vez más el funcionamiento hidrológico de los ecosistemas de los Andes tropicales.

Experimentos controlados de flujo en canales de barrancos escarpados de los Andes tropicales mostraron que la transferencia de flujo superficial y sedimentos hacia el sistema fluvial disminuye altamente con la presencia de vegetación (Molina *et al.*, 2002). La erosión acelerada del suelo es una consecuencia común y ambientalmente destructiva de desarrollo, especialmente en las regiones montañosas. La erosión del suelo es de especial interés en las tierras agrícolas, pero la agricultura es sólo una de las muchas actividades de desarrollo que acelera enormemente los procesos de erosión del suelo. La construcción de carreteras, excavación, actividades extractivas y de la construcción, también pueden causar una severa erosión del suelo (Harden, 2001). Lo cual, sumado a actividades antropológicas, procesos geológicos naturales y eventos de precipitación severos, son los factores más relevantes al momento de tomar decisiones para el manejo de los sedimentos producto de estas actividades. Es por ello que las soluciones de operación y conservación de inversiones en el proyecto, están directamente ligadas con un manejo sustentable de sedimentos a escala de cuenca hidrográfica (Wang y Hu, 2009).

En esencia, el suelo es vulnerable a la erosión en el que se expone al agua o el viento y donde las condiciones de la topografía o el uso humano, pendientes pronunciadas, superficies compactadas, eliminación de vegetación, o tiempo de actividad agrícola, aumentan los efectos del flujo (Harden, 2001). Los cambios en la cobertura de la tierra provocados por el hombre están causando importantes efectos en los servicios ecológicos prestados por los ecosistemas de montaña y el número de estudios de casos del impacto de los seres humanos sobre la erosión del suelo y la producción de sedimentos ha aumentado rápidamente (Vanacker *et al.*, 2014). Es por esto que dichos cambios deben ser tomados en cuenta en proyectos de interés nacional como la producción de energía limpia mediante centrales hidroeléctricas.

En nuestro país, se han realizado muy pocas campañas de monitoreo de la concentración de sedimentos, siendo las mismas en contados lugares del país, lo que tiene como consecuencia que no se hayan implementado correctas medidas de manejo sustentable de este recurso capaces de ajustarse a los requerimientos ambientales y sustentables (Vanacker *et al.*, 2014). Ciertamente en el país se toman acciones para la conservación de los ecosistemas en las cuencas altas y reducción de los procesos de erosión, monitoreo y evaluación de impactos (CELEC EP, 2016) sin embargo no se han planteado soluciones acordes a la problemática en lo que respecta a la cuenca hidrográfica Paute.

El cambio de la matriz energética en el Ecuador constituye uno de los pilares fundamentales en cuanto al desarrollo de energía limpia y renovable, con la finalidad de reducir la dependencia del petróleo que genera grandes cantidades de contaminación en su uso energético a comparación de la generación hidroeléctrica.

Uno de los retos del cambio de la matriz energética es el implementar energía con sostenibilidad ambiental en todos los procesos, lo que aporta al cambio de la matriz productiva (Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos, 2015).

La energía hidroeléctrica es sin duda una de las prioridades en nuestro país debido a que es la principal fuente de generación limpia de electricidad, varios proyectos se han realizado y algunos se encuentran en fases distintas de operación. Uno de ellos es el proyecto Paute Integral que fue concebido hace 40 años y aprovecha el potencial hidroeléctrico de la cuenca del río Paute, constituyéndose así en la cadena de centrales hidroeléctricas que generarán más energía al país.

El Ecuador cuenta con grandes ríos caudalosos que permiten la instalación de centrales hidroeléctricas, algunas de las cuales, van de la mano con represas que permiten captar los volúmenes necesarios de agua. Las represas que forman los embalses y hacen posible la generación eléctrica mediante la retención de agua y su posterior aprovechamiento son varias en todo el país. En las provincias del Azuay, Cañar y Morona Santiago se desarrolla el Complejo Hidroeléctrico Paute Integral, conformado por Mazar, Molino, Sopladora y Cardenillo, cuatro centrales en cascada que aprovecharán el agua de la cuenca del río Paute para generar energía limpia y así contribuir al cambio de la matriz energética del Ecuador. A la fecha las centrales Mazar y Molino se encuentran en operación, Sopladora se inauguró hace poco (2016) y Cardenillo cuenta con estudios definitivos para la licitación de su construcción; la Unidad de Negocio HIDROPAUTE, parte de la Corporación Eléctrica del Ecuador CELEC EP es la encargada de la operación y mantenimiento, construcción y administración del Complejo Hidroeléctrico más importante del Ecuador (CELEC EP, 2016). Se estima que entre Molino, Mazar y Sopladora, Paute Integral produce 1.757 MW y con Cardenillo se alcanzarán 2.353 MW (Informe Presidencia, 2016). Mención especial merece el problema grave de la rápida sedimentación del embalse Amaluza del río Paute, donde se genera más de la mitad de la energía eléctrica del Ecuador (Harden, 1993).

## 2. CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

### 2.1 Inventario de represas

Las tres represas que conforman el proyecto Paute Integral son parte vital del proyecto cuya finalidad es producir energía limpia, siendo Mazar la primera presa que forma a su vez el embalse y sirve a la central hidroeléctrica del mismo nombre. La segunda presa en cadena es Daniel Palacios que da forma al embalse Amaluza y sirve a la central hidroeléctrica Molino, la tercera represa es Cardenillo, que al igual que Mazar, forma el embalse y central hidroeléctrica del mismo nombre.

Nombre	Vertiente	Característica	Central H.	Altura (m)	Embalse (m <sup>3</sup> )	Extensión (km)
Mazar	Río Mazar	Enrocado con hormigón	Mazar	166.00	410 E 6	31
Daniel Palacios	Río Paute	Arco gravedad	Molino	170.00	120 E 6	10
Cardenillo	Río Paute	Arco doble curva	Cardenillo	136.00	12 E 6	-

Tabla 1. Inventario de represas de la cuenca del Paute

### 2.2 Desarrollo hidroeléctrico del río Paute

Cronológicamente las etapas de desarrollo del potencial hidroenergético del río Paute son las siguientes:

- Primera etapa: desarrollo del aprovechamiento Amaluza-Molino que se encuentra en operación desde 1983, con 1100 MW de potencia instalada.



- Segunda etapa: Central Mazar, entró en operación a partir del segundo semestre del 2010, se localiza aguas arriba del embalse Amaluza, donde tiene una potencia instalada de 170 MW.
- Tercera etapa: proyecto Hidroeléctrico Sopladora, se inauguró el 25 de agosto de 2016, se localiza aguas abajo de la central Molino y tiene una potencia instalada de 491.7 MW y una potencia efectiva máxima de 487 MW.
- Cuarta etapa: corresponde al proyecto Cardenillo, cuyos diseños de licitación determinan que tendrá una potencia instalada de 588.31 MW. El proyecto prevé la construcción de una pequeña central de generación en la Presa, de 7.34 MW, que servirá para el paso del caudal ecológico, por lo tanto, el proyecto Cardenillo tendrá una potencia instalada de 595.65 MW.

En conjunto las cuatro centrales contribuirán al sistema eléctrico del Ecuador con 2371.6 MW y una producción anual de energía mayor a los 13000 GWh. (CELEC EP y CONSORCIO PCA, 2013).

CENTRAL	Potencia (MW)	Caudal de diseño (m <sup>3</sup> /s)	Altura neta (m)	Producción anual (GWh)	Presa	Turbinas
Mazar	170	141.10	159	800	Si	2 Francis
Molino	1100	200	600	4900	Si	10 Pelton
Sopladora	487	150	361.90	2800	No	3 Francis
Cardenillo	595.65	180	372	3356	Si	6 Pelton

*Tabla 2. Centrales hidroeléctricas ubicadas en la cuenca del Paute*

### 2.3 Información relevante de los embalses del Proyecto Paute Integral

Se tienen datos sobre sedimentación obtenidos mediante batimetrías únicamente de los embalses Mazar y Amaluza realizados en el año 2013 por parte de CELEC, EP mismos que denotan la cantidad de sedimento depositados en el lecho del embalse. A continuación, se presenta un mapa con el emplazamiento del proyecto Paute Integral:

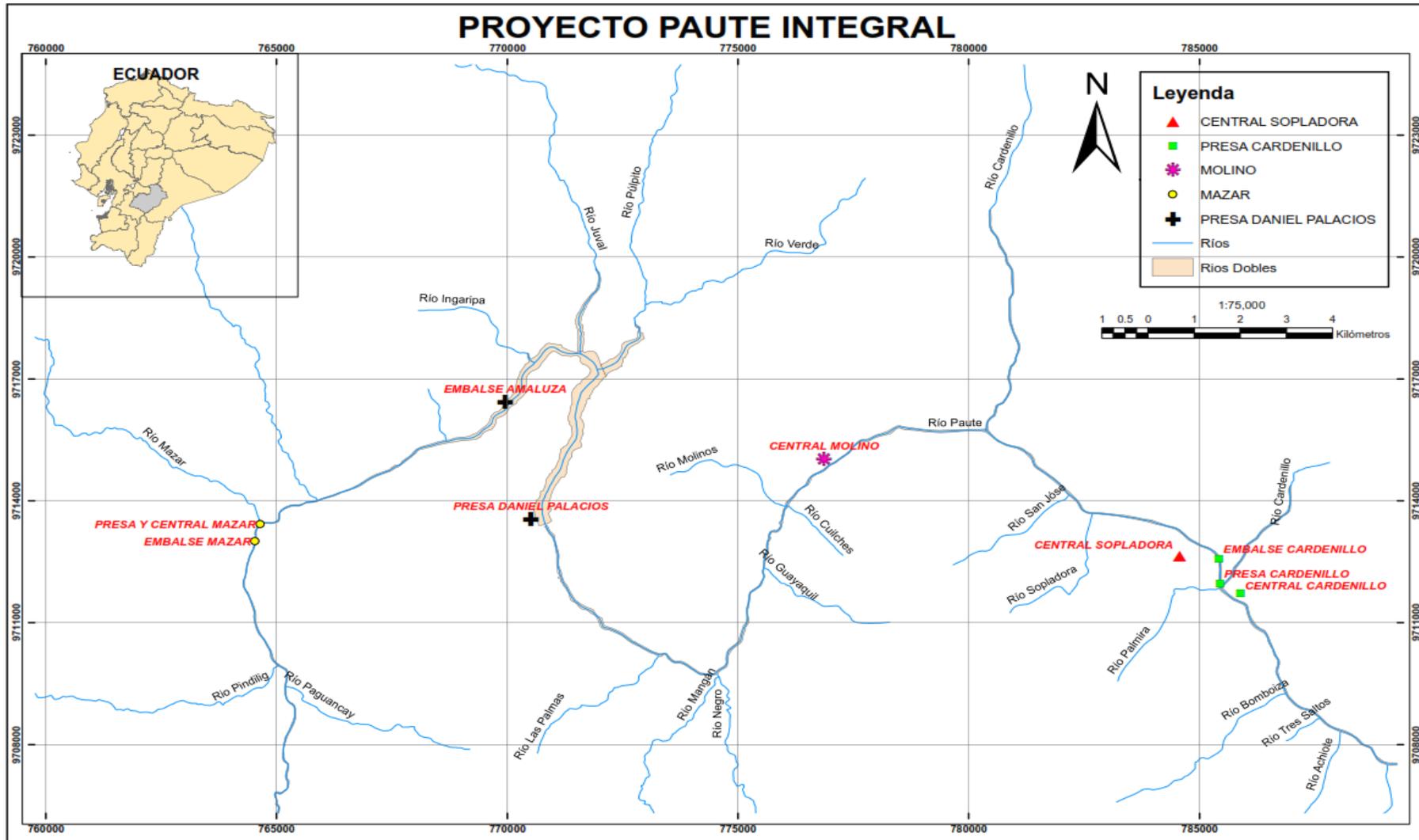


Figura 1. Proyecto Paute Integral

AUTORÍA: JORGE EDUARDO ORBES  
TANIA GABRIELA PERALTA

### 2.3.1 Mazar

#### Aspectos Generales del Proyecto

El proyecto Mazar está ubicado al sur-este del Ecuador, entre los límites de las Provincias de Azuay y Cañar. El sitio se encuentra aproximadamente en el km 105 de la vía Cuenca-Paute-Guarumales. Este proyecto constituye la segunda etapa del desarrollo del potencial hidroeléctrico del tramo medio del río Paute en el sector de la Cola de San Pablo. El Proyecto Hidroeléctrico Paute-Mazar incluye la instalación de una central de 170 MW de potencia instalada, consiste en el aprovechamiento del caudal del río Paute aguas arriba del aprovechamiento del proyecto Paute- Molino, en las inmediaciones de la desembocadura del río Mazar.

Está constituido básicamente por una presa de enrocado con cara de hormigón “CFRD” de 166 metros de altura, que forma un embalse de 410 hm<sup>3</sup>, y una central subterránea, a pie de presa, que alojará dos unidades de generación de 85 MW cada una (HIDROPAUTE, 2008).

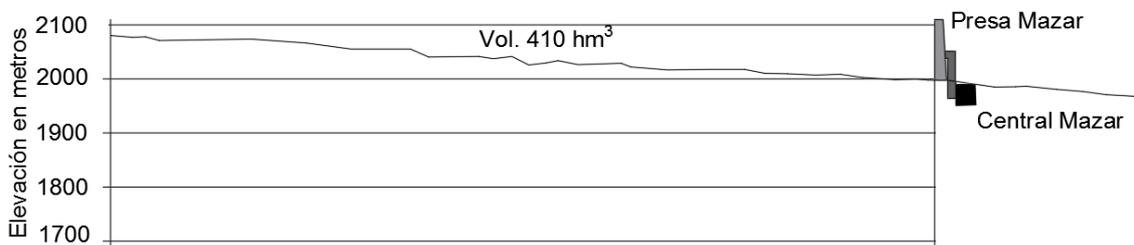


Figura 2. Vista Longitudinal Embalse Mazar (31 km)

#### Batimetría

La batimetría del embalse Mazar se la realizó mediante sondeos electrónicos con un ecosonda Raytheon y posicionamiento con apoyo GPS. La batimetría fue referida a la topografía del embalse obtenida a partir de una restitución Aero fotogramétrica realizada para el proyecto Mazar que permitió establecer 36 perfiles transversales que han sido levantados en dos períodos. El primero en el mes de noviembre 2013 y el segundo en la zona de la cola del embalse durante los meses de junio y julio 2014. En diciembre 2013 se realizó una campaña de levantamientos batimétricos en la zona de Chalacay para la obtención de curvas isométricas. En los primeros 500 metros desde la presa hacia aguas arriba también se realizó un levantamiento para establecer curvas isométricas que mantenían sus características hasta la última comprobación en el mes de junio 2014 (CELEC EP, 2013a). Como parte del informe sobre sedimentación del embalse Mazar se obtuvo mediante procedimiento de cálculo volúmenes de sedimento de 10.12 hm<sup>3</sup> para el río Paute y 0.87 hm<sup>3</sup> para el río Collay con un total de 10.99 hm<sup>3</sup>.

