

BALANCE HÍDRICO Y SEDIMENTOLOGICO DEL CANAL DEL DIQUE Y SUS EFECTOS SOBRE LA SEDIMENTACIÓN DE LA BAHÍA DE CARTAGENA

Jaime Iván Ordóñez

I. C., M. Sc., Dr. Eng.

Profesor Asociado

jiordonezo@unal.edu.co

Carlos Eduardo Cubillos Peña

I. C., M. Sc.

Profesor Asociado

cecubillosp@unal.edu.co

Gabriela Forero

I. C.

gabriela.fd@gmail.com

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, SEDE BOGOTÁ - LABORATORIO DE ENSAYOS HIDRÁULICOS

Carrera 30 No. 45 – 03 Edificio 408

Teléfono: 57 (1) 316 5570, 316 5000 extensiones: 13411 ó 13415

Correo electrónico: labeh_fibog@unal.edu.co

RESUMEN

La ecorregión del Canal del Dique, en Colombia, está ubicada en la parte occidental del delta del Río Magdalena en su desembocadura al mar Caribe. El área de la cuenca es de 4.400 km², y está delimitada al norte y al occidente por el Mar Caribe y al oriente por el Río Magdalena. Contiene cuerpos de agua de marismas y pantanos salobres con vegetación riparia, más de 213 km² de espejos de agua y ciénagas de importancia ecológica invaluable, y unos 870 km² de zonas bajas inundables de carácter deltaico. EL canal fue abierto por los españoles en 1650, para conectar el Río Magdalena, desde el interior de Colombia, con la bahía de Cartagena sin salir a las traicioneras aguas de la desembocadura del río en el mar Caribe. Se presenta el balance hídrico y sedimentológico del Canal, como resultado de la derivación de sus aguas del Río Magdalena, y sus consecuencias en la determinación de las tasas de sedimentación en la bahía de Cartagena y en general en la ecología del sistema cenagoso relacionado, con el objeto de juzgar la importancia y la misma necesidad de las obras de regulación de gran envergadura que el gobierno nacional ha propuesto para esta importante vía navegable.

ABSTRACT

The Ecorregión of the Canal del Dique in northern Colombia is located in the western part of the delta of the Magdalena River, near its mouth in the Caribbean Sea. The area has some 4.400 km², bordering north and west with the Caribbean, and west with the Magdalena River, the largest in Colombia, with an average discharge of some 8,000 cubic meters per second at the mouth. It is conformed by lowlands, mangrove swamps and salt marshes of riparian vegetation, more than 213 km² of water surfaces and wetlands of great ecological significance, and some 870 km² of deltaic wetlands. The channel was created by the Spaniards in 1650, to connect the interior part of Colombia, through the Magdalena River, with the Bay of Cartagena without the perils of navigating the treacherous waters of the river mouth at Barranquilla, in the Caribbean Sea. The authors present the water and sediment budget of the Canal, as a result from the derivation of its waters from the sediment laden Magdalena River, and its consequences on the sedimentation and general ecological conditions in the area, in order to judge the importance, and in fact, the necessity, of large control works proposed by the Colombian government to counter the sedimentation in the Bay of Cartagena.

INTRODUCCIÓN

La ecorregión del Canal del Dique está ubicada en la parte occidental del delta del Río Magdalena en su desembocadura al mar Caribe. El área de la cuenca es de 4.400 km², y está delimitada como se indica en la Figura 1. Contiene cuerpos de agua del tipo de marismas y pantanos salobres con vegetación riparia, más de 213 km² de espejos de agua y ciénagas de importancia ecológica invaluable, y unos 870 km² de zonas bajas inundables cuyos suelos se renuevan anualmente con los materiales sólidos de desborde del Canal, en forma similar a como sucedía en el valle del Nilo miles de años antes de la construcción de la presa de Asuan.

Esta zona deltaica, abandonada por el Río Magdalena en el Holoceno (últimos 10,000 años), conserva aún el carácter de zona baja inundable, con tendencia a la penetración de las aguas marinas hacia el interior, y frecuentes invasiones de agua fresca del río durante los periodos de inundación. El Canal fue abierto por los españoles en 1650, para conectar el interior de Colombia con la fortaleza de Cartagena de Indias sin pasar por la desembocadura del río en el mar Caribe, y funcionó inicialmente conectando al río con la antigua bahía de Matuna, y ésta con la de Cartagena a través del llamado Caño del Estero. En 1934, cuando las necesidades de navegación y la disponibilidad de equipos para el corte de materiales duros lo permitieron, se realizó el corte de Paricuica, cerca de la población de El Recreo, con lo cual las aguas del Canal llegaron directamente a la bahía por la población de Pasacaballos, Figura 1.

Desde 1934 hasta la fecha, se han realizado tres rectificaciones y dragados mayores del Canal, para mejorar la vía navegable. La última intervención fue realizada en 1984-85 dejando un canal de 115 Km. de longitud, con ancho aproximado de 80 a 90 m, profundidades variables entre 3.0 y 10.0 m, y un caudal medio de $540 \text{ m}^3/\text{s}$, superior al anterior, que era del orden de $350 \text{ m}^3/\text{s}$. Los proyectos que se realizaron no contaron nunca con suficiente análisis hidráulico debido a la carencia de información hidrológica, hidráulica y sedimentológica, y al efecto de los cambios hidrológicos e hidrosedimentológicos producidos sucesivamente, cuyas consecuencias sobre los ecosistemas asociados nunca fueron investigadas.

A pesar de lo anterior, existen claras evidencias de efectos favorables sobre la navegación, y el mejoramiento de las condiciones ambientales, que se manifiestan por la creciente ocupación humana, debido sobre todo al progresivo desalojo del agua salobre de la zona, que ha convertido la región en un ambiente de agua dulce, más apropiado a la colonización humana que la anterior condición de ambiente marino y salobre.

Hoy en día existen en la región más de 17 municipios habitados por cerca de 400.000 habitantes, los cuales derivan su sustento de la agricultura, la ganadería y la pesca, y que nutren sus sistemas de acueducto con agua del Canal y del sistema cenagoso asociado. La propia ciudad de Cartagena, con 1.1 millones de habitantes, utiliza para su abastecimiento el agua de la ciénaga de Juan Gómez, en un sector que era salino hace menos de 100 años.

La recuperación de las zonas costeras es hoy en día tan importante, que la frontera salina no sobrepasa el K100, (a 5 Km. de la desembocadura del Canal), con lo cual sólo un 10% del área posee un ambiente salino, mientras que en el año de 1650 sería de más del 70%. Aún hoy, amplios sectores de la zona poseen niveles freáticos salobres, y por lo menos la ciénaga del Guájaro, convertida en embalse, cerca del K10, es decir cerca del río Magdalena, posee altas concentraciones de sal como resultado de la inundación de suelos altamente salinos.

En asocio con estos cambios favorables, la descarga de sedimentos del Canal del Dique ha ido aumentando como consecuencia del aporte directo de las aguas del Río Magdalena al sistema, y el aumento de los caudales hacia la bahía con los sucesivos proyectos de mejoramiento de la navegación. Este efecto fue identificado por primera vez en 1973 por la Misión Técnica Colombo – Holandesa (MITCH), como un problema potencial para las bahías de Cartagena y Barbacoas (MITCH, 1973). Cabe advertir que el efecto sobre la bahía de Cartagena se ha ido agravando con el paso del tiempo debido a la inadecuada disposición de los sedimentos dragados desde la rectificación de 1984-85.