La tasa media de sedimentación desde el inicio de la operación del embalse se estima en 2.75 hm<sup>3</sup> año<sup>-1</sup>, esta tasa explica la baja sedimentación que ha experimentado el embalse Amaluza desde el inicio de operaciones de Mazar y ratifica que el embalse Mazar funciona en el aspecto de retención acorde al diseño del proyecto. Sin embargo se debe puntualizar que se observa sedimento que no es retenido por Mazar y transita en granulometrías muy finas hacia los coloides al embalse Amaluza (CELEC EP, 2013).

Los niveles de operación son:

- Nivel máximo de operación normal: 2153 msnm.
- Nivel mínimo normal de operación: 2098 msnm.

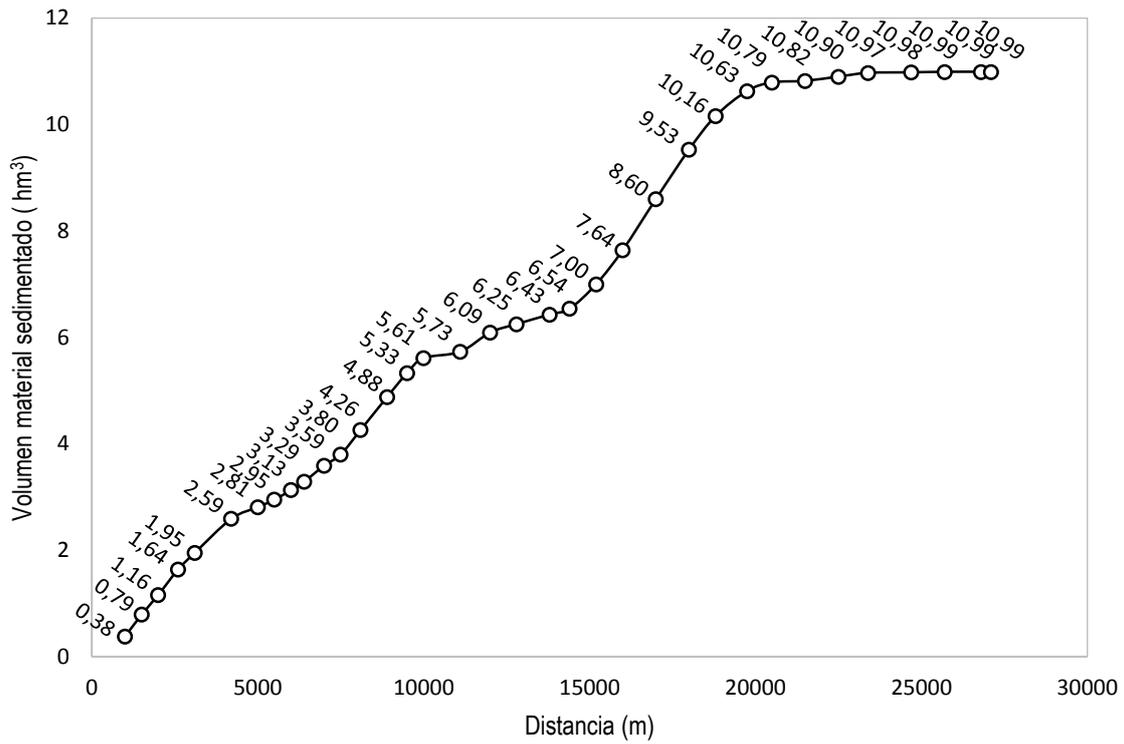


Figura 3. Curva Distancia - Volumen de material sedimentado, Mazar (CELEC EP, 2013b)

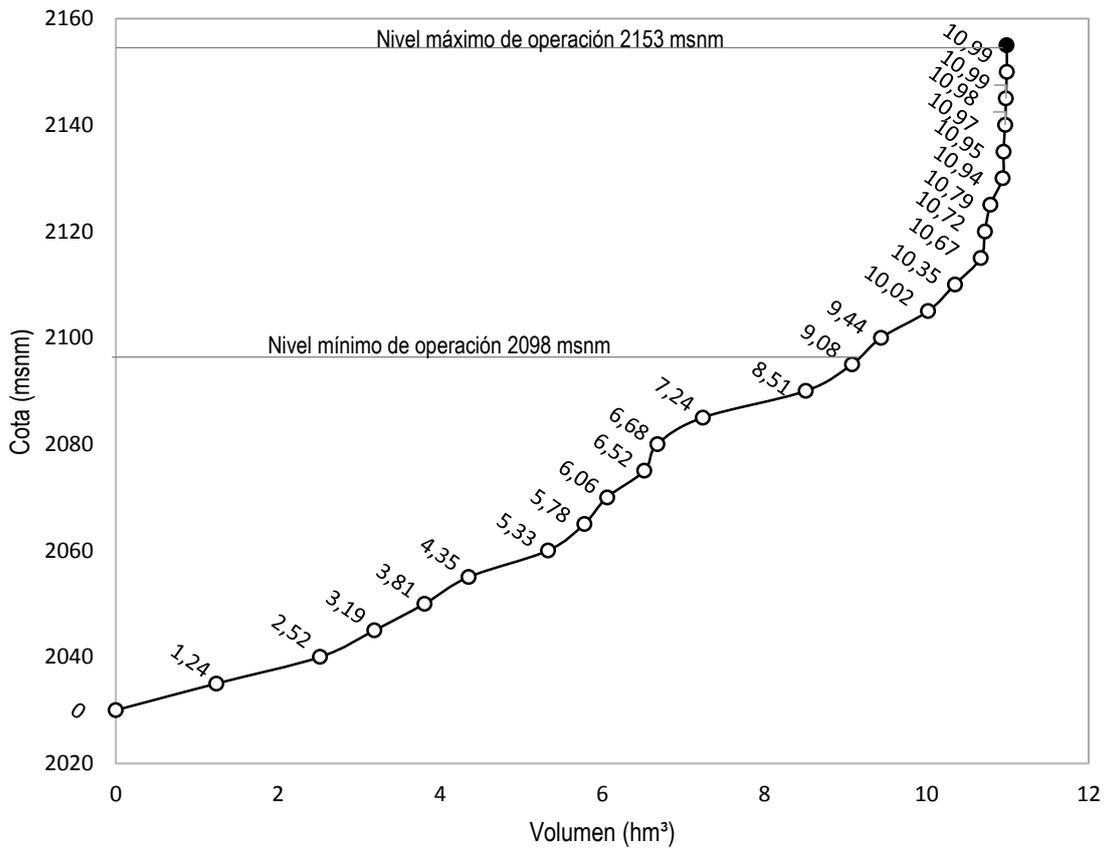


Figura 4. Curva Cota - Volumen de material sedimentado, Mazar (CELEC EP, 2013b)

### 2.3.2 Amaluza

#### Aspectos Generales del Proyecto

En Amaluza el levantamiento batimétrico número 57 fue realizado por el Área de Dragado de CELEC HIDROPAUTE con el apoyo del personal de la draga Amaluza 1 y el personal de Mantenimiento Civil que se ejecutó en el mes de diciembre de 2013 y de la cual se hace mención, constaba en ese entonces con 10 kilómetros de longitud levantada, así como también considera la entrada en operación del embalse Mazar con el objeto de llevar un control de la evolución de la sedimentación del embalse Amaluza. Al tratarse de un embalse de rápida sedimentación, la alternativa para alargar la vida útil del mismo ha sido el dragado en períodos prudentes de tiempo con el fin de permitir su correcta operación.

#### Batimetría

La batimetría del embalse se realizó con sondeos mecánicos y electrónicos mediante levantamiento de los perfiles transversales ubicados antes del llenado, y mediante la determinación de curvas isométricas en la zona de dragado de la primera etapa por medio de un barrido electrónico con eco sondeo. Los 10 kilómetros de longitud se han levantado conforme se han realizado las 56 batimetrías precedentes, es decir mediante la medición de profundidades de 30 perfiles transversales; de estos perfiles, 24 se ubicaron en el cauce del río Paute, 3 en el brazo de Palmira y 3 en el brazo de Juval, mientras que 7 perfiles fueron levantados sobre la vegetación acuática. Siendo el volumen total sedimentado a la fecha del levantamiento de 50.53 hm<sup>3</sup> que representa el 42.11 % del volumen total original que es de 120 hm<sup>3</sup>. Como resultado de la batimetría se obtuvo que en el brazo del río Juval se depositó 3.72 hm<sup>3</sup>, en el brazo de Palmira se han depositado 2.77 hm<sup>3</sup> mientras que en el río Paute se han depositado 44.04 hm<sup>3</sup>. La tasa anual media de la sedimentación en el embalse Amaluza desde la entrada de Mazar se ha reducido considerablemente a 0.12 hm<sup>3</sup> (CELEC EP, 2013a). Para mantener información actualizada se realiza semestralmente batimetrías (CELEC EP, 2016).

Año	Volumen promedio sedimento (hm <sup>3</sup> )	$\Delta V$ (hm <sup>3</sup> )
1983	3.20	-
1984	5.80	2.60
1985	7.10	1.30
1986	9.25	2.15
1987	11.52	2.27
1988	13.55	2.03
1989	17.05	3.50
1990	19.90	2.85
1991	21.95	2.05
1992	22.35	0.41
1993	26.42	4.07
1994	28.01	1.60
1995	29.93	1.92
1996	32.14	2.21
1997	33.97	1.83
1998	35.06	1.09
1999	36.93	1.87
2000	37.22	0.29
2001	38.15	0.93
2002	39.25	1.10
2003	39.89	0.64
2004	41.23	1.34
2005	43.49	2.26
2006	44.63	1.14
2007	46.11	1.48
2008	48.25	2.15
2009	50.14	1.88
2010	50.20	0.06
2011	50.00	-0.20
2012	50.22	0.22
2013	50.53	0.31
Promedio (1983 - 2009)		1.81

Tabla 3. Tasa media de sedimentación calculada para Amaluza (1983-2009)

Además de las constantes mediciones y cálculos, para optimizar el manejo de los aportes hídricos que ingresan al sistema Paute se cuenta con una red telemétrica de la cuenca baja del río Paute (CELEC EP, 2010).

En la sedimentación, en la actualidad se realiza manejo con una draga de tipo succión con cortador hidráulico por chorro. Se realiza hasta 1000 metros aguas arriba para así impedir que la sedimentación tapone el desagüe de fondo y la toma de carga. La draga, por su parte, consta de 66 metros de largo, 8 metros de ancho y 2.25 metros de alto que fue construida en Japón en 1990, se trajo en piezas para ensamblar en el embalse de Amaluza. Dicha draga tiene 345 toneladas de peso, donde puede superar una profundidad de agua de hasta 110 metros para alcanzar y excluir los sólidos depositados, lo cual hace que ésta draga sea un equipo muy especial y poco común en el mundo. La draga Amaluza 1 es totalmente eléctrica, que trabaja con la energía en la Central Molino desde donde es transportada por una línea de 16 kilómetros de longitud que parte desde el patio de maniobras sobre la Casa de Máquinas (CELEC EP, 2016).

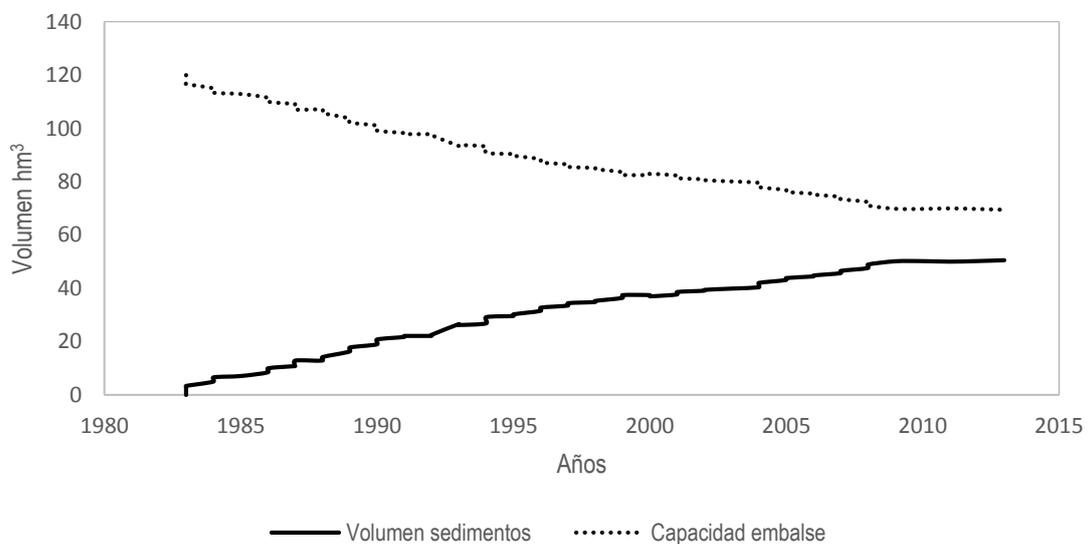


Figura 5. Capacidad del embalse Amaluza

Los niveles de operación son:

- Nivel máximo de operación normal: 1991 msnm.
- Nivel mínimo normal de operación: 1970 msnm.
- Nivel mínimo teórico de operación: 1935 msnm.