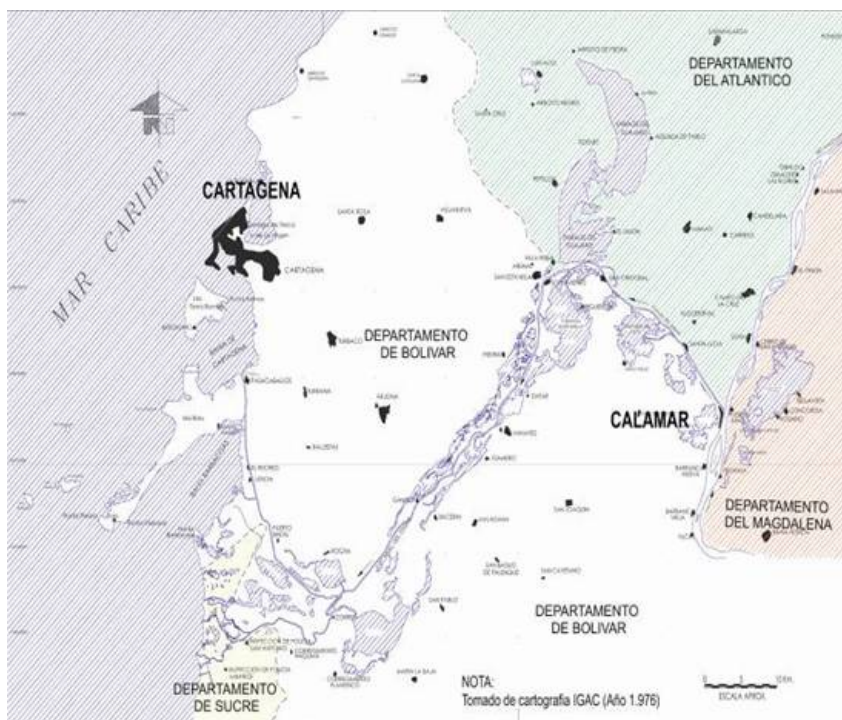


Figura 1.- Localización de la ecorregión del Canal del Dique en Colombia

OBJETIVOS

En el presente artículo se resumen y analizan los resultados de un estudio del Laboratorio de Ensayos Hidráulicos de la Universidad Nacional de Colombia, (LEH-UNC), desarrollado durante los años 2004 – 2007 para la Corporación Autónoma Regional del Río Grande de la Magdalena (Cormagdalena), en el cual, entre otros propósitos, se realizó un diagnóstico del comportamiento hidrosedimentológico de la ecorregión del Canal del Dique, (aspecto tratado aquí), como prerequisite para la evaluación de ciertas alternativas de obras de control para el manejo de la región, (que se presenta en otro artículo del presente simposio).

METODOLOGÍA

A partir de la revisión y evaluación de la información hidroclimatológica e hidro sedimentológica existente, y con la utilización de modelos matemáticos y físicos, se han obtenido relaciones que describen el comportamiento de la derivación, y han permitido estimar las cargas sedimentológicas aportadas a los diferentes cuerpos de agua asociados al mismo, incluyendo al mar en sus diversas desembocaduras; y a partir de ello, definir la magnitud del problema sedimentológico generado en, y por, el Canal del Dique.

RESULTADOS

Climatología

El régimen de precipitación en la cuenca del Canal del Dique está influenciado por el desplazamiento de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT). La precipitación media multianual es de 1290 mm, y aumenta desde el litoral hacia el interior, entre 1000 mm y 1800 mm, con el 90% entre abril y noviembre. La evapotranspiración potencial es de 1220 mm/año.

Las temperaturas medias anuales oscilan entre 28 y 30° C, con variaciones mensuales de $\pm 3^\circ$ C y rango diurno del orden de 10° C. La humedad relativa fluctúa entre 75 y 85%. La insolación promedio es de 7 horas, resultando en elevadas tasas de evaporación sobre la zona. Los vientos son fuertes y disminuyen hacia el continente; durante la época lluviosa, entre abril y noviembre, predominan vientos alisios suaves del este y sureste influenciados por la localización más septentrional de la ZCIT; en la temporada seca, de diciembre a marzo, son característicos los vientos alisios fuertes del noreste, influenciados por el sistema de alta presión localizado en el Océano Atlántico en cercanías de las islas Azores. El clima de la ecorregión se clasifica como semiárido, y se caracteriza principalmente por moderadas precipitaciones y elevadas temperaturas.

Hidrología de las cuencas aportantes

Dado que el balance hídrico de cada cuerpo cenagoso requiere la solución simultánea de las condiciones de frontera, representadas por los niveles en el espejo de agua y en el Canal del Dique y los flujos de entrada y salida a la ciénaga, su cálculo se realizó utilizando un modelo acoplado de la hidráulica y la hidrología, (LEH-UNC, 2007).

Si se realiza un cálculo aproximado de la escorrentía que se genera sobre toda la cuenca del Canal del Dique, (sólo se han modelado los diez cuerpos cenagosos mayores), para una precipitación de 1290 mm, se tendría una lámina entre 195 y 260 mm, que representa un caudal entre 25 y 35 m³/s, aproximadamente entre el 5% y el 7% de los caudales promedio derivados por el Canal. A primera vista, el orden de magnitud de estos aportes podría parecer despreciable, sin embargo son ellos los que contribuyen a mantener la dinámica del sistema Ciénagas – Canal del Dique y por este motivo se considera indispensable incluirlos en el modelo. Otros resultados del modelo matemático se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1.-Resultados de la modelación hidrológica de las cuencas aportantes

Ciénaga	Precipitación (mm.)	Pérdidas (mm.)	Escorrentía (mm.)	Escorrentía en % Precipitación
Jobo	3667.1	2915.1	752	20.5
Guájaro	3708.1	2957.1	751	20.2
Tupe-Capote-Zarzal	5088.7	4202.7	717	17.4
Luisa	3306.7	2420.7	886	26.7
Aguas Claras	5500.5	4719.5	781	14.2
Matuya	6595.5	5840.5	755	11.5
María La Baja	6486.0	5608.0	878	13.5
Juan Gómez	5263.3	4509.3	754	14.3

Los resultados mostrados indican que para el período de simulación (1988-1991), la escorrentía, en términos generales, aumenta ligeramente desde aguas arriba hacia aguas abajo en el sentido del flujo en el Canal del Dique. La lámina de escorrentía representa entre el 15 y el 20% de la precipitación sobre las cuencas investigadas. La cuenca aportante a la ciénaga La Luisa es una excepción pues genera escorrentías superiores al 25% de la precipitación. Este hecho es debido a las características particulares de la serie de precipitación en esta cuenca, la cual, a pesar de tener relativamente bajos valores de precipitación total, (3,307 mm.), presenta mayores intensidades de precipitación que en las otras cuencas.

Hidrometría

La Figura 2 muestra la localización de las estaciones hidrométricas existentes en el sistema del Canal del Dique. La primera estación a lo largo del Canal es la estación Incora K7, instalada por dicho Instituto, ya desaparecido, y hoy operada por el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia), a unos 6.5 Km. de la entrada del Canal. Le sigue la estación Gambote en el K57; las estaciones Santa Helena 1 en el K80 y Santa Helena 2 en el K82; y dos estaciones más, una en el Caño Correa, y otra en el K107 del Canal, cerca de Pasacaballos; estas dos últimas estaciones poseen muy pocos datos y sólo han sido utilizadas para efectos comparativos con los resultados de la modelación matemática realizada. Más abajo de la estación Santa Helena 2, las mediciones hidrométricas en el Canal son difíciles de analizar, debido a la fuerte influencia de la marea.

Los datos de las mediciones realizadas fuera de las estaciones señaladas, fueron levantados bajo contratación especial por CORMAGDALENA y el Ministerio del medio Ambiente, con la Universidad del Norte de Barranquilla y la firma ESTUDIOS Y ASESORÍAS Ltda. entre 1995 y 2005, y corresponden a mediciones en los Caños Correa, Matunilla y Lequerica, en la desembocadura del Canal del Dique en Pasacaballos, y en los Caños de conexión entre las ciénagas y en el Canal mismo. Estas mediciones se realizaron durante periodos relativamente cortos de tiempo en los diferentes puntos, aunque no en forma simultánea. Si bien estas mediciones no representan un registro continuo de caudales líquidos y sólidos, permiten la generación de curvas de calibración y curvas de duración aproximadas, por correlación con las mediciones de las estaciones.

Para efectos del presente análisis, las curvas generadas con base en las mediciones de campañas hidrosedimentológicas se usaron solamente para comparar y calibrar los modelos matemáticos que se utilizaron para deducir las curvas de duración de cada uno de los Caños de salida hacia la bahía de Barbacoas y el Caño Correa, así como la curva de ingreso a la bahía de Cartagena en el sitio de Pasacaballos.