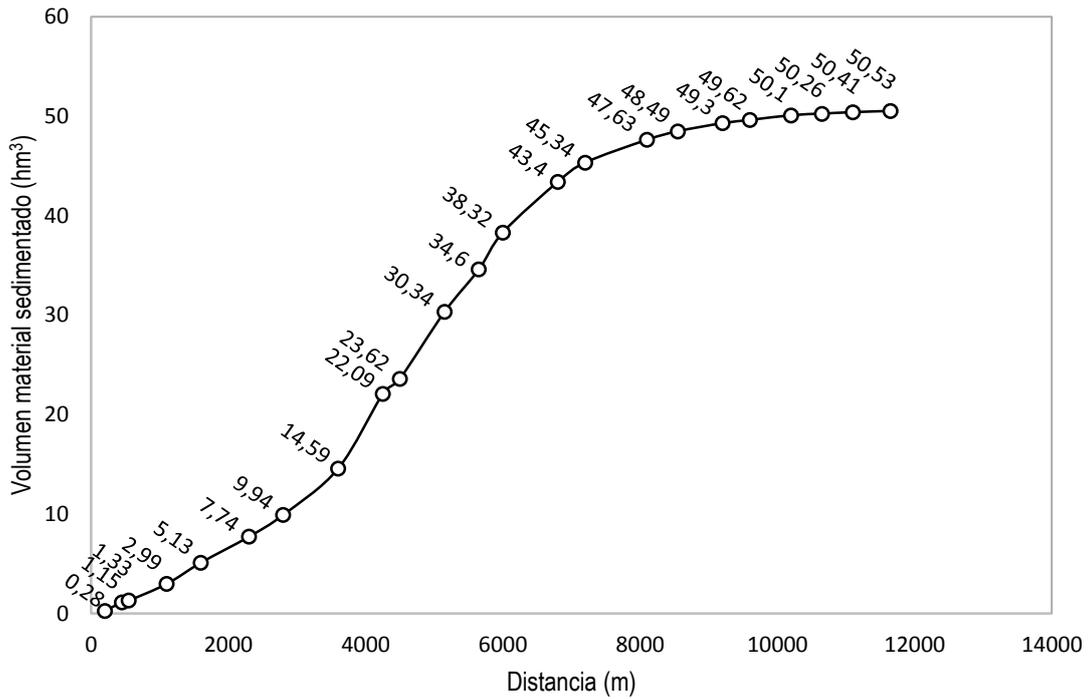


Figura 6. Curva Distancia - Volumen de material sedimentado, Amaluza (CELEC EP, 2013)

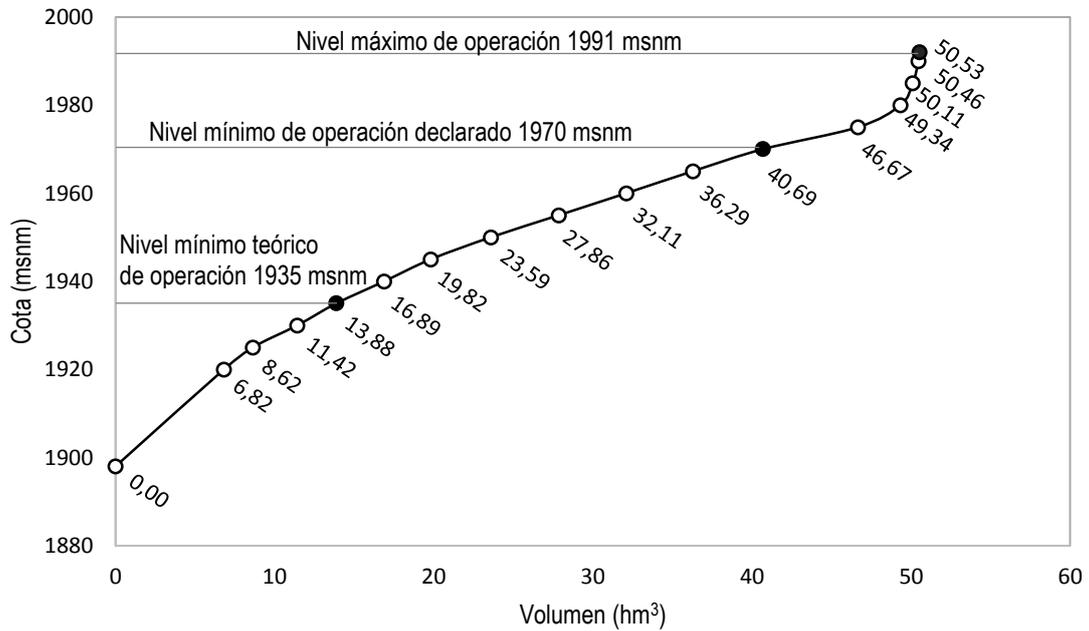


Figura 7. Curva Cota - Volumen de material sedimentado Amaluza (CELEC EP, 2013)

### 2.3.3 Cardenillo

En el proyecto Paute - Cardenillo el consorcio PCA inició los estudios de prefactibilidad de dicho proyecto el 7 de enero de 2011. El objetivo de estos estudios fue definir de entre varias alternativas de desarrollo que podría tener el proyecto PAUTE-CARDENILLO, a aquella que reúna las condiciones técnicas y económicas que vayan en beneficio del sector eléctrico ecuatoriano y del país.

Los resultados de los estudios de factibilidad del proyecto, puestos en conocimiento de CELEC EP-HIDROPAUTE en el mes de julio de 2012, recomendó el desarrollo del proyecto mediante una presa de arco doble curvatura de aproximadamente 136 metros de altura, ubicada en el río Paute, aguas abajo de la descarga de la central hidroeléctrica Sopladora, una conducción a presión subterránea equipada con seis unidades de generación con una capacidad instalada de 588.31 MW.

La presa se emplazará en el cauce del río Paute, 2015 m aguas abajo de la descarga de la central Sopladora y 1535 m aguas abajo de la desembocadura del río Cardenillo Chico. El sitio escogido para la presa tiene características morfológicas y geotécnicas apropiadas para el tipo de presa seleccionada (arco doble curvatura). La presa será cimentada sobre roca y se ubicará en las coordenadas N 9 710 800 y E 786 371. Considerando el nivel de fundación de la presa se localizará aproximadamente en la elevación 790 msnm, la altura de presa respecto a este nivel es de 136 metros (CELEC EP y CONSORCIO PCA, 2013)

Los niveles de operación justificados en los estudios son:

- Nivel máximo de operación normal: 924 msnm.
- Nivel mínimo normal de operación: 914 msnm.
- Nivel máximo extraordinario de la presa: 926 msnm.

### **Sedimentología**

Los sedimentos procedentes de Amaluza son solo en suspensión, pero los sedimentos que se producen en la subcuenca intermedia Amaluza-Presa Cardenillo tienen elementos de suspensión y fondo.

La fracción de sedimentos correspondiente a la carga de fondo en los ríos, únicamente se ponen en movimiento durante la ocurrencia de crecidas de cierta magnitud, por lo que la determinación del aporte de sedimento anual de fondo tiene un alto grado de incertidumbre.

La determinación de sedimentos totales en el sitio de la Presa Cardenillo se lo hizo mediante la siguiente ecuación (CELEC EP y CONSORCIO PCA, 2013):

$$Q_{sed. \text{ Totales en presa Cardenillo}} = Q_{STA} + Q_{STI} \quad \text{Ecuación 2-1}$$

$$Q_{sed. \text{ Totales en presa Cardenillo}} = 1.0 + 0.18 = 1.18 \text{ hm}^3 \text{ año}^{-1}$$

donde:

$Q_{STA}$  = Representa el caudal sólido total que se descarga del embalse Amaluza, y

$Q_{STI}$  = Representa el caudal sólido total de la cuenca intermedia entre Amaluza y la presa Cardenillo

## **2.4 Casos de estudio**

Ciertamente a nivel local se han realizado algunos estudios enfocados a diferentes procesos, sin embargo, una forma de encontrar medidas adecuadas es la comparación con otros estudios a nivel internacional. Los estudios de caso en manejo de sedimentos se han clasificado en los siguientes grandes tópicos:

### **2.4.1 Procesos de sedimentación en embalses**

#### ***Análisis de vulnerabilidad al cambio climático de la cuenca Paute (Ecuador), (Calderón, 2016)***

En la cuenca del río Paute se ha dispuesto de muy poca información en cuanto a medición de sedimentos, únicamente se cuenta con un aforo que contiene información de transporte total del arrastre de material en periodo de tiempo anual.

Se realiza una evaluación de las proyecciones de la producción de caudales líquidos y sólidos, enlazados al cambio climático actual. Como referencia del modelo de estudio, se parte de diferentes escenarios



(RCP 2.6 – RCP 4.5 – RCP 6 – RCP 8.5) de cambio climático planteados por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático o IPCC para la obtención de resultados.

Se analiza la cuenca hidrográfica del río Paute, pues de entre sus cuencas, el 35 % están expuestas a amenaza alta y máxima de deslizamiento. Consecuencia de esto, los embalses afectan a los cauces tanto aguas arriba como aguas abajo, con efectos de degradación derivados del ejercicio natural del río de sopesar el desbalance generado como consecuencia del emplazamiento de la represa; tanto del caudal líquido como del caudal sólido natural del cuerpo de agua (Calderón , 2016). Una vez realizada la simulación (SWAT), se percibe que la cantidad de sedimento generado estimado varía entre  $0.2$  a  $6 \times 10^5$  ton año<sup>-1</sup> en las cuencas de la parte alta, en la cuenca media y baja se tiene mayor aporte de sedimentos, con  $14.9 \times 10^5$  ton año<sup>-1</sup> a  $53.13 \times 10^5$  ton año<sup>-1</sup>. Para evitar la pérdida de vida útil del embalse y modificaciones en los sistemas de los mismos, se plantean acciones como la conservación del suelo y la cobertura vegetal que reducirían el aporte de sedimentos, así como también disminuirían la producción de sedimentos.

Sin embargo, en el proceso de modelación del estudio no se consideran los cambios en el retraso de caudal y retención de sedimento generado por el sistema de embalses, lo cual introduce cierto grado de incertidumbre en la simulación.

#### ***Land use, soil erosion, and reservoir sedimentation in an Andean Drainage basin in Ecuador, (Harden, 1993)***

En el embalse Amaluza además de la agricultura se presentan factores que se relacionan directamente con el flujo de sedimentos al embalse, como son la topografía, la proximidad al embalse, la sustracción de materiales del cauce y las redes de entrega de sedimentos. El embalse al tener características propias de las cuencas de drenaje de los Andes y regiones montañosas se convierte en un buen referente de estudio para el análisis del uso y erosión del suelo en laderas de drenajes ecuatorianos andinos. Con esta finalidad, se realizan experimentos de campo con simuladores portátiles de lluvia (Dos simuladores Tipo McQueen) para posteriormente comparar la dinámica de escorrentía y erosión del suelo.

Se realiza una medición del escurrimiento estancado así como el contenido de sedimento arrastrado para posteriormente estimar los porcentajes de clasificación de usos del suelo con lo que se obtiene que: “32% del área de la cuenca es el páramo (pastizal de alta elevación); 25% de vegetación leñosa, que varía en calidad de bosques primarios a matorrales degradados; 24% de pastos; 17% de tierras cultivadas; y 2% de superficies impermeables” (Harden, 1993). Por lo tanto, se demuestra que a lo largo de carreteras y caminos escarpados es donde se producen las cicatrices erosivas más considerables. Así como también se concluye que una vez realizada la simulación de lluvia la erosión está mucho más ligada al uso de la tierra que con las diferencias del tipo de suelo en el drenaje de la cuenca, por lo que el uso intensivo de la tierra aumenta el riesgo de transporte de sedimentos de esas cuencas al embalse Amaluza.

#### **2.4.2 Erosión en el cauce**

##### ***Stabilising the Paute river in Ecuador, (Abril y Knight, 2004)***

El deslizamiento ocurrido en la Josefina hace 23 años aproximadamente, provocó que los niveles del lecho del río crezcan hasta en 30 m, sin embargo, cinco años más tarde se realizaron batimetrías que mostraron que los niveles habían descendido hasta 10 m. Debido a lo ocurrido se tornó de suma importancia adoptar medidas de estabilización a largo plazo para controlar y estabilizar el valle del río Paute. Para reducir el riesgo de erosión que puede conllevar a una producción enorme de sedimentos en el río Paute se han realizado algunas medidas de estabilización, entre ellas se menciona el cálculo de un perfil de lecho estable que es calculado usando la variación local del tamaño de sedimento y una descarga con un período de retorno de diez años. En el cálculo se usan ecuaciones propuestas por Ramette que se basan en la ecuación de Manning para el transporte con la ley logarítmica de fricción para la rugosidad, ambos vinculadas por la relación ancho – profundidad del canal.

Se realiza la fijación de niveles del lecho del río comprendidos entre los 10 km de La Josefina y la unión del río Gualaceo con el uso de un sistema de estructuras de caída transversales colocados en puntos estratégicos, mismos que funcionan para resistir la erosión lo que permite que el río llegue a su pendiente

longitudinal de equilibrio, sin producir una disminución general del nivel del lecho. Los modelos numéricos validados por los continuos estudios llevados a cabo durante cuatro años son otra medida tomada, dos modelos se han aplicado para estudiar el río: el primero es el modelado del flujo del río por el método de elementos finitos que describe el flujo y el transporte con profundidad promediada del sedimento. El segundo es la modelación fluviomorfológica del río, que predice la evolución morfológica del perfil longitudinal del río. Una vez adoptadas y analizadas las medidas mencionadas se aprecia que las estructuras de estabilización construidas han evitado que el nivel del lecho disminuya hasta 15 m en el sitio del deslizamiento con lo que se atenúa el riesgo hidrogeológico en la región.

***River channel response to short – term human - induced change in landscape connectivity in Andean ecosystems, (Vanacker et al., 2005)***

Es imperante evaluar la respuesta geomórfica e hidrológica de un sistema fluvial debido al ser humano, para este propósito se estudia la cuenca hidrográfica del río Deleg que consta de un área de 88 km<sup>2</sup> y se ubica al sur de los Andes ecuatorianos. Para determinar la incidencia de estos cambios, a veces considerados “mínimos” se hizo uso de datos históricos principalmente. Se tiene:

- Recolección de datos topográficos con el fin de apreciar los cambios morfológicos del suelo.
- Los cambios históricos del uso de la tierra en la cuenca que drena aguas abajo del río fueron mapeados por medio de fotografías aéreas existentes del año 1962 y 1995 y que fueron validadas mediante una encuesta.
- El recuento de cantos rodados es usado como método de evaluación de los cambios de distribución del tamaño del material del lecho y para la determinación del cambio en la sedimentología.
- El tamaño medio de partícula del material del lecho obtenido indica que las descargas máximas de sedimento disminuyeron (Vanacker et al., 2005).

***Vegetation and topographic controls on sediment deposition and storage on gully beds in a degraded mountain area, (Molina et al., 2009)***

La influencia de la vegetación sobre el transporte y producción de sedimentos en áreas montañosas es muy conocido a nivel de estudios, sin embargo, no se puede decir lo mismo sobre la reposición de las vías de transporte de sedimentos que juegan un papel importante en el cálculo total de sedimentos en cuencas montañosas degradadas. Los procesos geomorfológicos que controlan la producción y transferencia de agua y sedimentos están relacionados con la cobertura vegetal de forma no lineal (Molina et al., 2009), por lo que el control que ejercen estos procesos implica que un aumento no significativo en la cubierta vegetal ejerza un gran cambio o disminución en la producción de sedimentos en un periodo corto.

Como método de obtención de datos se monitorean y realizan mediciones de campo, posteriormente se hace uso de las leyes de transporte de sedimentos con el fin de analizar la deposición de sedimentos, donde se denota que la reducción de la pendiente y el aumento de rugosidad debido a la vegetación hacen más probable que se produzca una deposición de sedimentos favorable.

El volumen de sedimento acumulado en el lecho se cuantifica a partir del ancho y la longitud de la cama formada por los sedimentos depositados, estas mediciones fueron realizadas a intervalos de longitud de 5 metros. El volumen de sedimento acumulado en cada segmento *i* del lecho (*V<sub>i</sub>*) se calcula como se muestra:

$$V_i = L_i * \frac{W_i + W_{i+1}}{2} * \frac{D_i + D_{i+1}}{2} \quad \text{Ecuación 2-2}$$

$$VUi = \frac{V_i}{L_i} \quad \text{Ecuación 2-3}$$

donde:

*i* = Número de segmento de medición

*L<sub>i</sub>* = Longitud del segmento (*m*)



$W_i$  = Ancho de sedimentos en el comienzo del segmento ( $m$ )

$D_i$  = Profundidad del sedimento en el comienzo del segmento ( $m$ )

$V_i$  = Volumen de la cama formada por los sedimentos depositados en el segmento de medición  $i$  ( $m^3$ )

$VU_i$  = Volumen de deposición de sedimentos por unidad de longitud barranco ( $m^3$ )

De donde se concluye tras un análisis profundo, que la presencia de vegetación en el lecho del barranco induce la deposición de sedimentos, así como la estabilización del mismo y conduce a valores de volumen de sedimento entre  $0.01 - 0.06 m^3$  por unidad de longitud de barranco depositados anualmente.

#### 2.4.3 Variación espacial en el uso del suelo (cambios de la cobertura vegetal).

##### ***Complex land cover change, water and sediment yield in a degraded Andean environment, (Molina et al., 2002)***

La cuenca del Jadán corresponde a los Andes ecuatorianos y comprende un área de drenaje de  $296 km^2$ , cuya morfología se caracteriza por pendientes moderadas. Varios experimentos en canales de barranco realizados en los Andes tropicales indican que la presencia de vegetación en los canales de sumidero provoca una disminución en la transferencia de flujo superficial, así como en los sedimentos hacia el sistema fluvial. Para determinar la repercusión del cambio de la cobertura del suelo en el área se dispone de fotografías aéreas pancromáticas de los años 1963 – 1995 (IGM) y de una imagen ASTER del año 2007 mediante las cuales se establece una serie temporal de datos de cobertura del suelo. Los datos del tipo de cobertura del suelo se interpretan de forma manual usando un estereoscopio de espejo Wild con cuatro aumentos y los mapas de cobertura fueron generados en el software ILWIS 3.3 (Molina et al., 2002).

Se realizan mediciones directas de los volúmenes de sedimentos acumulados detrás de 106 presas de retención, para calcular el rendimiento medio anual específico de sedimentos (SSY) y de esta manera contener la evolución de las tasas de erosión en la cuenca Jadán. Así también la dependencia de la producción de sedimentos anual media se examinó mediante un análisis estadístico univariado y multivariado, analizando parámetros como la topografía, tipos de suelo, cubierta vegetal y litología. Una vez hecho esto, se realiza una ponderación de la producción de sedimentos específica de cada clase de cobertura por el área superficial de la clase de cobertura, se estima un 30% y 40% de error en el cálculo de la producción de sedimentos. El enfoque usado para limitar la evolución de las tasas de erosión es el modelo empírico planteado por (Molina et al., 2008) mediante el cual se encuentra que existe una disminución del rendimiento de sedimentos específicos de la zona, de  $3700 \pm 740 mg km^{-2} año^{-1}$  en 1963 hasta casi  $1800 \pm 360 mg km^{-2} año^{-1}$  en 2007.

##### ***Linking hydrological, infinite slope stability and land-use change models through GIS for assessing the impact of deforestation on slope stability in high Andean watershed, (Vanacker et al., 2002)***

El transporte y deposición de sedimentos aguas abajo de ríos y embalses se ven directamente afectados por el movimiento en las laderas con pendiente, al ser la capacidad de transporte de la corriente menor al suministro de material existe la posibilidad de formación de una presa que una vez que se desborda puede provocar inundaciones aguas arriba e inundaciones rápidas aguas abajo. El movimiento por pendiente es un problema en los Andes ecuatorianos debido a la incidencia sobre la deposición y transporte de material sedimentario aguas abajo de ríos y embalses, estos movimientos no solamente causan cambios en la morfología del suelo sino también en la cubierta vegetal del mismo.

El estudio se basa en análisis estadísticos cuyos cálculos de atributos topográficos fueron calculados a partir de píxeles de  $5 \times 5 m$ , además se realiza un análisis de proximidad a ríos y canales de riego, uso actual de la tierra y la deforestación en el área (Vanacker et al., 2003). Para mostrar que no existe relación significativa entre la variable predictora y el patrón de movimiento pendiente se ha realizado una prueba estadística chi-cuadrado mientras que para mostrar la fuerza y tipo de relación se ha hecho uso de las estadísticas V de Cramer. Entonces, una vez realizadas las pruebas estadísticas se denota que las zonas bajas de laderas relativamente suaves son las más propensas a los movimientos de pendiente.

***Erosion regulation as a function of human disturbances to vegetation cover: a conceptual model, (Vanacker et al, 2014)***

Un modelo de regulación de la erosión se aplica aquí en dos regiones montañosas con diferentes dinámicas de vegetación, entorno climático y geológico: el Austro Ecuatoriano y la Cordillera Bética Española. Los datos de campo del impacto humano sobre la erosión de las montañas se obtienen a partir de la combinación de tres métodos independientes: (1) radionucleidos cosmogénicos producidos in situ para establecer flujos denudacionales masivos naturales de referencia, (2) mediciones de sedimentación de reservorios para establecer los rendimientos totales de sedimentos específicos, 3) teledetección para caracterizar la cubierta vegetal.

La vegetación tiene mucha importancia para la regulación de los sedimentos, los modelos de erosión del suelo incluyen típicamente la cobertura vegetal como uno de los parámetros clave del modelo. Las tasas totales de erosión son aproximadamente 10 veces más altas en el Austro Ecuatoriano en comparación con la Zona Interna de la Cordillera Bética. Las tasas de erosión en toda la cuenca típicamente muestran una gran variabilidad en ambas regiones. Entre 0.01 y 18.4 mg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> (con valor medio de 1.5 mg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>) en el sitio español y entre 0.26 y 151 mg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> (valor medio: 21.9 mg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>) en el sitio ecuatoriano.

Al trazar los valores de la aceleración humana de la erosión como una función de la perturbación de la vegetación, se puede observar que los datos de las dos regiones siguen aproximadamente la misma tendencia. En general, existe una correlación significativa entre la aceleración humana sobre la erosión y la perturbación de la vegetación.

Con la disminución de la cobertura vegetal, hay un aumento exponencial en las tasas de erosión total. Sin embargo, la dirección y la fuerza de esta relación dependen fuertemente de los entornos ambientales locales.

#### **2.4.4 Variación espacial en la producción de sedimentos**

***Spatial variation of suspended sediment concentrations in a tropic Andean river system: The Paute River southern Ecuador, (Vanacker et al., 2006)***

En los Andes tropicales se estima que la erosión a causa del agua sobre los campos agrícolas es la que aporta mayor cantidad de sedimentos a las cuencas hidrográficas, pues las prácticas agrícolas aplicadas no son adecuadas, así también la distribución espacial de las fuentes de sedimentos influye directamente en los cambios y la respuesta geomorfológica del uso del suelo en grandes cuencas.

Se han obtenido datos recogidos en 29 lugares dentro de la cuenca del río Paute (Anexo 1), aguas arriba del embalse Amaluzza en el sur de los Andes ecuatorianos (Vanacker *et al.*, 2007b). En la obtención de datos se hace uso de técnicas de monitoreo de sedimentos de bajo costo, tomando muestras de aproximadamente 500 cm<sup>3</sup> manualmente, en donde cada sitio fue muestreado 13 veces en el período cubriendo dos estaciones lluviosas sucesivas. Una vez recolectadas las muestras se han realizado cálculos de la concentración media de sedimento en suspensión para cada sección del río. En donde 26% de la variabilidad apreciada en la concentración de descarga media ponderada de sedimentos en suspensión (SSC<sub>w</sub>) es explicada por la combinación lineal de variables como la zona de captación, el drenaje del suelo y la topografía, sin embargo el conjunto de datos se ve directamente influenciada por altas concentraciones de sedimentos suspendidos medidos en cuencas con grandes deslizamientos activos como Guapán (8520 mg/l), Azogues (3367 mg/l), Cachipamba (26.199 mg/l) y Cumbe (4736 mg/l).

***Environmental factors controlling spatial variation in sediment yield in a central Andean mountain area, (Molina et al., 2008)***

La zona de estudio comprende la parte central de la cuenca del Río Paute, tomada como piloto para mostrar la necesidad de entender la repercusión de los factores ambientales en el control del uso del suelo que es fundamental para la evaluación del impacto de estrategias de mitigación de la erosión del suelo, en donde se observa que la producción y el transporte de sedimento se ven afectados por un leve aumento de la cubierta vegetal fraccionada en tierras degradadas. Los daños a la infraestructura y el uso

limitado de aguas superficiales se ven agravados por el transporte de cargas excesivas de sedimentos en el sistema fluvial, lo que conlleva a un déficit de producción de agua potable y generación hidroeléctrica.

Se plantea un modelo empírico que predice el rendimiento específico de sedimentos y viene dado por:

$$SSY = a * e^{cL+bC} \quad \text{Ecuación 2-4}$$

donde:

$$a = 2330$$

$$b = - 4.91$$

$$c = 2.73$$

$C$  = Coeficiente adimensional que depende de la cubierta vegetal

$L$  = Coeficiente adimensional que depende de la litología del área de estudio

$SSY$  = Rendimiento medio anual específico de sedimentos ( $mg \text{ km}^{-2} \text{ año}^{-1}$ )

Se realizan mediciones directas de los volúmenes de sedimentos acumulados detrás de 106 presas de control situados en 37 cuencas para el estudio, mismas que fueron construidas para estabilizar el flujo y retener sedimentos algunos años antes, además se han tomado cincuenta y cinco muestras de sedimentos mediante un muestreador Kopecky y la delimitación de las zonas de captación se la realizó con mapas topográficos. Después de realizado el cálculo de producción de sedimentos específica anual ( $SSY$ ), se realiza un análisis de la relación entre el  $SSY$  y parámetros de captación como la topografía, tipo de suelo, lugar y cobertura del suelo que son los factores que afectan la producción de sedimentos en una cuenca pequeña. La media de producción específica anual de sedimentos ( $SSY$ ) en la cuenca del río Paute muestra una gran variabilidad espacial que oscila entre 26 y 15100  $mg \text{ km}^{-2} \text{ año}^{-1}$  (Molina *et al.*, 2008).

#### 2.4.5 Gestión de sedimentos

##### **Caso de estudio: Río North Fork Feather, California, (Morris y Fan, 2010)**

La compañía PG&E es la encargada de operar una cadena de tres pequeñas presas (Rock Creek, Cresta y Poe) ubicadas a lo largo del empinado cañón del río North Fork Feather ubicado sobre el lago Oroville en las montañas de Sierra Nevada. El estudio se basa en visitas al sitio, entrevistas, documentos publicados y datos proporcionados para analizar las actividades de manejo de cuencas, se presenta al enrutamiento de sedimentos mediante vegetación como un medio para producir un equilibrio de sedimentos a lo largo de la cadena de embalses. El sistema del río North Fork Feather se ha visto afectado desde principios de la década de los 80 debido a problemas de sedimentación con liberación de material menor que 0.84 mm de diámetro, que, conjugados con problemas operativos y cuestiones ambientales, obligó a la proposición de técnicas de gestión de sedimentos con la finalidad de alargar la vida útil de las presas y evitar la completa saturación de las mismas. Inicialmente se pensó en implementar planes de dragado sin embargo debido al alto costo de ésta técnica, se prefiere aplicar un plan basado en el enrutamiento de sedimentos durante las inundaciones.

La mayor parte del sedimento fue derivado de la erosión y cárcavas dentro de los canales de transmisión desestabilizados y el 80% de la producción de sedimentos se estima que es producto de una acelerada erosión (Morris y Fan, 2010). Se realiza una reconstrucción histórica de la erosión en la cuenca mediante el uso de fotografías aéreas, estudios de campo, encuestas y fuentes históricas de información existentes con el fin de determinar las principales fuentes de sedimento que muestran que como en la gran mayoría de cuencas degradadas, la cuenca del río North Fork Feather ha sufrido una aceleración en cuanto a la producción de sedimentos debido a actividades como el pastoreo excesivo, explotación forestal y la minería, que son factores que explican cerca del 60% de la degradación de la cuenca hidrográfica.

Además se analizaron actividades de restauración mediante muestras de flujo aplicadas en otras zonas, entre ellas está el proyecto de restauración Big Flat Meadow implementado en 1995 y que comprendía un plan de revegetación para las zonas más dañadas por la erosión provocada por un evento aislado



ocurrido en 1990 y que había provocado barrancos de hasta 5 m de profundidad, mismos que fueron contrarrestados con medidas de revegetación progresivas debido a los grandes volúmenes de sedimentos que fueron exportados a causa de la erosión del cauce y que debían controlarse con medidas correctivas a mediano y largo plazo. Al aplicar la medida fueron varios los objetivos a lograr, entre ellos están la reducción de la cantidad de sedimento, la mejora de la calidad del agua (aguas abajo) y la restauración del hábitat de la trucha arco iris oriunda de la zona.

#### ***Caso de estudio: Embalse Loíza en Puerto Rico, (Morris y Fan, 2010)***

Entre el cierre de marzo de 1953 y en la más reciente encuesta realizada en noviembre de 1994, el embalse de Loíza había perdido el 53 por ciento de su capacidad debido a sedimentación, su volumen total se había reducido a 14.2 hm<sup>3</sup>. La sedimentación de los embalses con el tiempo, se ha reconocido como un problema en Puerto Rico.

Loíza es una presa de hormigón de gravedad, estructura de 29 metros de altura con ocho puertas de cresta radiales de 10 m de altura y una capacidad de diseño del aliviadero de 8830 m<sup>3</sup>/s.

En el embalse Loíza, la tasa de pérdida de almacenamiento puede ser calculado mediante dos métodos: por batimetrías, así como también midiendo la diferencia en la descarga de sedimento fluvial en las estaciones de calibre arriba y abajo de la presa instalada en 1984.