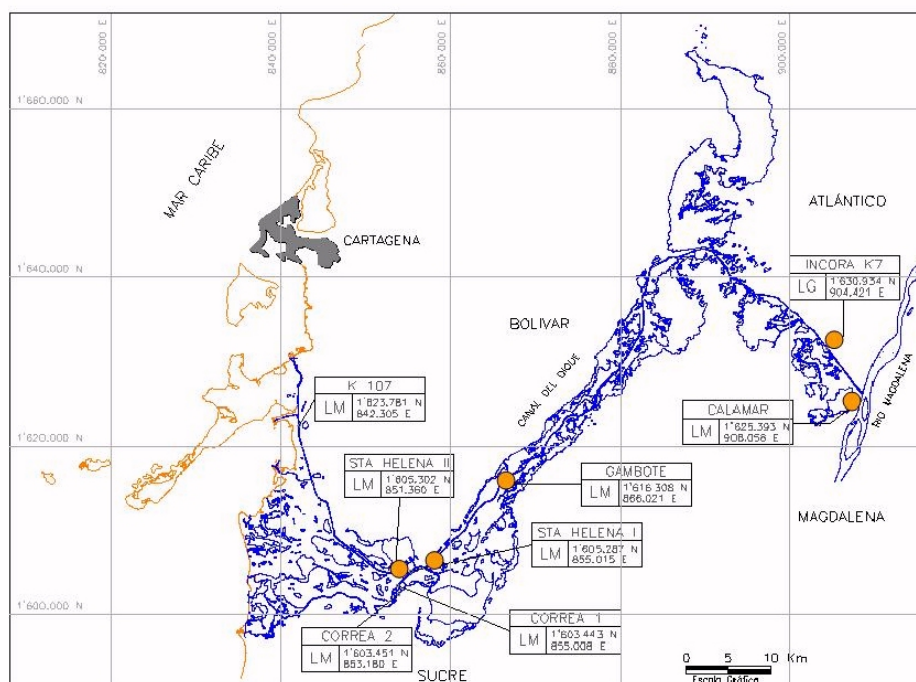


Figura 2.-Localización de estaciones hidrométricas

Niveles del agua, pendientes y profundidades

Los niveles en el Canal del Dique dependen del nivel de agua en el Río Magdalena en la población de Calamar y de los niveles del mar en las bahías de Cartagena, Barbacoas y en las bocas del caño Correa en el Caribe. El flujo en el Canal, a partir del K80 hacia aguas abajo, presenta influencia de las mareas y no se puede considerar como flujo libre. Para caudales altos, los niveles varían hasta en 4 m para los primeros 66 kilómetros del Canal, (sector Incora – Gambote), mientras que en la parte baja del Canal la variación es del orden de 1 m en la difluencia del Caño Correa.

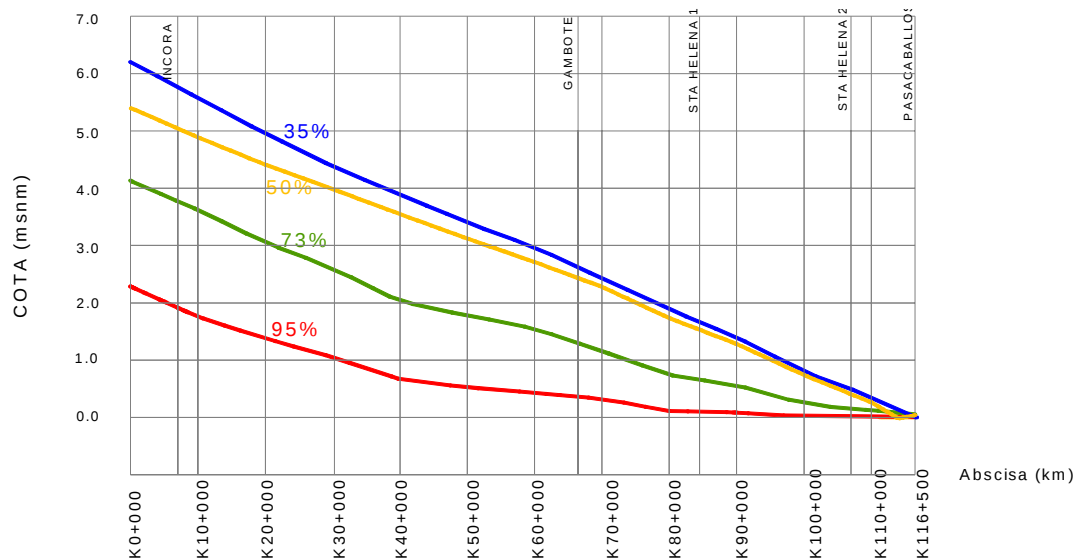


Figura 3.-Perfiles de la superficie del Canal para diferentes porcentajes de la curva de duración

Derivación de agua y sedimentos por el Canal del Dique

De acuerdo con la información recolectada en las estaciones Calamar (río Magdalena) e Incora K7 (Canal del Dique), se han estimado las tasas de derivación de agua en función del caudal en el Río Magdalena. De la Figura 4 se puede deducir la ecuación (1) :

$$Q_{\text{derivado Incora}} (m^3 / s) = 0.0971 * (Q_{\text{Río Magdalena Calamar}} (m^3 / s)) - 183.81 \quad (1)$$

Como se puede apreciar en dicha figura, para el caudal promedio anual, de 7163 m³/s en el río Magdalena, se derivan hacia el Canal del Dique alrededor de 540m³/s, lo cual corresponde al 8% del caudal del río aproximadamente. Así mismo, para condiciones de máximo caudal en el río Magdalena (16,000m³/s), se derivan hacia el Canal alrededor de 1,200m³/s, lo cual representa el 9%; en condiciones de caudales bajos la relación es del orden del 4%.

La derivación de sedimentos a partir de cauces aluviales ha sido estudiada extensamente y compilada por varios autores, entre ellos Ordóñez (Ordóñez, J.I, 1974), (Ordóñez, J.I, 1994). La más reciente compilación, a la cual se ha adicionado la información obtenida en un modelo físico de la entrada al Canal del Dique (a escalas 1:300/1:160) realizado en el LEH-UN en relación con el presente estudio (LEH-UNC, 2007) (puntos verdes), ha producido la curva de la Figura 5. Esta curva provee una forma válida de estimar las tasas de aporte sólido de carga de material del lecho desde el río Magdalena hacia el Canal. La carga medida según esta figura se repartirá en la misma proporción del caudal.

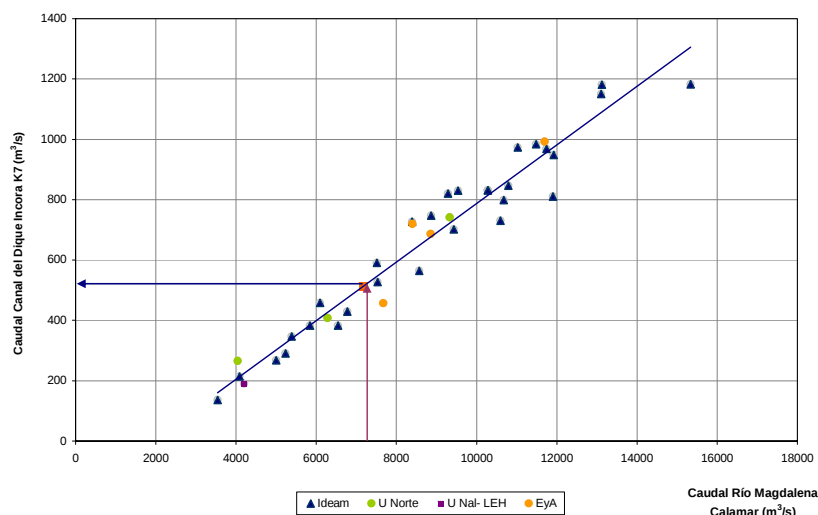


Figura 4. Curva de derivación de caudales líquidos del Canal del Dique 1984- 2002

Cálculo de la carga sólida medida

Se han utilizado las mediciones hidrométricas y sedimentológicas en las estaciones y en otros sitios del Canal, para calcular la carga medida en diferentes sectores de acuerdo con procedimientos estándar, consistentes en la obtención de curvas de calibración de caudal contra nivel (Y vs. Q), curvas de duración de caudales líquidos a nivel diario, curvas de calibración de carga sólida medida contra caudal (Q_s vs. Q), y curvas de duración de carga sólida medida, obtenidas por reemplazo de las curvas de duración de caudal líquido con los caudales sólidos de las curvas de calibración Q_s vs. Q. Las figuras 6 y 7 muestran las curvas de duración de caudal para las estaciones consideradas, y las figuras 9 y 10 curvas de calibración típicas de la carga medida en el río Magdalena y el Canal. La Figura 11 muestra algunas de las curvas de duración de sedimentos deducidas para el Canal del Dique. La Figura 8 muestra las granulometrías de sedimentos de fondo a lo largo del Canal.