Como posibles soluciones se plantearon las siguientes:

- La retención de sedimentos en cuencas de retención aguas arriba de la presa, pero debido a la combinación de tamaño (finos y gruesos) y por su alta descarga se necesitan cuencas de retención muy extensas, esta medida es temporal, por lo que se debe combinar con la remoción de dichos sedimentos sin embargo todo esto conlleva un alto costo, por tanto se consideró no viable.
- Remoción del sedimento mediante explosivos, pero esta técnica tiene mucha incertidumbre.
- Dragado: Se requiere la remoción de sedimentos para recuperar y mantener la capacidad de almacenamiento. La excavación seca no se considera factible debido a que el depósito tiene que permanecer en servicio y además al vaciar el embalse se crea condiciones pesqueras desfavorables aguas abajo con grandes impactos ambientales.
- Por lo tanto, la única opción adoptada es la gestión de sedimentos mediante el dragado hidráulico.

#### ***Caso de estudio: Embalse Sefid – Rud, Iran, (Morris y Fan, 2010)***

El embalse Sefid – Rud se encuentra en el río del mismo nombre que consta de una presa de hormigón tipo arco-gravedad construida en 1962, así mismo el embalse posee una central de generación hidroeléctrica cuya capacidad es de 87.5 MW. Según mediciones de descarga de sedimentos en el embalse realizados dos veces a la semana durante periodos de flujo bajo y numerosas mediciones en eventos de crecida, se determinó que ésta constituye un gran problema que implicaba la pérdida de almacenamiento a una tasa anual de un 2.1 %.

La descarga de sedimentos se ha medido con un muestreador integrado de profundidad USDH-48 en línea vertical y que es ajustado según sea necesario luego de cada evento de inundación en el que se producen altos niveles en toda la sección transversal para obtener una muestra representativa (Morris y Fan, 2010). Varias fueron las alternativas consideradas para el control de sedimentos en el embalse:

- Se propusieron doce unidades de dragado (una draga hidráulica flotante y tubería por tierra) más tres unidades de reserva con una capacidad anual de 70 x 10<sup>6</sup> toneladas, que removerían los sedimentos sin contemplar su gestión, para depositarlos en terrazas y sin necesidad de un muro de contención.
- El uso de una draga de sifón, lo que conlleva a la no utilización de una bomba como en una draga convencional. Ésta trabajaría a una distancia de 2 o 3 km de la presa en el río Sefid – Rud.
- Se plantea también el uso de explosivos a prueba de agua, que contempla el uso de tendido de cables que desembocan en tanques llenos de explosivos y que serían capaces de remover de 30 a 50 Mm<sup>3</sup> (millones de metros cúbicos) de sedimento en dos eventos de descarga. Los cables en bancos menores

- serían colocados hasta 3 m bajo tierra y en bancos mayores se pueden realizar agujeros de 100 mm de diámetro a la profundidad requerida.
- La derivación de sedimentos también se menciona en el estudio como un método para obtener la liberación de descargas altas de sedimentos en eventos de crecida, pero por la difícil topografía y al tratarse de un depósito en el que la mayor carga sedimentaria es arena que tiende a asentarse rápidamente, es difícil realizar este proceso para pasar los sedimentos a través del embalse por lo que se descartó esta posibilidad.
  - Una vez analizados los métodos para el manejo de sedimentos en el río Sefid – Rud se ha seleccionado el vaciado estacional y lavado del depósito como alternativa más viable, pues el equipo es más económico que el requerido para el dragado, además de ser fácil de implementar y requiere poco consumo de energía. El vaciado estacional mediante salidas inferiores y el lavado contemplan el llenado durante la época de invierno y con entregas de riego entre los meses de abril y septiembre, considerando que para el funcionamiento de la planta de energía hidroeléctrica ubicada en el río se mantiene un nivel mínimo de 240 m. En el lavado ya no se mantiene el nivel mínimo, en su lugar el depósito se vacía y la descarga se realiza libremente a través de salidas inferiores.

Al efectuar el lavado de sedimentos en el embalse las concentraciones en suspensión medidas fueron de hasta 670 g/l que se depositaron formando un canal principal de descarga en un periodo de 3 años en donde se produjo la mayor exportación de sedimentos. Sin embargo, debido a la rápida movilización del sedimento no consolidado que se depositó en el canal principal en las primeras etapas de recolección, las concentraciones máximas se producen después de haberse formado el canal principal.

Agua arriba se han tomado medidas como el depósito de capas de material cohesivo y no cohesivo con el fin de minorar efectos erosivos. Así también para mitigar los efectos del vaciado de sedimentos del río aguas abajo y con el fin de procurar el menor daño a los sistemas de riego que comparados a los beneficios hidroeléctricos son 10 veces más importantes, se instalaron presas y tomas para desviar las cargas más pesadas de sedimentos puesto que la descarga de sedimentos para la temporada de riego no debe exceder los 5 g/l.

#### **Caso de estudio: Embalse Sanmenxia, China, (Morris y Fan, 2010)**

La represa Sanmenxia se ubica en el tramo medio del río Huanghe y fue construida en los años 1957-1960, a 114 km aguas abajo de la antigua fortaleza de Tongguan situada aguas abajo de la confluencia de los ríos Huanghe y Wei, la represa controla un área de drenaje de 688400 km<sup>2</sup> que corresponde al 92% de la cuenca del río y tiene una altura de 96 m. Factores como la alta erosionabilidad, el uso intensivo de la tierra y prácticas inadecuadas para la conservación del suelo han conllevado que el aporte de sedimentos en el río Huanghe sea la más grande de todos los ríos del mundo. Con el fin de no generar impactos desmedidos con el proyecto, como daños a tierras agrícolas y la reubicación de millones de personas debido al emplazamiento de la presa, la necesidad de establecer una gestión adecuada de sedimentos se volvió sustancial.

Originalmente para el control de sedimentos se implementaron dos medidas que consistían en embalsar el agua continuamente y liberar 35% del flujo sedimentario mediante corrientes de turbidez por medio de 12 puntos de desagüe en 300 m, así también se planteó reducir la entrada de sedimentos a una tasa de 3% al año mediante obras de conservación del suelo para obtener un 60% de reducción en 20 años. Los controles fueron aplicados en dos etapas principales, una de reconstrucción con lo que se obtuvo el equilibrio del flujo de sedimentos y otra en la que se realiza el control de la elevación del lecho del río en Tongguan mediante el aumento de la capacidad de descarga de las salidas de bajo nivel, vaciando y descargando durante la temporada de inundaciones con el fin de controlar las inundaciones extremas, suministrar agua de riego a las comunidades aledañas, limitar la deposición de sedimentos aguas abajo de la presa y preservar el almacenamiento a largo plazo. Los beneficios obtenidos en estas etapas se tomaron como base para realizar mejoras en etapas posteriores, como el equilibrio de la entrada y salida de sedimentos. En este caso la solución a la gran descarga de sedimentos se implementa en seis etapas del proyecto, en donde las dos últimas son en pro de mejorar el sistema:

- Análisis de necesidad de control de la deposición de sedimentos.



- La baja capacidad de evacuación de la presa hizo evidente el requerimiento de una mayor capacidad de desagüe de bajo nivel para controlar la elevación del lecho.
- Se excavan dos túneles de 11 m de diámetro alrededor del pilar izquierdo de la presa para proporcionar una capacidad de lavado adicional. Esto aumentó la eficiencia de liberación a un 82.5 % sin embargo la elevación de lecho en Tongguan no se redujo.
- Ocho de las doce salidas originales son reabiertas por lo que la presa actuó como un reservorio controlado, con lo que se había controlado la elevación del lecho en Tongguan y se consiguió el equilibrio de sedimentos.
- Para aumentar los beneficios del proyecto, los desagües se abrieron para vaciar el embalse al inicio de la inundación para liberar agua barrosa y cerrando los mismos en temporada de no inundación para conservar el agua limpia en ésta época.
- Se generó abrasión en los desagües inferiores, por lo que se implementó disminuir el área transversal de las salidas y la reducción de la capacidad de lavado, así como también se adicionaron dos tomacorrientes para aumentar la capacidad de descarga. Además, desde el año 1980 la generación hidroeléctrica se detiene durante períodos de inundación para evitar abrasiones en la turbina ocasionadas por altas cargas sedimentarias.

Las seis etapas totales muestran la posibilidad de un enfoque gradual para la resolución de un manejo sostenible de sedimentos a un proyecto que originalmente no contempló dicha gestión. Sin embargo, el equilibrio de sedimentos aguas arriba y aguas abajo de la presa Sanmenxia no es lo único que se contempló en la reconstrucción, sino también el equilibrio de sedimentos en el remanso del río que afectaba directamente a la zona Tongguan para evitar inundaciones de gran envergadura y que afectaba directamente a la población.

***Procesos de sedimentación en embalses en ambientes tropicales. Estudios de casos en Costa Rica Y Republica Dominicana (Jiménez et al, 2005.)***

El embalse de Cachí en Costa Rica en sus inicios en 1966 poseía un embalse de 54 hm<sup>3</sup>, contaba con una producción de sedimentos aproximada de 1200 ton km<sup>-2</sup> año<sup>-1</sup>. Debido a la acumulación de sedimentos desde 1973 anualmente se han realizado vaciados de limpieza, operación que ha permitido descargar una gran parte de los sedimentos acumulados y mantener el 80% del volumen inicial luego de sus 38 años de funcionamiento. Aguas abajo tenemos el embalse de Angostura, que inició su funcionamiento en el año 2001 y tiene una capacidad de 15 hm<sup>3</sup> con un arrastre de sedimentos de 2348 ton km<sup>-2</sup> año<sup>-1</sup>. Debido al gran arrastre que tiene se requiere de un manejo de sedimentos que incluyen obras de vaciado y limpieza, con operación coordinada de ambos embalses y el manejo de niveles para minimizar la deposición (Jiménez *et al.*, 2005). Por otro lado, el embalse Valdesia pertenece a la República Dominicana, suple aproximadamente el 40 % de agua potable de la capital. Los huracanes son factores muy importantes en este país, ya que tienen un impacto directo sobre eventos extremos de precipitación y a su vez también una tasa muy alta de producción de sedimentos.

Un parámetro básico para juzgar el problema de la sedimentación en los embalses es la razón de almacenamiento  $K_t$ :

$$K_t = \frac{V}{W_s} \quad \text{Ecuación 2-5}$$

en donde:

$V$  = Capacidad total del embalse (hm<sup>3</sup>)

$W_s$  = Carga anual de sedimentos (hm<sup>3</sup>)

Lo recomendado por los estándares Nacionales de China indican que cuando la razón de almacenamiento de un embalse es menor que 100 a 50, la sedimentación debe considerarse como un problema muy serio y debe estudiarse cuidadosamente (Tan, 1994).

La cantidad de sedimentos que ingresan año con año al embalse es muy variable y está fuertemente afectada por la magnitud y características de las crecientes que se hayan presentado durante el año previo, así como de la existencia o no de fenómenos de movimientos en masa.

En el embalse Cachi, en octubre de 1973 se realizó el vaciado a través de la descarga de fondo, para limpiar los sedimentos acumulados, ésta operación fue muy exitosa, habiéndose realizado durante épocas de lluvia, casi todos los años siendo así 26 veces hasta el año 2003. Lo que ha permitido mantener el volumen del embalse que se estima en un 78 % del volumen original de 42 millones de m<sup>3</sup>. El embalse se vacía en dos etapas: el vaciado lento y el vaciado final, la primera etapa consiste en la disminución de nivel del embalse hasta el nivel mínimo de operación. En la segunda etapa se abre la compuerta de fondo para expulsar todo el volumen de agua que queda en el embalse, que se da en aproximadamente unas 5 horas hasta el momento en que el río empieza a escurrir libremente dentro del embalse. La descarga máxima de los sedimentos ocurre inmediatamente después de la segunda etapa con un tiempo de 3 a 5 horas. Estimaciones aproximadas muestran que, si no se procede con las limpiezas de los embalses, se pierde la mitad del volumen inicial del embalse en unos 20 años, por lo tanto, con las limpiezas ejecutadas se dice que en los próximos 40 años se perderá un 15 % del volumen adicional.

En el embalse Angostura, con una cuenca de un 50 % que está cubierto de bosques y con un buen estado de conservación, el río Reventazón arrastra una carga de sedimentos en suspensión, en su paso por el proyecto se estima unos 3 millones de toneladas anuales. Los vaciados de Cachi contribuyen en cerca de un 22 % de los sedimentos en suspensión. El cálculo de la forma en que se depositan los sedimentos a lo largo de los años de operación es bastante complicado, debido a la incertidumbre en cuanto al ingreso real de los sedimentos (Jiménez *et al.*, 2005). Se plantearon 3 estrategias de operación a seguirse para disminuir los impactos causados por la sedimentación al embalse:

- La operación a niveles bajos durante la época de lluvia en la zona, donde el objetivo es minimizar la deposición de sedimentos en el volumen útil del embalse.
- Vaciado y limpieza del embalse.
- Instaurar un sistema de monitoreo continuo de la evolución de la sedimentación en el embalse mediante batimetrías.

En el diseño de Angostura se tuvo una precaución, se habían dejado previstas dos compuertas de limpieza, de 4 m de ancho por 5.5 m de altura que se ubican junto a la toma de aguas. Sin embargo, dado que Angostura es una central muy significativa, por lo tanto, los vaciados de los embalses se realizan de viernes a domingo, y con sincronía con los de Cachi. Pero también tiene impactos ambientales donde se ha observado la mortalidad de especies acuáticas aguas abajo. Por ejemplo en Francia uno de los principales impactos observados ha sido la mortandad de los peces principalmente por la reducción del oxígeno disuelto en el agua (Morris y Fan, 1997).

El embalse Valdesia en República Dominicana, fue la primera gran infraestructura en ser inaugurada, en 1976, donde el vertedero está compuesto de 5 compuertas planas de 24 m de largo por cinco de altura, diseñadas para una avenida con un caudal influyente de 7200 m<sup>3</sup>/s.

Los movimientos en masa resultantes de la inestabilidad de laderas, de construcción de caminos y otras tipologías de erosión parecerían tener mucha importancia en la producción total de sedimentos (Nagle, 2000).

En el embalse prácticamente la única información de mediciones de sedimentos son las batimetrías realizadas en los 1979, 1981, 1991 y 2000. Se ha determinado que en la cuenca del río Nizao donde se encuentra el embalse, y en general en otras cuencas de República Dominicana en la que existen embalses, se conoce que tienen una tasa de pérdida de volumen anual promedio del 1.5%. La medida más importante para el control de sedimentación fue la construcción del embalse Jigüey aguas arriba.

Prácticamente la única forma de disminuir la pérdida de volumen de los embalses es mediante vaciados completos anuales, pero a su vez, tiene complicaciones ambientales aguas abajo.

**Caso de estudio: Embalse y presa Gebidem, Suiza, (Morris y Fan, 2010)**

La presa Gebidem es una estructura de tipo arco que se encuentra en el río Massa que es un afluente del Ródano justo aguas arriba de Brig, en Suiza.

Inicialmente se consideró una gran cantidad de alternativas para manejo de sedimentos, pero se descartó una serie de opciones, quedando tres alternativas a estudiarse finalmente:

Derivación de sedimentos: los flujos de sedimentos se descargan a través de un túnel de flujo libre de gran diámetro que sale de la parte inferior de la presa.

Dragados continuos: implica el uso de draga de succión de descarga en puntos estratégicos en diferentes niveles de la presa.

Vaciado y lavado: es la alternativa menos costosa debido a que utiliza obras de ingeniería previstas (la salida de vaciado) y no se necesita de estructura adicional, en esta alternativa también se necesita la menor cantidad de agua. Se realiza un vaciado completo del depósito y permite el flujo libre a través de las salidas inferiores durante un período de 2 a 4 días. El uso de agua durante el lavado se estimó originalmente en  $6 \text{ a } 8 \times 10^6 \text{ m}^3$ , pero en la práctica tiene un promedio de menor que  $3 \times 10^6 \text{ m}^3$ . Se tiene un flujo regular por lo que no ha existido un problema de acumulación excesiva de sedimento delante de las compuertas inferiores, y no se utilizan las tuberías de chorro de agua proporcionadas para desalojar el sedimento.

Sin embargo, las altas cargas de sedimentos en suspensión temporales y deposición de sedimentos finos en el lecho del río ha causado algunos inconvenientes temporales en las tomas de suministro de agua aguas abajo, y la muerte de peces en el río Ródano también se han asociado con el lavado.

La combinación de la liberación de sedimentos y la reducción de la descarga debido a la desviación para la producción de energía ha afectado fuertemente el canal de Massa aguas abajo de la presa en donde existe una deposición de sedimento fino.

A través de modelos físicos y numéricos, Boillat (1994) concluyó que el problema de la deposición no podía ser modificado alterando el canal, y recomendó aumentar los flujos para incrementar la capacidad de transporte a través del canal.

**3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN SOBRE CASOS DE ESTUDIO**

La reducción de la carga de sedimentos trae consecuencias aguas abajo como cambios de temperatura, falta de nutrientes, entre otros. La degradación del río puede aumentar las tasas de erosión en los bancos y aumentar la socavación en puentes aguas abajo. Pero el retener sedimentos en los embalses también puede ayudar a ecosistemas aguas abajo, que son sensibles a los niveles elevados de los mismos (Morris y Fan, 2010).

Una vez interpretada la problemática del manejo de sedimentos en el país en cuanto a cuencas hidrográficas andinas, se tiene que el desarrollo de técnicas apropiadas es aún incipiente y poco tratado. En el caso de estudio de la cuenca del Paute (6439 km<sup>2</sup>) se vuelve imperativo plantear medidas para la reducción del flujo de sedimentos producidos en la misma, pues en esta cuenca está situado uno de los mayores proyectos hidroeléctricos en cadena con los que cuenta el país, el proyecto Paute Integral. Formando parte de este complejo hidroeléctrico se encuentran el embalse Mazar, Amaluzá y Cardenillo que sirven a las centrales: Paute Mazar; Paute Molino que es la central más grande y antigua del proyecto; central Cardenillo que aún no está construida.

Los embalses analizados para la problemática en mención son el embalse Mazar y el embalse Amaluzá, pues únicamente se dispone de datos batimétricos de estos dos embalses hasta la fecha. Teniendo mayor confiabilidad de las mediciones realizadas en el embalse Amaluzá, debido a que se existen mayores registros continuos en el mismo (57 batimetrías, siendo la última realizada en diciembre del 2013, Anexo 2), mientras que en el embalse Mazar sólo se ha realizado una medición batimétrica (realizada en noviembre del 2013, Anexo 3), con el objetivo de controlar el volumen de capacidad perdido por acción de sedimentos acumulados.

Partiendo del parámetro básico que indica la razón de almacenamiento  $K_t$  (Jiménez et al., 2005) y haciendo uso de lo recomendado por los estándares Nacionales de China, que indican que cuando la razón de almacenamiento de un embalse es menor que 100 a 50, la sedimentación debe considerarse como un problema muy serio.

Siendo  $K_t$  la razón de almacenamiento (Ecuación 2-5), que constituye un parámetro para juzgar el problema de la sedimentación en los embalses, se tiene:

$$K_t = \frac{V}{W_s}$$

donde:

$V$  = Capacidad total del embalse ( $\text{hm}^3$ )

$W_s$  = Carga anual de sedimentos ( $\text{hm}^3$ )

$W_{s\text{Mazar}} = 2.75 \text{ hm}^3 \text{ año}^{-1}$  (CELEC EP, 2013b)

$W_{s\text{Amaluza}} = 1.81 \text{ hm}^3 \text{ año}^{-1}$  (Dato calculado en la tabla 3, antes del funcionamiento del embalse Mazar).

$W_{s\text{Amaluza}} = 0.12 \text{ hm}^3 \text{ año}^{-1}$  (CELEC EP, 2013)

	Período	V ( $\text{hm}^3$ )	Ws ( $\text{hm}^3$ )	Kt
Amaluza	1983 - 2010	120.00	1.81	66.30
	2010 - 2013	120.00	0.12	1000.00
Mazar	2010 - 2013	410.00	2.75	149.10

Tabla 4. Razón de almacenamiento en los embalses Amaluza y Mazar

En la tabla anterior se observa que el embalse Amaluza tiene un problema de sedimentación en el período de 1983 – 2010 por lo que al implementar la presa Mazar se produjo un buen manejo en cuanto a la carga sedimentaria, pues luego de la construcción de la misma, la razón de almacenamiento para el embalse Amaluza ya no representa un problema serio.

Independientemente de lo obtenido con el procedimiento anterior, es menester tener en cuenta que la sedimentación a largo plazo siempre representa un problema en las cuencas.

Existe gran incertidumbre al momento de realizar el cálculo de la disposición de los sedimentos a través de los años en el embalse, pues ésta varía acorde a diversos factores como fenómenos naturales (lluvias excesivas, fuertes vientos), topografía, erosión, geometría del embalse, usos del suelo, vegetación, construcción de carreteras y senderos, geología del suelo, entre otros. Sin embargo, algunos de estos son más fáciles de detectar y controlar de manera que se conviertan en una herramienta de ayuda directa para el control y manejo de la producción de sedimentos en la cuenca.

Uno de los acontecimientos de mayor relevancia ocurridos en la cuenca del Paute fue el Deslizamiento de la Josefina (Marzo de 1.993) que provocó el taponamiento del río Paute a la altura del río Jadán, estableciéndose un dique de más de 100 m de altura con una longitud de 150 m, este dique provocó por un lado la inundación de gran parte del valle de Challuabamba con los consiguientes daños, el desfogue de las aguas a su vez provocó la más grande transportación en masa de sedimentos hacia el proyecto Paute Integral quedando un dique remanente de aproximadamente 35 m que las autoridades de la época han logrado estabilizar con la construcción de estructuras (umbrales) de caída transversales en el tramo comprendido entre la Josefina (Paute D.J. Jadán) hasta la junta con el río Gualaceo los mismos que a través de un mantenimiento permanente han logrado la estabilización del cauce en el tramo mencionado, esta estabilización de alguna manera logra detener el arrastre de parte de los sedimentos que se encuentran almacenados en el sector.

La producción de sedimentos en la cuenca del río Paute ha tenido en el tiempo un comportamiento más o menos constante, esto debido a que si bien en la cuenca alta desde los inicios del proyecto Paute, la Unidad de Manejo de la Cuenca del río Paute (UMACPA, 1995) realizó innumerables trabajos de



estabilización, reforestación, incluyendo la adquisición de terrenos clasificados como de exclusión, así como la construcción de innumerables diques de contención de sedimentos en quebradas y que en su momento lograron controlar de alguna manera la producción de sedimentos, acciones antrópicas como la construcción de la vía a Mazar han permitido una colonización de vastos terrenos ubicados en las laderas del embalse en las cuales a parte de la erosión que provoca la construcción de vías en si se han deforestado y ha incrementado la frontera agrícola, dando como consecuencia el incremento de la producción de sedimentos casi en la misma proporción que la reducción lograda con la intervención de la UMACPA de tal manera que en los actuales momentos la tasa de producción de sedimentos para Mazar es similar a la histórica.

Varias son las estrategias aplicadas para el manejo de sedimentos en cuencas hidrográficas andinas y montañosas alrededor del mundo, que sientan un precedente para la implementación de las más adecuadas en nuestro país.

Por otra parte, la revegetación es también una opción a aplicar aguas arriba del proyecto, pues al ser ésta una función no lineal con la producción de sedimentos, implicaría que con un pequeño aumento de la cobertura vegetal se puede generar un gran cambio en la producción de sedimentos debido a que se alteraría la rugosidad del suelo, provocando así el estancamiento de sedimentos y la disminución del flujo de los mismos hacia el río Paute. Esta opción de aumentar la cobertura vegetal para soportar el embate del flujo de sedimentos debido a erosión se plantea mediante el sembrado gradual de vegetación propia de la zona, tal como eucalipto y pino (Vanacker *et al.*, 2007a) en las zonas más degradadas de la cuenca, mismas que pueden ser determinadas por fotografías aéreas y validadas mediante encuestas a los habitantes de la zona.

Al tratarse de una cuenca andina montañosa, la cuenca del río Paute, cuenta con barrancos formados durante eventos de lluvia que conforman un sistema de transporte natural de sedimentos y cuya eficiencia puede verse reducida mediante la revegetación no controlada, por lo que analizar la distribución espacial de la vegetación aguas arriba del embalse Mazar implica la restauración de vías de transporte de sedimentos en la cuenca alta y media del río Paute. El control de la revegetación planteada como solución a disminuir la cantidad de sedimentos en el sistema fluvial, supone un mejor manejo de los sedimentos que contribuyen a la carga sedimentaria de la cuenca y que trae consecuencias como problemas de abrasión en las turbinas de la central Mazar, por lo tanto, ocasiona problemas en la generación eléctrica.

Por la variabilidad de la distribución espacial de la vegetación así como factores ya mencionados anteriormente, la cuenca del río Paute también posee una gran variabilidad espacial en la producción anual de sedimentos que fluctúa entre 26 y 15100 mg km<sup>2</sup> año<sup>-1</sup> (Molina *et al.*, 2008), es por esto que realizar batimetrías únicamente aguas arriba del embalse Mazar y aguas abajo del proyecto Cardenillo no es suficiente información para adoptar medidas de manejo para contrarrestar los efectos de la alta carga sedimentaria en todo el proyecto, por lo que abarcar cada tramo del proyecto durante las mediciones es necesario.

En el embalse Amaluzá, aguas arriba de la central Molino, ha sido necesario implementar el dragado de sedimentos como medida de emergencia para contrarrestar el alto grado de erosión de la cuenca del Río Paute, debido a que la sedimentación producida en este embalse provoca aproximadamente 42,11% de pérdida de la capacidad de volumen de embalsamiento obtenida en la última batimetría realizada en diciembre del 2013. A pesar de que el dragado es un procedimiento costoso en el cual se invierten millones, se adopta como adecuada debido a que es preferible realizar el dragado a permitir el desgaste y destrucción de las turbinas de los proyectos hidroeléctricos. Es por esto que, aunque se han realizado acciones de emergencia para poder operar los proyectos sin ocasionar daños mayores, no se han encontrado medidas óptimas para el manejo propio de sedimentos hasta la fecha.

El efecto del movimiento en las laderas con pendiente, aguas abajo de embalses puede provocar que corrientes con baja capacidad de transporte ocasionen una deposición de sedimentos significativa que conllevan la formación de presas que una vez formadas pueden desencadenar inundaciones aguas arriba y aguas abajo, así como también inciden en la cubierta vegetal. El proyecto Paute Integral al encontrarse en una zona andina también está susceptible a estos movimientos, los cuales pueden afectar en mayor



parte aguas arriba del embalse Mazar, Amaluza y Cardenillo, incluyendo aguas abajo de la central Cardenillo.

Según la mayoría de estudios realizados, la vegetación es la más fuerte de las estrategias a adoptarse cuando de manejo de sedimentos se trata. Es así que a más de constituir un método de “captura y retención”, forma también un medio para el enrutamiento de sedimentos que es aplicable a lo largo de la cadena de los embalses que constituyen el proyecto con el fin de equilibrar el flujo de sedimentos.

Medidas correctivas aplicadas a proyectos hidroeléctricos ya construidos y que inicialmente no contemplaron un plan de manejo de sedimentos, ya han sido estudiadas e implementadas en otros países con el fin de alargar la vida útil de presas y centrales hidroeléctricas. Un ejemplo de ello es la colocación de material cohesivo y no cohesivo aguas arriba del embalse (Morris y Fan, 2010) para disminuir el efecto nocivo de la erosión. Aplicar este método aguas arriba del embalse Mazar contrarrestaría la carga de sedimentos que fluye hacia la parte inicial del proyecto hidroeléctrico, sin embargo, realizar un procedimiento como éste requiere el uso de maquinaria adicional que lógicamente genera un costo de operación, mismo que no se analiza en éste estudio.

Además de esto, en los embalses Mazar y Amaluza (No se menciona Cardenillo pues aún está en fase de estudios definitivos), el manejo de sedimentos puede implementarse también mediante obras como compuertas de fondo para realizar el vaciado y limpieza como lo mencionado por Morris y Fan (2010) de manera que se reduzca la deposición de material sedimentario con lo cual se controlarían también los niveles de los embalses. El vaciado preferentemente ha de realizarse en la época de invierno (enero a mayo), sin embargo, al aplicar esta medida es necesario realizar monitoreos continuos aguas abajo con el fin de preservar la biodiversidad acuática. Mazar cuenta con desagües de fondo sin embargo no se opera estacionalmente sino depende de los volúmenes de agua que ingresan al embalse en cada evento.

#### 4. NECESIDADES EN EL ECUADOR EN CUANTO A MANEJO SUSTENTABLE DE SEDIMENTOS

En todo el mundo los lagos y ríos contienen aproximadamente 93000 km<sup>3</sup> de agua dulce y representan el 0.27% del total de recursos de agua dulce del planeta, el almacenamiento de aguas subterráneas es mayor, pero de difícil acceso porque la mayoría se encuentra en formaciones demasiado profundas, por lo que es imperante contar con planes y estrategias que prevean un uso del agua a conciencia, de manera que se eviten daños en gran magnitud a los cauces naturales. Todos los ríos arrastran sedimentos que se van acumulando en los embalses y una amplia gama de problemas relacionados con los sedimentos se puede producir aguas arriba de las presas como consecuencia de la retención de sedimentos (Morris y Fan, 2010).