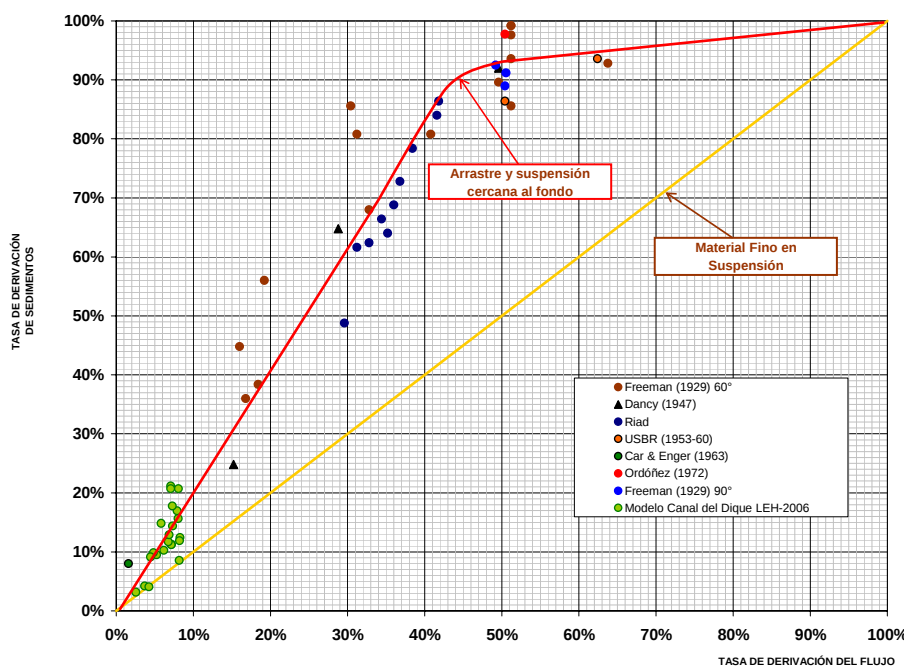


Figura 5. Derivación de sedimentos de un canal aluvial en función de la derivación de agua

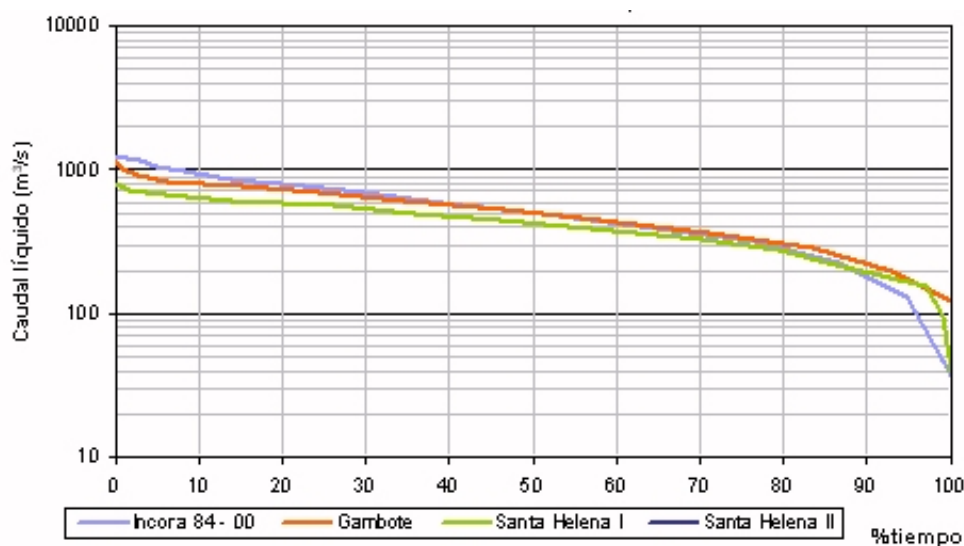


Figura 6.-Curvas de duración de caudal para las estaciones del Canal del Dique

Tabla 2.-Valores característicos de las curvas de duración de caudal

ESTACIÓN	CAUDAL (m ³ /s)	VOLUMEN DE AGUA (Millones de m ³ /año)	% Q Río Magdalena
Incora	540	17,033	7.5
Gambote	515	16,241	7.2
Santa Helena 1	427	13,478	6.0
Santa Helena 2	342	10,785	4.8

Tabla 3.-Valores característicos de las curvas de duración de los Caños

CORRIENTE	ESTACIÓN	CAUDAL (m ³ /s)	VOLUMEN DE AGUA (Millones de m ³ /año)	% Q Río Magdalena
Caño	Correa	-76	-2,385	1.1%
Canal del Dique	Santa Helena 2	342	10,785	4.8%
Caño	Matunilla	-113	-3,577	1.6%
Caño	Lequerica	-27	-852	0.4%
Canal del Dique	Pasacaballos	-130	-4,088	1.8%

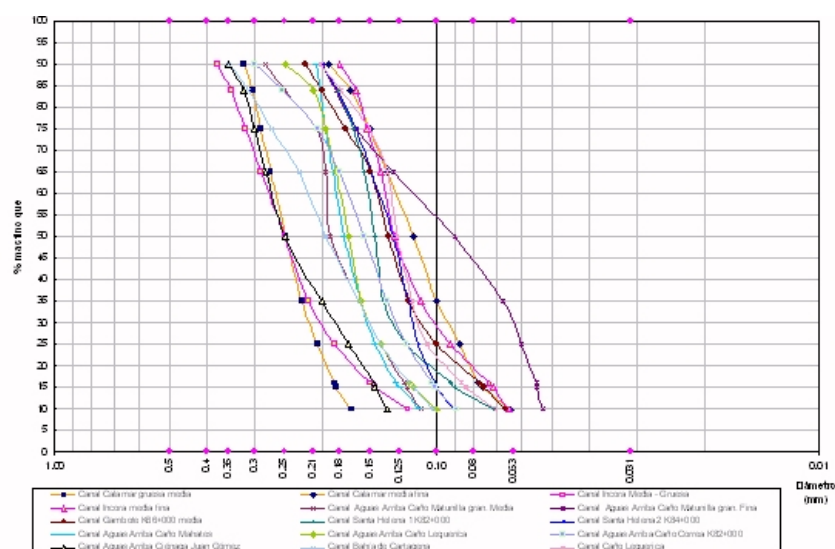


Figura 7.-Curvas granulométricas de las muestras de fondo del Canal

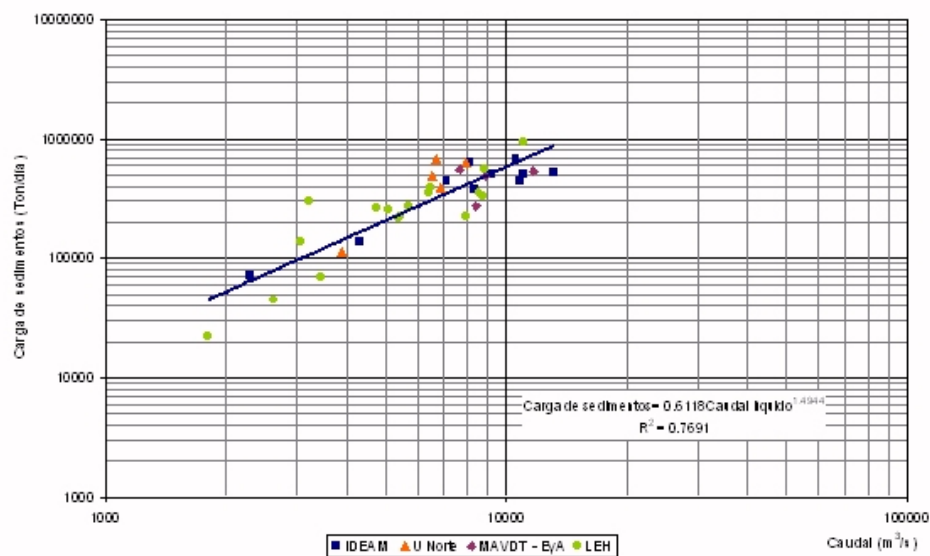


Figura 8.- Curva de calibración de carga sólida medida para la estación Calamar del río Magdalena