En el Ecuador las campañas de monitoreo de la producción de sedimentos son muy escasas, lo que conlleva una deficiencia en cuanto al planteamiento e implementación de medidas sustentables para el manejo de los mismos.

El manejo sostenible ya es una “mejor práctica de la ingeniería” de hoy; no es un problema para resolver en el futuro (Morris y Fan, 2010). En nuestro país no existen estrategias de manejo de sedimentos amigables con el medio ambiente, con excepción de la revegetación, que, aun así, no ha sido estudiada a fondo debido a la gran variabilidad de parámetros que inciden en la producción de sedimentos. Sin embargo, es posible la transición hacia prácticas de manejo sostenible de sedimentos mediante una buena planificación con resultados a largo plazo que además de requerir cambios operacionales y modificaciones estructurales, también genera beneficios mayores y menos impacto ambiental.

- Debido a la poca relevancia en cuanto al manejo de sedimentos en Ecuador, es necesario cambiar el modelo de “vida útil” usado actualmente en proyectos de diseño en generación hidroeléctrica, hacia un modelo de “operación sostenible” pero evitando la construcción de proyectos de reemplazo que signifiquen mayores inversiones económicas.
- Creación de un programa de investigación en los embalses, de modo que se puedan realizar monitoreos de forma continua y con mayor periodicidad de la carga sedimentaria, lo que significa un mayor conocimiento de la incidencia en cuanto a la producción de sedimentos en las cuencas nacionales que se



traduciría en las primeras pautas para adoptar las mejores medidas sustentables para el manejo de sedimentos.

- La necesidad de implementar un programa severo de conservación y revegetación del suelo en la cuenca del río Paute, de manera que influyan directamente en la producción de sedimentos, tomando en cuenta las características propias del suelo de la región, evitando deteriorar la vegetación endémica. La aplicación de estos programas generaría una buena disponibilidad de nutrientes, capacidad de absorción y enriquecimiento del sistema de la vida del suelo.
- Creación de un Plan de Operación Sostenible, de modo que no sólo se tome en cuenta el manejo sustentable de sedimentos en el período de diseño del proyecto, sino también en la etapa de operación y mantenimiento del mismo, con lo que se conseguiría alargar su vida útil.
- Necesidad de creación de un programa para el control de los cauces, así como la corrección torrencial, con la finalidad de disminuir la carga sedimentaria que desemboca en el embalse Amaluzá. Se deben proteger las riberas de los cursos fluviales y las obras de infraestructura existentes en los mismos, a través de muros de gaviones, longitudinales y vegetación (UMACPA, 1995).
- En la cuenca del Paute se encuentran áreas sometidas a distintos tipos de erosión, como la erosión de escorrentía superficial, erosión con deslizamientos relacionados con infiltración de lluvias y áreas con deslizamientos o derrumbes (UMACPA, 1995), debido a éstos fenómenos es necesario a más de revegetar las zonas descubiertas por el flujo de sedimentos, también reforestar éstas áreas con el fin de regenerar espacios producidos por pastoreo excesivo o zonas abandonadas.
- Creación de programas de estudio de “costo-beneficio” que evalúen la conveniencia de construir presas para irrigación aguas arriba de los embalses, que, de dar resultados positivos, constituiría una forma rápida y segura de reducir el flujo de sedimentos.
- Campañas de reconocimiento de zonas vulnerables, para posteriormente procesar los datos recogidos con el fin de identificar las zonas de mayor aporte de carga sedimentaria y enfocar esfuerzos de manejo hacia esas zonas.
- Contemplar un plan de contingencia mediante estrategias de mitigación (vegetación) o anticipación de patrones de sedimentación futuros (simulaciones), con el propósito de realizar modificaciones de las medidas de manejo de sedimentos conforme aumenta la sedimentación en el embalse.
- Complementar cualquier estrategia de manejo de sedimentos adoptada o a adoptar en una cuenca hidrográfica, con un plan estricto de mitigación ambiental, que considere evitar procesos como el dragado o limpieza del embalse durante períodos de mayor sensibilidad biológica que pueden ser determinados con análisis de laboratorio.
- Implementar estudios con Modelación Numérica como herramienta de ayuda para prever daños y la colmatación de los embalses. Ello con la finalidad de tomar decisiones que aporten a la correcta operación de los proyectos hidroeléctricos, así como también definir el tiempo en el que será necesario implementar medidas de control de sedimentación.

## 5. RECOMENDACIONES PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN PLAN NACIONAL DE MANEJO DE SEDIMENTOS

Se pueden plantear algunas estrategias para un manejo de sedimentos en las represas, donde se ha de realizar un análisis para optar por la mejor opción dependiendo de cada uno de los casos, en general se pueden nombrar las siguientes recomendaciones (Morris *et al.*, 2015):

- Reducir influjo de sedimentos.
- Paso de sedimentos.
- Remoción de sedimentos
- Adaptación a la sedimentación.
- Monitoreo cada cierto tiempo (necesario para todas las opciones).

### **Reducir influjo de sedimentos.**

Se debe tener un control de erosión, es costoso, debido a que puede envolver a miles de dueños de terrenos, y a su vez, es un proceso lento y también su efectividad no puede ser garantizada.

También se puede atrapar sedimentos aguas arriba del lugar con problemas de sedimentación, como se observa en el caso del embalse Amaluzá, se ha construido la represa Mazar para evitar el paso de sedimentos, así mismo se ha observado una pequeña cantidad de sedimentos finos que han llegado a Amaluzá, pero la cantidad no es muy representativa. Por lo que se puede decir que la construcción de la represa Mazar fue una buena opción.

### **Paso de sedimentos.**

Se puede utilizar un desvío de sedimentos (almacenando fuera del cauce), es muy efectivo, es el método de preferencia de ser posible, pero no elimina por completo la sedimentación. Existe una reducción muy alta de los sedimentos.

Reducción de nivel del embalse (“sluicing”), donde el nivel del embalse se reduce durante las crecidas para así maximizar la velocidad del flujo a lo largo de todo el embalse y minimizar la sedimentación. Funciona en embalses de cualquier tamaño, pero su eficiencia varía considerablemente dependiendo de la hidrología del lugar, así como la configuración del embalse. Funciona mejor en embalses largos y estrechos. (Morris, *et al.*, 2015)

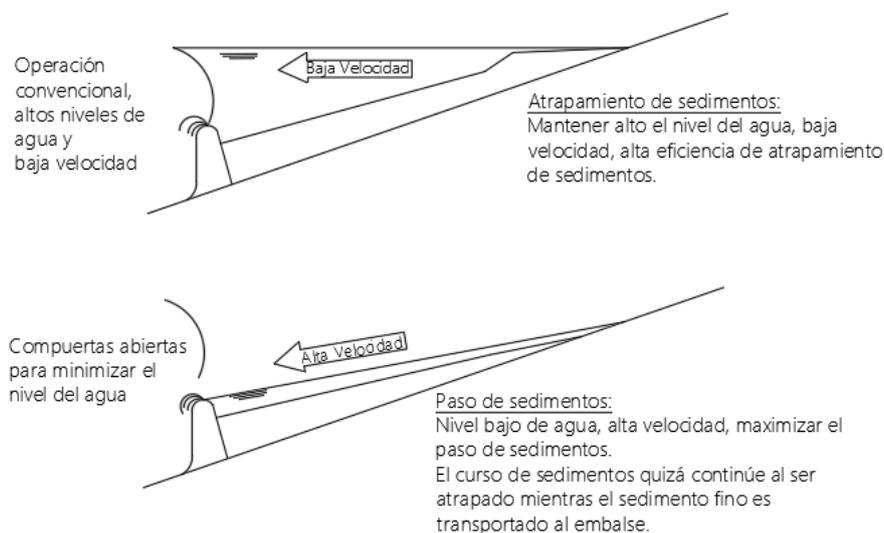


Figura 9. Reducción de niveles en crecidas. (Morris et al., 2015)

Descargar corrientes de turbidez, a través de las turbinas o compuertas inferiores (debe existir corrientes de turbidez hacia la presa), no en todos los casos se transportan cantidades importantes de sedimentos, se requiere descargas a niveles bajos. La eficiencia va disminuyendo con el tiempo a medida que el embalse se llene de sedimentos, pero también depende de la configuración del embalse. Se tiene un impacto mínimo en la operación de la represa. Una de las ventajas es que no se necesita un vaciado del embalse para realizar la descarga.

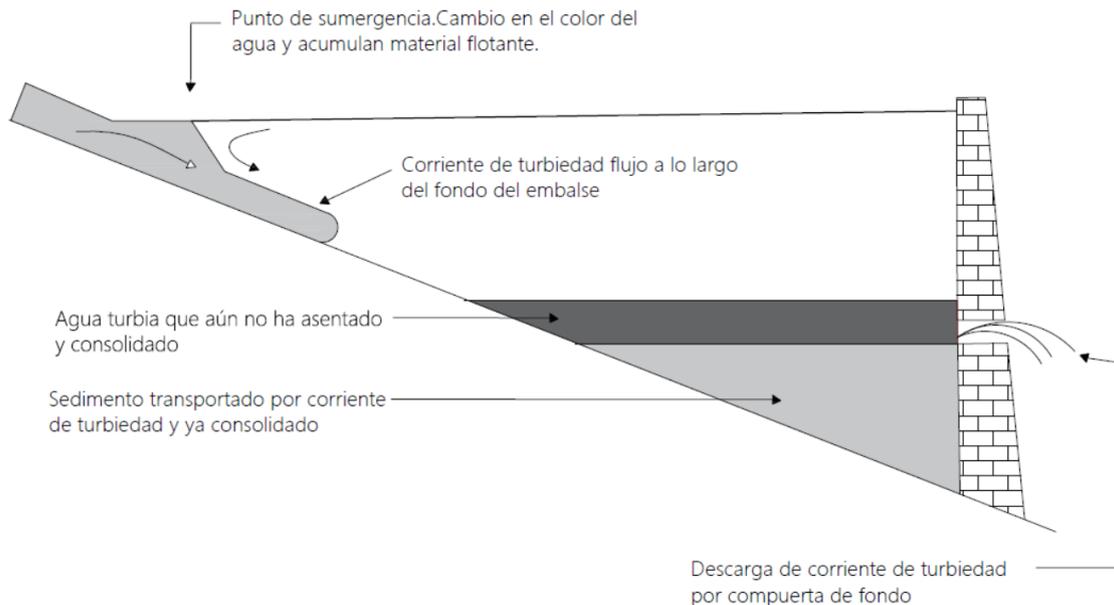


Figura 10. Esquema corriente de turbidez. (Morris et al., 2015)

### Remoción de sedimentos

El dragado es también una de las opciones a realizarse, pero tiene como desventaja que por lo general es muy costoso y es difícil encontrar un lugar para colocar los sedimentos extraídos para una fuente de sedimentos que prácticamente nunca se acaba. Se debe seleccionar una draga con un tamaño adecuado, basándose en que exista la mayor eficiencia.

Vaciado del embalse y purga de sedimentos, puede durar varias semanas para llevarlo a cabo, la socavación remueve sedimentos y son descargados a través de una compuerta de fondo. Las desventajas de usar esta estrategia es que requiere tener el sistema fuera de operación durante la purga, necesita grandes cantidades de agua, la efectividad es limitada en muchas de las veces y al tener altas concentraciones de sedimentos puede acabar con la flora y fauna aguas abajo de la represa.

### Monitoreo

Se requiere un programa de monitoreo frecuente para observar de una manera más clara el comportamiento de cada embalse y así dar las mejores soluciones. Se deben obtener datos fiables de campo como los estudios batimétricos, luego de realizar varios estudios se puede establecer las tasas de sedimentación ya que la pérdida de capacidad de los embalses no es uniforme en el tiempo, por lo que es fundamental mantener una consistencia en la metodología de los estudios de batimetrías. Así también, se debe realizar un muestreo de sedimentos y tener una aproximación de los diferentes tamaños de sedimentos que llegan a los embalses.

## 6. CONCLUSIONES

De estudios anteriores (Boillat, 1994) se sabe que al cambiar la geometría del río no se consigue corregir el problema de la deposición de sedimentos en el lecho, debido a que el factor que más influye sobre éste es la capacidad de transporte del flujo por consiguiente es la capacidad la que debe aumentarse.

Ciertamente las medidas a adoptarse toman en cuenta la incidencia de la carga de sedimentos en la cuenca del Paute y disminuirían la probabilidad de daños en el proyecto Paute Integral, sin embargo, aguas abajo del proyecto (salida de la central Cardenillo) también deben adoptarse estrategias para la conservación de especies naturales.

En el embalse Amaluzá, cuya capacidad de embalse es de 120 hm<sup>3</sup>, el manejo de sedimentos mediante dragado remueve cada año cerca de 900000 metros cúbicos de material arenoso y piedras (Diario El



Tiempo, 2009), éste se concibió desde la etapa de diseño sin embargo al ser un método costoso es menester adoptar un procedimiento parecido al aplicado en California que consiste en el enrutamiento de sedimentos durante eventos de inundación en el embalse, teniendo en cuenta el tamaño del sedimento a enrutar pues si es demasiado fino es más difícil de capturar.

Operar las compuertas pertenecientes a las represas a nivel alto durante crecidas permite el paso libre de sedimentos y reduce el riesgo de erosión aguas arriba del embalse, caso contrario el agua se represa en grandes cantidades socavando las riberas del río.

Cambiar el concepto de “vida útil” en el diseño de proyectos hidroeléctricos a un concepto de “operación sostenible”, es posible incluso en proyectos ya construidos, ello con el fin de mejorar operaciones de equilibrio con el ambiente y alterar en la menor medida el medio de emplazamiento del proyecto.

La adaptación de estrategias de operación sostenible genera indicadores de mejora de ingeniería para los sistemas hidroeléctricos.

En el Ecuador la necesidad de implementar un Plan de Operación Sostenible no sólo implica realizar batimetrías que indiquen la pérdida de almacenamiento en el embalse como único indicador de control de sedimentos, sino también contar con un itinerario que comprenda estudios a detalle mediante modelación con distintos parámetros para de esa forma aplicar el mejor plan de ejecución para un buen manejo de sedimentos.

La protección del suelo del impacto directo de las aguas lluvia tiene un efecto grande en reducir las tasas de erosión, por lo que la vegetación es un factor muy importante para el control de la erosión; sin embargo, al no lograr una estabilización completa con un control vegetativo, el proceso erosivo será iniciado nuevamente.