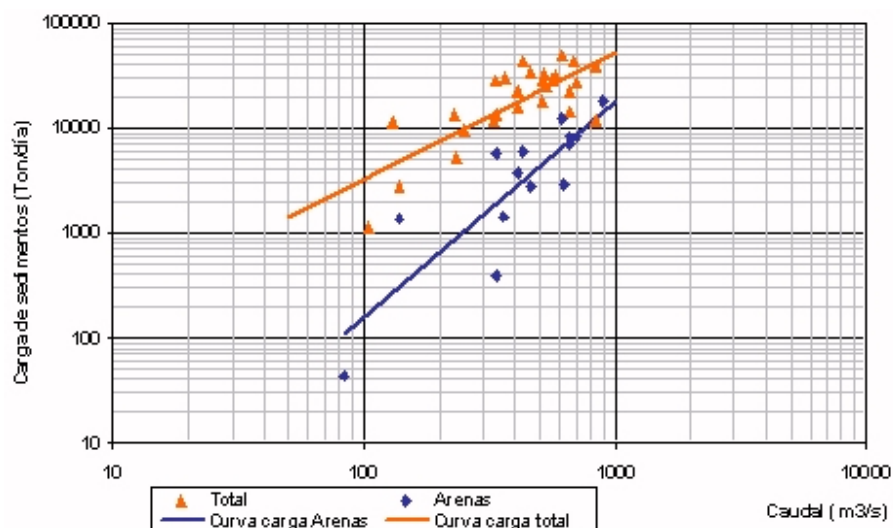


Figura 9.-Curvas de calibración de carga sólida medida estación Incora K7

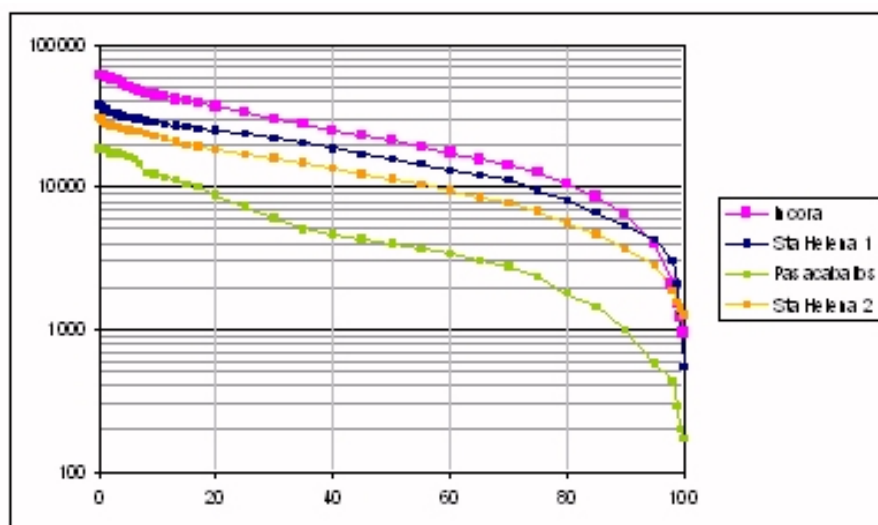


Figura 10.-Curvas de duración de carga sólida medida

Cálculo de la carga de material del lecho

La carga de material del lecho en diferentes sectores del Canal fue determinada por el Método de Einstein utilizando los parámetros hidráulicos obtenidos de las estaciones hidrométricas, las mediciones realizadas durante las campañas de medición, y las curvas granulométricas promedio del material del lecho). Los resultados aparecen en la Tabla 4. Allí la carga anual de material del lecho (Qb) se ha discriminado en : arrastre (Qbb) y suspensión (Qbs).

Tabla 4.-Estimativo de la carga de material del lecho en el río Magdalena y en el Canal del Dique

Corriente	CARGA DE MATERIAL DEL LECHO				
	Qbb (Ton/año)	Qsb (Ton/año)	Qb anual (Ton/año)	Dragado (Ton/año)	TOTAL (Ton/año)
Río Magdalena	2,751,830	13,540,590	16,292,220	N.A.	16,292,220
Incora K7 - Gambote	200,000	1,200,000	1,400,000	900,000	2´300,000
Gambote – Santa Helena.1	100,000	900,000	1,000,000	450,000	1´450,000
Santa Helena 2 – Matunilla	80,000	400,000	480,000	-	480,000
Matunilla - Pasacaballos	70,000	200,000	270,000	150,000	420,000

La Figura 11 muestra la distribución de caudales líquidos en el Canal, y la Figura 12 los resultados de la carga total, permitiendo realizar el balance sedimentológico.

Comportamiento hidráulico y sedimentológico

Los caudales líquidos derivados del río Magdalena por el Canal del Dique se han incrementado luego de la última rectificación, de 397 m³/s a 540 m³/s. A la bahía de Cartagena llegan actualmente, en promedio, 130 m³/s, correspondiendo al 24% del total. A la bahía de Barbacoas llega el 26% del caudal, (21% por el caño Matunilla y 5% por el caño Lequerica). El 14% del caudal se entrega al mar Caribe por el Caño Correa. El porcentaje restante (36%), se dispersa hacia el sistema cenagoso. Desde la década de 1970 la sedimentación ha sido evidente, tanto en el mar como en las bahías. En condiciones invernales, el Río Magdalena transporta un caudal cercano a 16,000 m³/s, de los cuales 1,200 m³/s (9%) se derivan al Canal del Dique. Para caudales bajos, la derivación baja hasta el 4%.

En cuanto a los caudales sólidos, del total de 151 MTon/año que transporta actualmente el río Magdalena en Calamar, se deriva hacia el Canal del Dique el 10 %. El volumen promedio aportado a la bahía de Cartagena no supera 2.0 MTon/año (15%). De los sedimentos que ingresan al Canal por Calamar, unos 2.7 MTon/año (21%) salen a la bahía de Barbacoas; 1.4 MTon/año (10%) al mar por el caño Correa y 4.8 MTon/año (36%), se depositan dentro del sistema cenagoso. Los demás sedimentos son dragados anualmente a razón de 2.25 Mton. Los sedimentos que llegan al mar por el caño Correa son transportados por la fuerte corriente litoral hacia el suroeste. Estos sedimentos son favorables para el mantenimiento de las playas marinas, aunque aún está por estudiar si afectan los corales del archipiélago de San Bernardo.

La ciénaga de María La Baja drena sus aguas hacia el Caño Correa durante la mayor parte del tiempo; la influencia de sus altos niveles en la hidráulica del sistema es tal, que en época de aguas altas puede formar una barrera que impide que entre agua del Canal hacia el Caño, e incluso puede llegar a invertir ocasionalmente el flujo a lo largo del Caño, de modo que parte del agua sale hacia el Canal y parte sigue hacia el mar por el Caño Correa.

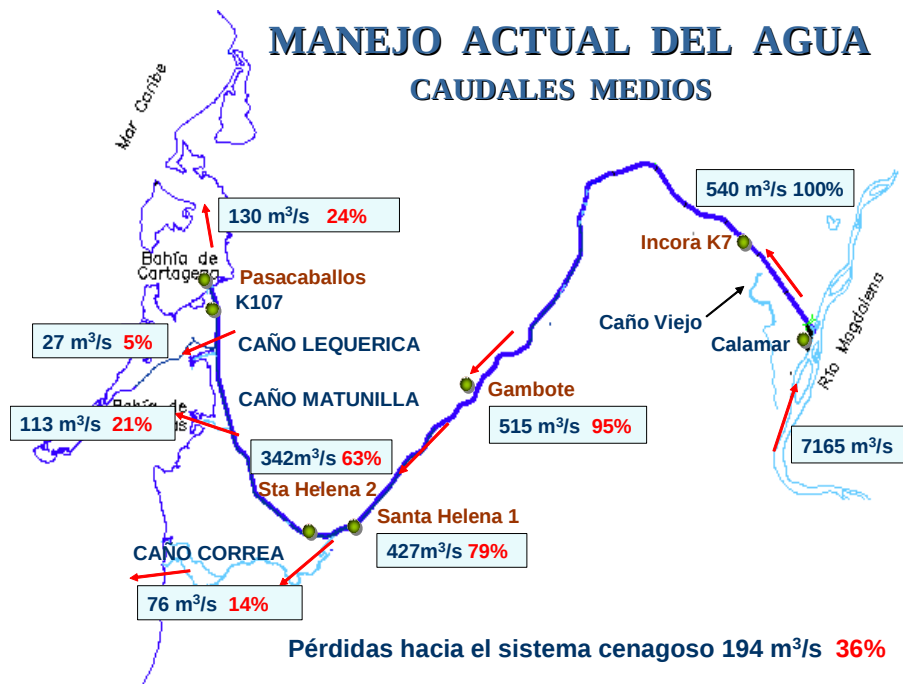


Figura 11.- Balance hídrico actual de la zona del Canal del Dique

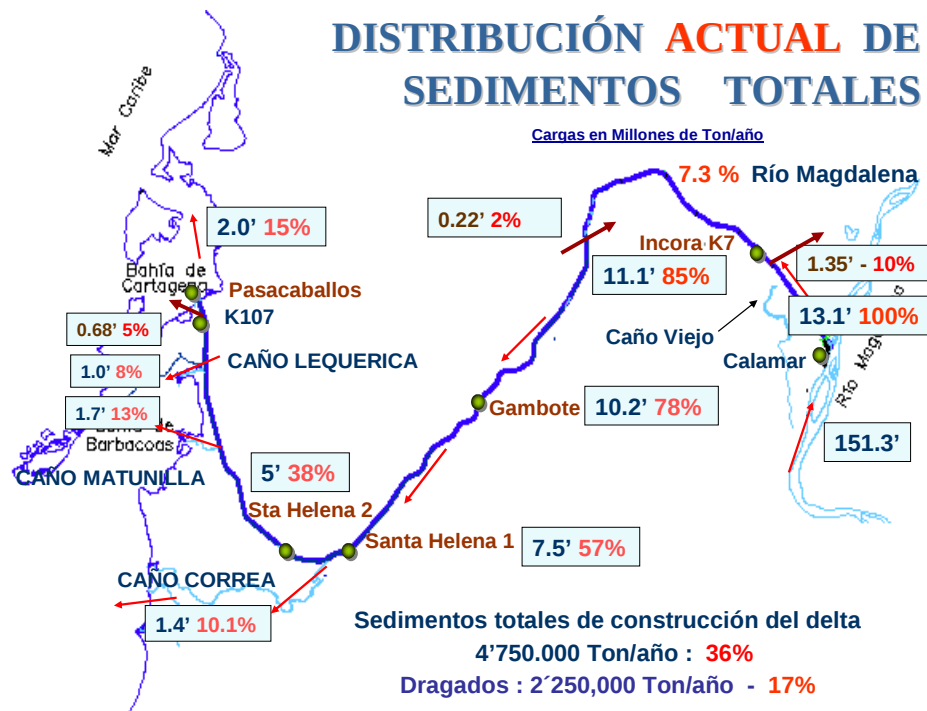


Figura 12. Balance sedimentológico actual en la zona del Canal del Dique

La profundidad del agua en el Canal del Dique es, en general, suficiente para la navegación durante todo el año, aún cuando pueden presentarse restricciones al calado de las embarcaciones durante la época más seca del año. En términos generales, para condiciones máximas de nivel, las profundidades medias en el Canal del Dique se mantienen constantes en los primeros 85 Km. del Canal; mientras que para el tramo final, considerado desde la difluencia del Caño Correa hasta Pasacaballos, las profundidades disminuyen en forma considerable y son del orden de 3 m.

Los análisis indican que la magnitud de los desbordes entre las estaciones hidrométricas de Incora K7 y Gambote representa, en promedio, el 4% de los caudales de la primera. Este volumen de agua se almacena en las ciénagas de El Jobo y el complejo Tupe-Capote-Zarzal. Entre las estaciones Gambote y Santa Helena I, las pérdidas representan el 20% del caudal de la estación Incora K7; el volumen de agua se almacena en las ciénagas La Luisa, Aguas Claras y Matuya. La diferencia entre las curvas de duración de caudales en Santa Helena I y Santa Helena II representa aproximadamente un caudal de 100 m³/s, que corresponde a los caudales derivados por el Caño Correa y los desbordes hacia la Ciénaga La Honda.

Las profundidades medias presentan un menor rango de variación, a excepción del sector K65-K85, en el cual la profundidad es del orden de 1 m mayor que el sector aguas arriba. Las profundidades en aguas bajas presentan menor variación a lo largo del Canal.

El ancho del Canal del Dique en los sectores K25-K35 y K50-K85 presenta una variación apreciable entre las épocas de aguas altas y aguas bajas. En el bajo Canal del Dique las variaciones son menores manteniendo anchos que oscilan entre los 80 y 110 m. En general las secciones más anchas se presentan en el tramo K25-K35.

En las mediciones sedimentológicas efectuadas se ha encontrado predominio de la carga de material fino, (arcillas y limos) como consecuencia del dragado en la porción inicial del Canal, (trampa de sedimentos K0 – K1+500), donde se elimina gran cantidad de arenas. La mayor proporción de arenas ocurre para los caudales medios y bajos, en tanto que la mayor proporción de finos se presenta en los caudales altos; esto significa que cuando los caudales son normales, la mayor parte de la carga es de material del lecho, en tanto que cuando el río Magdalena crece, la mayor parte de la carga es de lavado, compuesta principalmente de materiales finos, en los rangos de limos y arcillas.

Depósitos en los deltas de Pasacaballos y Barbacoas

Los sedimentos que llegan a la bahía de Barbacoas provienen de los caños Matunilla y Lequerica, los cuales cuentan con deltas extensos, que crecen continuamente debido a la falta de dragado de mantenimiento; por esta razón, los caños se utilizan únicamente por embarcaciones pequeñas o de bajo calado.

La sedimentación hacia la Bahía de Cartagena causa algunos problemas a la navegación, los cuales se resuelven con dragados periódicos en el tramo Caño Lequerica - Pasacaballos. Cormagdalena draga periódicamente el sector y deposita los materiales en el delta de Pasacaballos, en el interior de la bahía de Cartagena.

Depósito de sedimentos en la Bahía de Cartagena

Una forma independiente de comprobar los volúmenes de sedimentos aportados por el Canal del Dique a las bahías de Cartagena y Barbacoas, consiste en ubicar el material depositado en los deltas y sobre toda la superficie de los cuerpos de agua receptores, lo cual se ha hecho periódicamente en estudios anteriores por diferentes entidades, aunque es necesario observar que en esos intentos no se han considerado todas las posibles fuentes de sedimento; dado que, aparentemente, se ha supuesto siempre que el Canal del Dique es la principal fuente de sedimentos, o por lo menos la única cuyo aporte es lo suficientemente importante para garantizar el análisis.

En efecto, la mayor parte de los estimativos de sedimentación realizados previamente se basan en el volumen de materiales acumulados en los deltas de Pasacaballos, Matunilla y Lequerica, los cuales se pueden atribuir directamente al Canal; sin embargo, para interpretar adecuadamente los resultados en el resto de la bahía de Cartagena, es necesario considerar todas las posibles fuentes de sedimento capaces de producir depósitos en ella; éstos son :

- Las arenas finas y medias provenientes de la deriva litoral.
- La precipitación de carbonatos y los carbonatos de origen orgánico.
- Los lodos orgánicos procedentes de las aguas servidas.
- La escorrentía pluvial de agua y sedimentos.
- La producción de lodos arcillosos por efecto del diapirismo volcánico.

Todas estas fuentes son, de hecho, muy importantes y no pueden dejarse de lado en el balance sedimentológico de zonas costeras. La deriva litoral es una de las fuentes más claras y más estudiadas en ingeniería de costas, proveyendo usualmente la mayor parte de los materiales que conforman las playas marinas y lacustres; la precipitación de carbonatos es de particular interés en mares tropicales dada la peculiar característica de estos compuestos de depositarse en aguas de alta temperatura, a diferencia de otras sales que tienden a disolverse al aumentar la temperatura; los carbonatos de origen orgánico provienen de las conchas de los organismos marinos, omnipresentes en las playas, pero más abundantes en los ecosistemas de mares tropicales; los lodos orgánicos provenientes de las aguas servidas son importantes en la bahía de Cartagena y se podrían cuantificar con buena aproximación a partir de la información de las redes de alcantarillado doméstico e industrial de la ciudad del mismo nombre.

Los sedimentos provenientes de la escorrentía pluvial son abundantes y sólo ellos pueden explicar algunas de las acumulaciones de material que son evidentes en las batimetrías de la bahía de Cartagena. El diapirismo volcánico es ciertamente un fenómeno raro y no en todas partes podría considerarse como una fuente real de sedimentos de los sistemas costeros; sin embargo, en la región caribe colombiana, con énfasis en la zona de Cartagena, este fenómeno reviste singular importancia por la presencia de algunos de los conos más característicos de este fenómeno : el volcán de lodos del Totumo y sus cráteres anexos, a poca distancia en la vía a Barranquilla, cerca de la franja costera, y el cráter submarino de punta Cana, son apenas algunos ejemplos a mostrar. Un cierto número de conos similares a diapiros volcánicos se observan dentro de la propia bahía de Cartagena, sin que se haya indicado aún la posibilidad de que sean volcanes activos; sin embargo, la abundancia de arcillas registrada recientemente en los fondos de la bahía (CNRS, 2005), no pueden explicarse fácilmente a partir del escaso contenido de arcillas en los sedimentos del Canal del Dique.

La profundidad de la bahía de Cartagena, vista a largo plazo, depende también de factores externos al problema sedimentológico, como el ascenso del nivel del mar, que se estima del orden de centímetros por año, y el levantamiento de la corteza terrestre, del orden de milímetros por año, que en esta zona es el resultado de la presión continua de la placa del Caribe y la placa de Nazca, contra la placa de Sur América, y es la causa del fenómeno de diapirismo volcánico ya mencionado.

La cubicación de los deltas sedimentarios del Canal del Dique, y más recientemente, de la depositación aparente en toda la bahía de Cartagena, ha sido recurrente para este caso desde 1972, cuando la Misión Colombo-Holandesa, (MITCH,1973), calculó por primera vez estos volúmenes en forma apenas incipiente, debido a la falta de información anterior.