Pequeñas obras para el control de cárcavas son muy costosas y además poco efectivas a largo plazo si no se tiene un mantenimiento adecuado, por lo tanto, la vegetación es la mejor estrategia.

Un trabajo conjunto entre la comunidad y el estado son de vital importancia para implementar programas con miras a un manejo de sedimentos sustentable en las cuencas hidrográficas del país, en el que no solamente se contemplen daños directos como el desgaste y abrasión de maquinaria en centrales eléctricas, sino daños ambientales y sociales como el impacto a la agricultura, vegetación endémica y actividades como la pesca.

La capacitación a la población afectada por la construcción de presas y centrales hidroeléctricas enfocada a cambiar costumbres poco sustentables, como los métodos de cultivo tradicionales en el sentido de la pendiente o el reducido período de descanso entre siembra y siembra, es un medio poderoso para lograr inculcar prácticas conservacionistas que generarán mejoras en el sistema de manejo de sedimentos a largo plazo.



## 7. BIBLIOGRAFÍA

Armando Molina, Verle Vanacker, Vincent Balthazar, Diego Mora, Gerard Govers, 2002. Complex land cover change, water and sediment yield in a degraded Andean environment 11.

Boillat, 1994. Barrage de Gebid em, Modifications du Chenal de C hasse de l e Massa. Étude Expérimentale sur Modèle Hydraulique.

Carol P. Harden, 1993. Land use, soil erosion, and reservoir sedimentation in an Andean drainage basin in Ecuador.

CELEC EP, 2016. CELEC EP (Corporación Eléctrica del Ecuador).

CELEC EP, 2010. Informe de actividades ejecutadas por el área de dragado e hidrología durante el año 2010.

CELEC EP, CONSORCIO PCA, 2013. PROYECTO HIDROELÉCTRICO PAUTE-CARDENILLO.

CELEC EP, Ing. Luis Jerves, 2013a. CELEC, EP: Informe sobre la sedimentación del Embalse Amaluza (Batimetría No.57).

CELEC EP, Ing. Luis Jerves, 2013b. CELEC, EP: Informe sobre la sedimentación del Embalse Mazar (Batimetría No.1).

Diario El Tiempo, 2009. 42% del embalse de Paute tiene sedimentos. El Tiempo.

Dr. Gregory L. Morris, PE, Ing. Juan Portalatín, PE, 2015. Manejo de la Sedimentación en Embalses Hidroeléctricas.

Harden, C.P., 2001. Soil Erosion and Sustainable Mountain Development. Mt. Res. Dev. 21, 77–83. doi:10.1659/0276-4741(2001)021[0077:SEASMD]2.0.CO;2

HIDROPAUTE, Darío Ordoñez Espinoza, 2008. Hidropaute 2008.

Informe Presidencia, 2016. Inauguración del proyecto Hidroeléctrico Sopladora. Cuenca del Paute.

Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos, 2015. El cambio de la matriz energética con responsabilidad ambiental.

Molina, A., Govers, G., Cisneros, F., Vanacker, V., 2009. Vegetation and topographic controls on sediment deposition and storage on gully beds in a degraded mountain area. Earth Surf. Process. Landf. 34, 755–767. doi:10.1002/esp.1747

Molina, A., Govers, G., Poesen, J., Van Hemelryck, H., De Bièvre, B., Vanacker, V., 2008. Environmental factors controlling spatial variation in sediment yield in a central Andean mountain area. Geomorphology, Human and climatic impacts on fluvial and hillslope morphology 98, 176–186. doi:10.1016/j.geomorph.2006.12.025

Morris, G.L., Fan, J. (Eds.), 2010. Reservoir sedimentation handbook: design and management of dams, reservoirs, and watersheds for sustainable use. McGraw-Hill, New York.

Morris & Fan, 1997. Reservoir sedimentation handbook: design and management of dams, reservoirs, and watersheds for sustainable use. NY, USA.

Myriam Calderón Cancelada, 2016. Análisis de vulnerabilidad al cambio climático de la cuenca Paute (Ecuador).

Nagle, 2000. Los efectos de un huracán sobre la pérdida de suelos en parcelas cultivadas en una cuenca tropical de montaña.

Oscar Jiménez, Hector Daniel Farias, Carlos Rodriguez, 2005. PROCESOS DE SEDIMENTACION EN EMBALSES EN AMBIENTES TROPICALES. ESTUDIOS DE CASOS EN COSTA RICA Y REPUBLICA DOMINICANA.

Tan, 1994. Reservoir Design and Management to Control Sediment.



- UMACPA, 1995. Proyecto de Conservación y manejo de la Cuenca del Río Paute. Cuenca.
- Vanacker, V., Bellin, N., Molina, A., Kubik, P.W., 2014. Erosion regulation as a function of human disturbances to vegetation cover: a conceptual model. *Landsc. Ecol.* 29, 293–309. doi:10.1007/s10980-013-9956-z
- Vanacker, V., Blanckenburg, F. von, Govers, G., Molina, A., Poesen, J., Deckers, J., Kubik, P., 2007a. Restoring dense vegetation can slow mountain erosion to near natural benchmark levels. *Geology* 35, 303–306. doi:10.1130/G23109A.1
- Vanacker, V., Molina, A., Govers, G., Poesen, J., Deckers, J., 2007b. Spatial variation of suspended sediment concentrations in a tropical Andean river system: The Paute River, southern Ecuador. *Geomorphology, Human Impact and Geomorphology in Tropical Mountain Areas* 87, 53–67. doi:10.1016/j.geomorph.2006.06.042
- Vanacker, V., Molina, A., Govers, G., Poesen, J., Dercon, G., Deckers, S., 2005. River channel response to short-term human-induced change in landscape connectivity in Andean ecosystems. *Geomorphology* 72, 340–353. doi:10.1016/j.geomorph.2005.05.013
- Vanacker, V., Vanderschaeghe, M., Govers, G., Willems, E., Poesen, J., Deckers, J., De Bievre, B., 2003. Linking hydrological, infinite slope stability and land-use change models through GIS for assessing the impact of deforestation on slope stability in high Andean watersheds. *Geomorphology* 52, 299–315. doi:10.1016/S0169-555X(02)00263-5
- Wang, Z., Hu, C., 2009. Strategies for managing reservoir sedimentation. *Int. J. Sediment Res.* 24, 369–384. doi:10.1016/S1001-6279(10)60011-X



## ANEXOS

## 8. ANEXOS

## ANEXO 1

ID	Sitio de muestreo	Ubicación	Área km <sup>2</sup>	Descarga (m <sup>3</sup> /s)			Concentración de sedimentos (mg/l)			SSCw mg/l
				50%	75%	100% (cuantil)	50%	75%	100% (cuantil)	
1	Tomebamba	Cajas	85	5.1	6.6	20.9	361	556	1523	590
2	Tomebamba	Sayausi	298	11.9	22.8	100.2	364	743	2198	1078
3	Yanuncay	Cuenca	413	11.5	14.8	54	543	742	916	649
4	Tarqui	Tarqui	160	5	5.9	18.1	271	547	3203	1128
5	Tarqui	Cuenca	462	12	15.1	63.5	564	736	1055	695
6	Cumbe	Cumbe	26	0.5	1	5.6	540	670	7735	4736
7	Cumbe	Tarqui	55	0.7	0.8	4.3	725	903	1282	808
8	Sidcay	El Rocío	5	0.1	0.2	0.4	280	375	1099	497
9	Sidcay	Playas	28	0.7	1.4	2.8	832	1455	6452	1857
10	Sidcay	Ricaurte	44	0.9	1.4	2.4	649	2206	6364	1406
11	Tasqui	Quingeo	17	0.3	0.7	0.8	543	727	1087	616
12	Quingeo	Quingeo	75	0.7	1.5	3.9	466	588	1899	805
13	Quingeo	El Valle	187	1.3	2.8	15.8	554	878	1799	1280
14	Gordeleg	Sta. Ana	28	0.6	1.4	2	550	1311	2239	1246
15	Jadan	Josefina	275	1.9	4.4	18.8	556	735	4120	1133
16	Yanayuco	Cachipamba	15	0.1	0.1	0.2	3668	4771	67,159	26,199
17	Tabacay	Cachipamba	31	0.1	0.3	1.4	464	729	784	625
18	Tabacay	Guapan	50	0.3	0.4	0.5	738	1455	3317	8520
19	Tabacay	Azogues	59	0.6	1.3	4.4	1016	3436	7818	3367
20	Burgay	Nazon	117	1.9	3.1	18.1	395	730	1642	1054
21	Burgay	Biblian	144	2.4	3.6	29.1	433	567	2151	1089
22	Burgay	El Descanso	360	4.2	4.9	22.6	797	1123	4906	2651
23	Cuticay	Bulan	33	0.5	0.6	1.5	375	556	5435	1632
24	Cuticay	Paute	51	1	1.5	2.3	370	722	3598	820
25	San Francisco	Zumbilig	71	2.1	2.5	2.7	185	364	545	247
26	San Francisco	Gualaceo	85	1.8	2.7	3.8	366	727	912	529
27	Sta. Barbara	Sigsig	207	6.7	9.4	27.8	271	369	992	202
28	Sta. Barbara	San Bartolome	594	10.4	12.2	30.3		545	559	743
29	Gualaceo	Certag	955	59.2	61.2	585.2		185	549	909

Concentración sedimentaria relevante aguas arriba del embalse Amaluza (Vanacker *et al.*, 2007a)

## ANEXO 2

No. Batimetría	Año	Vol. Sedimento (hm <sup>3</sup> )	Incremento	Capacidad (hm <sup>3</sup> )
0	1983	0		120.00
1	1983	3.00	3.00	117.00
2	1983	3.40	0.40	116.60
3	1984	5.00	1.60	115.00
4	1984	6.60	1.60	113.40
5	1985	7.10	0.50	112.90
6	1986	8.50	1.40	111.50
7	1986	10.00	1.50	110.00
8	1987	10.83	0.83	109.17
9	1987	10.83	0.00	109.17
10	1987	12.90	2.07	107.10
11	1988	12.90	0.00	107.10
12	1988	14.20	1.30	105.80
13	1989	16.30	2.10	103.70
14	1989	17.80	1.50	102.20
15	1990	19.00	1.20	101.00
16	1990	20.80	1.80	99.20
17	1991	21.75	0.95	98.25
18	1991	22.15	0.40	97.85
19	1992	22.15	0.00	97.85
20	1992	22.56	0.41	97.44
21	1993	26.59	4.03	93.41
22	1993	26.25	-0.34	93.75
23	1994	26.85	0.60	93.15
24	1994	29.18	2.33	90.82
25	1995	29.63	0.45	90.37
26	1995	30.23	0.60	89.77
27	1996	31.55	1.32	88.45
28	1996	32.73	1.18	87.26
29	1997	33.52	0.78	86.47
30	1997	34.42	0.89	85.57
31	1998	34.85	0.42	85.14
32	1998	35.27	0.42	84.72
33	1999	36.41	1.14	83.58
34	1999	37.45	1.04	82.54



35	2000	37.45	0.00	82.54
36	2000	36.99	-0.45	83.00
37	2001	37.69	0.69	82.30
38	2001	38.62	0.93	81.38
39	2002	39.10	0.48	80.90
40	2002	39.41	0.32	80.58
41	2003	39.89	0.48	80.10
42	2004	40.38	0.48	79.61
43	2004	41.28	0.89	78.71
44	2004	42.03	0.76	77.96
45	2005	43.12	1.09	76.87
46	2005	43.85	0.73	76.14
47	2006	44.44	0.59	75.55
48	2006	44.81	0.37	75.18
49	2007	45.68	0.87	74.31
50	2007	46.53	0.84	73.47
51	2008	47.59	1.07	72.40
52	2008	48.91	1.31	71.09
53	2009	50.13	1.23	69.86
54	2010	50.20	0.06	69.79
55	2011	50.00	-0.20	69.99
56	2012	50.22	0.22	69.77
57	2013	50.53	0.31	69.47

Batimetrías realizadas en el embalse Amaluza hasta el año 2013 (CELEC EP, 2013a)



## ANEXO 3

Volumen (hm <sup>3</sup> )	Distancia (m)
0.38	1000
0.79	1500
1.16	2000
1.64	2600
1.95	3100
2.59	4200
2.81	5000
2.95	5500
3.13	6000
3.29	6400
3.59	7000
3.80	7500
4.26	8100
4.88	8900
5.33	9500
5.61	10000
5.73	11100
6.09	12000
6.25	12800
6.43	13800
6.54	14400
7.00	15200
7.64	16000
8.60	17000
9.53	18000
10.16	18800
10.63	19750
10.79	20500
10.82	21500
10.90	22500
10.97	23400
10.98	24700
10.99	25700
10.99	26800
10.99	27100

Batimetría realizada en Mazar en el año 2013 (CELEC EP, 2013b), usadas para generación de gráfico de Curva Distancia – Volumen de material sedimentado



## ANEXO 4

Volumen (hm <sup>3</sup> )	Cota (msnm)
0	2030
1.24	2035
2.52	2040
3.19	2045
3.81	2050
4.35	2055
5.33	2060
5.78	2065
6.06	2070
6.52	2075
6.68	2080
7.24	2085
8.51	2090
9.08	2095
9.44	2100
10.02	2105
10.35	2110
10.67	2115
10.72	2120
10.79	2125
10.94	2130
10.95	2135
10.97	2140
10.98	2145
10.99	2150
10.99	2155

Batimetría realizada en Mazar en el año 2013 (CELEC EP, 2013b), usadas para generación de gráfico de Curva Cota – Volumen de material sedimentado

## ANEXO 5

Volumen (hm <sup>3</sup> )	Distancia (m)
0.28	200
1.15	450
1.33	550
2.99	1100
5.13	1600
7.74	2300
9.94	2800
14.59	3600
22.09	4250
23.62	4500
30.34	5150
34.60	5650
38.32	6000
43.40	6800
45.34	7200
47.63	8100
48.49	8550
49.30	9200
49.62	9600
50.10	10200
50.26	10650
50.41	11100
50.53	11650

Tabla de valores para generación de Curva Distancia – Volumen de material Sedimentado en el embalse Amaluza (CELEC EP, 2013a)



## ANEXO 6

Volumen (hm <sup>3</sup> )	Cota (msnm)
0	1898
6.81	1920
8.62	1925
11.41	1930
13.88	1935
16.88	1940
19.81	1945
23.58	1950
27.85	1955
32.10	1960
36.28	1965
40.69	1970
46.67	1975
49.33	1980
50.11	1985
50.46	1990
50.53	1992

Tabla de valores para generación de Curva Cota – Volumen de material Sedimentado en el embalse Amaluza (CELEC EP, 2013a)