Las fuentes de información que se han recopilado y considerado en el presente análisis son las siguientes :

- Misión Técnica Colombo Holandesa Mitch, 1973
- Laboratorio de Ensayos Hidráulicos MOPT-Hidroestudios, 1984
- MOPT-CHEC-Estudios y Asesorías Ltda., 1987
- Universidad del Norte, Barranquilla, 2000
- CIOH-Programa ECOS - NORD, 2004

La Misión MITCH produjo en 1973 uno de los estudios más completos del Río Magdalena y el Canal del Dique realizados hasta esa fecha, incluyendo estudios comparativos del progreso del delta de Pasacaballos entre 1961 y 1972, concluyendo que la depositación en esa época era equivalente a un volumen anual de 285,000 m³/año (anterior al dragado de 1984).

El Laboratorio de Ensayos Hidráulicos del Ministerio del Transporte, bajo la dirección en esa época de la firma HIDROESTUDIOS Ltda., realizó un nuevo análisis con información hasta 1982, concluyendo que la tasa de sedimentación llegaba a 300,000 m³/año, cifra esencialmente igual a la anterior, considerando la precisión de las mediciones.

En 1989, el Ministerio de Obras Públicas y del Transporte contrató a la empresa China Harbours Inc., CHEC, para realizar un primer dragado de mantenimiento del sector Caño Lequerica-Pasacaballos, después del dragado capital terminado en 1985; contrato que fue supervisado por Estudios y Asesorías Ltda., en calidad de interventor. Este dragado, (LEH-MINTRANSPORTE, 1988), movilizó más de un millón doscientos mil metros cúbicos, equivalentes a 300,000 m³/año en promedio para los cuatro años transcurridos.

En el año 2000, la Universidad del Norte de Barranquilla, realizó para Cormagdalena un informe especial sobre el delta de Pasacaballos, (LEH-LF, 2000) en el cual realizó una cubicación bastante detallada del mismo, con base en batimetrías antiguas y modernas de la zona inmediata a la desembocadura del Canal. UNINORTE realizó al mismo tiempo su propia caracterización del Canal del Dique y de sus sedimentos, muy similar a la que aporta el trabajo de la Universidad Nacional en 2006, y compiló además dos planos batimétricos de la bahía de Cartagena, de 1935 y 1988, (ver Figura 13), que permitieron hacer comparaciones sobre la profundidad de los fondos marinos en el interior de la bahía.

Al analizar dichos planos es necesario hacer algunas observaciones pertinentes :

1. Los contornos de la bahía en los dos planos no fueron medidos detalladamente en ninguno de los dos estudios; la similaridad de los planos en esta zona es solo aparente.
2. En el periodo considerado se realizaron rectificaciones del Canal, así :
3. En 1.934, Frederick Snare Co realizó el corte de Paricuica para conectar la ciénaga de Matuna con el caño del Estero.
4. Entre 1951 y 1952 la Standard Dredging dejó el Canal conectado directamente con la bahía de Cartagena, con 93 curvas, radio mínimo de 500 m, y una sección con ancho de solera de 45 m y profundidad mínima de 2,40 m. Se dragaron 9'300. 000 m³.
5. Entre 1981 y 1984 Layne Dredging y Sanz & Cobe Ltda., redujo las curvas del Canal a 50, con radio mínimo de 1000 m; ancho de fondo de 65 m; longitud del Canal 115 Km., y profundidad mínima de 2,50m. El volumen dragado fue de 18'800.000 m³.

La UNIVERSIDAD DEL NORTE calculó las variaciones morfológicas del delta de Pasacaballos en el periodo 1935 - 1999, con resultados que varían entre 518,000 y 927,000 m³/año; el informe concluye: *“la evolución morfológica del fondo de la bahía de Cartagena, recogida por el comparativo realizado entre 1935 y 1988, le habría significado la pérdida de 67 millones de m³ de volumen de agua, por realces del lecho, pasar de una profundidad máxima del agua de 32 m a 28 m y el avance hacia el centro de ella, de la isóbata de 10 m”*.

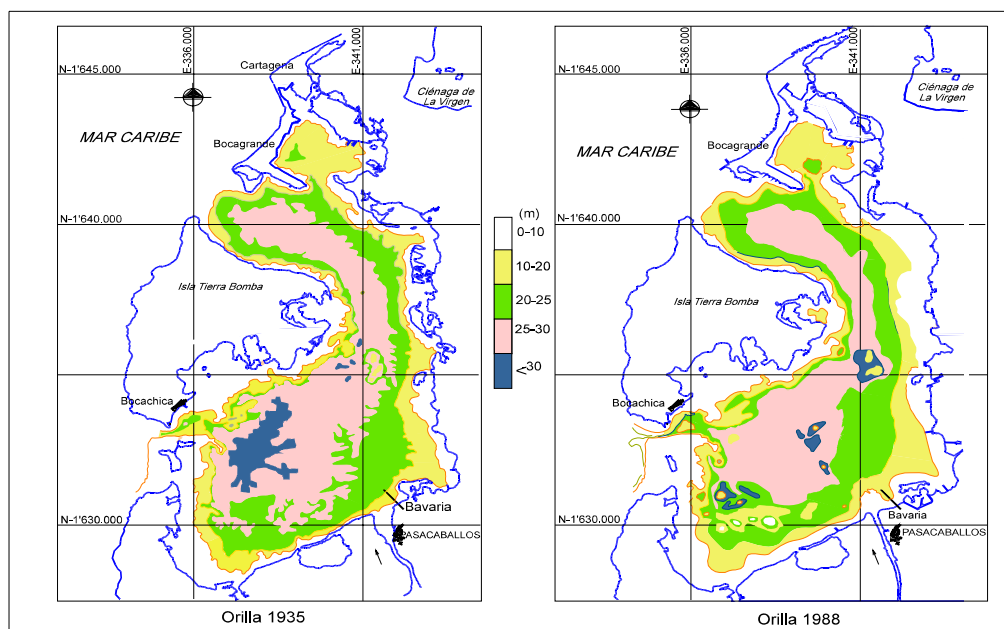


Figura 13. Batimetrías de la bahía de Cartagena compiladas por la Universidad del Norte

Sin embargo, el CIOH de la Armada Nacional de Colombia, en asociación con el “Centre National de la Recherche Scientifique”, de Francia, (CNRS-CIOH. 2005), la bahía tiene un área de 82.6 Km² con una profundidad promedio de 16 m, es decir un volumen total de 1,321.6 Mm³; para los cuales 67 Mm³ son apenas el 5.07%. Considerando las tasas conocidas de sedimentación en el delta de Pasacaballos, hasta 27 Mm³ serían del delta; la depositación remanente en la bahía sería un colchón relativamente uniforme de unos 48 cm en el resto de la bahía. Debe tenerse en cuenta además que en el mismo lapso, el nivel del mar habría subido por lo menos 11 cm, y posiblemente hasta 36 cm; por lo cual no se considera factible hablar de una reducción de varios metros en la profundidad de la bahía; esta apreciación es un error que proviene de la interpretación de diferencias batimétricas de dos levantamientos muy disímiles, realizados con equipos de sondeo y de control horizontal muy diferentes.

La misma fuente analiza batimetrías de varios periodos y establece que, desde 1977 hasta 2004, la depositación en toda la bahía equivale a 26.8 millones de metros cúbicos, lo cual arroja en promedio algo menos de un millón de metros cúbicos por año. Debe anotarse que este volumen, considerado como la diferencia entre dos batimetrías que cubren casi toda el área de la bahía, se atribuye en su totalidad al Canal del Dique, sin que realmente corresponda al volumen del delta únicamente.

Los análisis realizados con base en levantamientos batimétricos explican muy poco la forma como se han compatibilizado las batimetrías de diferentes épocas, realizadas con propósitos diferentes en cada ocasión, y con muy diferente equipo de sondeo y de posicionamiento horizontal, por lo cual es difícil conceptuar sobre el nivel de precisión alcanzado.

Si bien las ecosondas son equipos adecuados para medir profundidad, con errores del orden del 2% únicamente, su utilización para determinar espesores de depositación es mucho menos precisa, dado que el espesor a medir resulta del orden de magnitud del error probable cometido al restar; en otras palabras, si bien el error en la determinación de una profundidad de 16 m como en la bahía de Cartagena, es apenas de 32 cm., este puede bien ser el espesor de los depósitos a medir, lo cual deja muchas dudas sobre la precisión del estimativo por resta de dos profundidades medidas en diferentes épocas, con equipos de posicionamiento de muy diferente nivel de precisión. Debe tenerse en cuenta que aún dos batimetrías iguales, colocadas una sobre otra con apenas una pequeña diferencia de inclinación de un grado, pueden producir un enorme “volumen de depositación”, totalmente falso. Las determinaciones de volumen depositado en las zonas de delta son mejores, dado que los espesores de sedimentos son del mismo orden de magnitud de las profundidades.

A pesar de estas observaciones, los datos producidos por los diversos estudios considerados no presentan resultados del todo incompatibles con los cambios en el volumen de agua y sedimentos que produjo el dragado de 1984 en el Canal.

CONCLUSIONES

Los resultados del estudio demuestran la dependencia de las condiciones hidrológicas, hidráulicas y sedimentológicas del Canal del Dique y su sistema cenagoso, de las condiciones de nivel, caudal líquido y caudal sólido del Río Magdalena en Calamar, y de los niveles del mar en las bahías de Cartagena y Barbacoas. Las campañas de medición hidrométrica y de calidad del agua en el Canal indican que la posición general y la variabilidad de la frontera salina, tanto a nivel de las aguas superficiales como de las aguas subterráneas, son función igualmente de la interacción de caudales y niveles entre el río y el Canal.

El estudio muestra las mejores relaciones hidrosedimentológicas que se pueden encontrar con la información existente, entre el río y el Canal; igualmente ha permitido estimar las cargas sedimentológicas aportadas a los diferentes cuerpos de agua, y definir en términos generales la magnitud del problema sedimentológico generado en, y por el Canal.

La zona del Canal del Dique es y ha sido una vía importante de drenaje del sistema fluvial del Río Magdalena desde tiempos inmemoriales, como lo revela la información geológica existente, recopilada en el presente estudio. La sola revisión de los mapas históricos del área, muestra cómo ha sido de importante el fenómeno de depositación de sedimentos en la porción deltaica más reciente del Canal, aguas abajo del estrecho de Correa y hacia la bahía de Barbacoas, aún antes de los dragados mayores del canal. No es cierto, por lo tanto, que los españoles en 1650, (en pocos meses y con precarios equipos de construcción), pudieran conformar una vía navegable enteramente nueva del río Magdalena. Lo único verdaderamente nuevo es la conexión reciente con la bahía de Cartagena, que data del dragado de 1950-52.

Dada la importancia del Canal para la navegación, y para suplir las necesidades de agua del sistema cenagoso y de la población asociada con él, los resultados de los análisis sugieren que la magnitud del problema sedimentológico no es crítica a corto o mediano plazo, ni tampoco requiere la atención urgente e inmediata que se reclama; esto no quiere decir, sin embargo, que no exista un problema a resolver. De hecho, el estudio juicioso de las condiciones físicas y ambientales, demuestra que existen numerosos problemas regionales, asociados con el ordenamiento de los recursos hídricos de la cuenca, que no se pueden desechar o posponer.

Los diversos análisis y conceptos sobre la depositación de sedimentos en la bahía de Cartagena, indican que la mayoría de los efectos sedimentológicos del Canal se perciben únicamente en las vecindades de su desembocadura en el sector de Pasacaballos, hasta una distancia de 1.5 a 2 Km. de la orilla. Los volúmenes que se depositan actualmente en este sector, (incluyendo los que se dragan en el sector Caño Lequerica - Pasacaballos), suman un poco más de un millón de metros cúbicos, volumen que puede ser dragado a un costo razonable para evitar sus efectos negativos sobre la bahía.

El avance del delta hacia el interior de la bahía es actualmente del orden de 50 m/año, más que todo, en razón a la disposición de los materiales dragados del lecho del Canal, que lo convierten en un delta de origen antrópico, por lo cual se deduce que un mejor manejo de la disposición de los materiales permitiría reducir considerablemente su expansión longitudinal minimizando el riesgo de que éste alcance a corto plazo el canal navegable del puerto.

Según los estudios realizados por la Universidad del Norte, (LEH-LF, 2000), más del 50% de los materiales depositados en el delta de Pasacaballos son esencialmente arenas finas a medias y limos, valor que coincide bien con el presente estimativo del 58%. Los limos finos, arcillas y coloides que alcanzan a pasar conformando la llamada “pluma turbia” del Canal, y cuya cuantía se ha estimado en apenas unos 460,000 m³/año, se distribuyen por toda la bahía, en un área muy extensa, y para todos los efectos prácticos, representan acumulación de espesores a nivel anual relativamente bajos, prácticamente indetectables con precisión por vía de la comparación de batimetrías realizadas con ecosonda, y por tanto no forman acumulaciones peligrosas desde el punto de vista de navegación, a corto y mediano plazo.

En consecuencia, el Laboratorio de Ensayos Hidráulicos de la Universidad Nacional de Colombia, LEH-UNC en el presente estudio ha encontrado que el problema sedimentológico es todavía controlable, desvirtuando escenarios catastróficos como los que algunos continúan vaticinado para la bahía de Cartagena con base en impresiones personales y en estudios superficiales e incompletos.

La introducción de obras de control en el Canal, como las compuertas y esclusas que se han propuesto, permitirían reducir una parte de los materiales que ingresan a la bahía a costa de reducir la entrada de agua al sistema, y por ende los desbordamientos hacia el sistema cenagoso, los cuales son necesarios para el adecuado funcionamiento de los ecosistemas y para el control de la cuña salina. Esta merma en los caudales, en un cauce ampliado, profundizado e hidráulicamente estabilizado durante los últimos 23 años, no puede tener otro final que el de la desestabilización morfológica del Canal hacia la depositación, desmejorando en forma muy substancial las condiciones de navegación.

Por otra parte, hasta donde se ha llegado a calcular, la máxima reducción del volumen de sedimentos a depositar que se puede obtener con estas estructuras, compuertas y esclusas, es del orden del 37% de los volúmenes que actualmente se están depositando en el delta de Pasacaballos, implicando una disminución de los volúmenes de agua de desborde hacia el sistema cenagoso del orden de las dos terceras partes del volumen actual. La merma en los caudales evita entonces los desbordes normales y detiene artificialmente el proceso de sedimentación del valle aluvial y la consolidación del delta del Canal del Dique, con consecuencias que no son, por el momento, previsibles.

Los estudios realizados en un modelo físico, indican que es posible mediante una estructura de exclusión de sedimentos en el río Magdalena en inmediaciones a la entrada del Canal, obtener la reducción total de las arenas y limos gruesos (que son los más susceptibles a ser depositados en el delta del Canal del Dique), reduciendo también, en cerca del 37%, los volúmenes de depósito en Cartagena, pero sin mermar los caudales líquidos. Debe anotarse nuevamente, que en los estimativos disponibles a la fecha de volúmenes de sedimentos que llegan y se depositan en la bahía de Cartagena, no se ha considerado el aporte de materiales provenientes de otras fuentes que allí existen.

La investigación a profundidad de los fenómenos hidrosedimentológicos que ocurren en las bahías de Cartagena y Barbacoas, e incluso en el mar abierto, hasta los archipiélagos del Rosario y San Bernardo, así como la posible afectación de los bancos de coral vecinos a esas islas, la afectación del canal navegable de la bahía de Cartagena, y otras problemáticas derivadas del cambio en el manejo de las cargas sólidas y líquidas en el sistema, han quedado fuera del alcance del presente proyecto, pero debe ser abordada a la mayor brevedad posible para precisar la verdadera magnitud del impacto del Canal del Dique y de las expectativas de evolución a corto plazo de tales cuerpos de agua.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CNRS-CIOH. (2005). Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), France. “Étude Morpho-Dynamique de la Baie de Carthagène des Indes, Colombie Milieux Littoraux, Nouvelles Perspectives D’études”. En colaboración con el centro de Estudios Oceanográficos de la Armada Nacional de Colombia, CIOH.

LEH-MINTRANSPORTE, (1988). Laboratorio de Ensayos Hidráulicos – Ministerio de Obras Públicas y del Transporte de Colombia. “Memoria Anual de Trabajos Desarrollados en el Laboratorio”.

LEH-LF. (2000). Universidad del Norte – Laboratorio de Ensayos Hidráulicos de Las Flores. “Manejo de los Sedimentos de la Desembocadura del Canal del Dique en la Bahía de Cartagena – Una primera aproximación sobre la viabilidad de uso de las lengüetas de Pasacaballos”.

LEH-UNC (2007). Universidad Nacional de Colombia – Laboratorio de Ensayos Hidráulicos – Facultad de Ingeniería, Bogotá, “Estudios e Investigaciones de las Obras de Restauración Ambiental y de Navegación del Canal del Dique”.

MITCH, (1973). MISIÓN TÉCNICA COLOMBO HOLANDESA - “Río Magdalena and Canal del Dique survey Project”, Bogotá. pp.329.

ORDÓÑEZ, J.I. (1974). “Sediment Exclusion at River Diversions”. Report HEL-24, University of California, Berkeley, Hydraulic Engineering Report.

--- (1994). En ESTUDIOS Y ASESORÍAS Ltda., “Modelos Físicos de Bocatomas y Sedimentadores para Distritos de Riego”, para INAT, Instituto Nacional de Adecuación de Tierras de Colombia.