

Hydraulic Proposals for reducing sedimentation rates on the navigation channel of Maracaibo Lake

Carlos Araujo, José Rincón, Janett Flores

*Laboratorio de Simulación Computacional, Departamento de Energía,
Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia.
Maracaibo 4001-A, Venezuela. Telefax (0261) 4128794.
araujocd@gmail.com, jose.rincon@gmail.com, janettbfn@gmail.com*

Abstract

The Maracaibo Lake's navigation channel is a lacustrine route that allows navigation of ships with a deep draft through the El Tablazo bay, a shallow water body within the Maracaibo Lake System, at the northeast of Venezuela. With the construction of the navigation channel, the natural symmetry of the morphology of the bay was broken; in consequence, the system tries to recover it by a natural process of sedimentation. Therefore, it is necessary to maintain the channel by frequent dredging activities that may have a potential environmental impact on the system. Using a model based on the finite volume method, this paper presents the computational evaluation of four strategies for reducing sedimentation rates on the Maracaibo Lake's navigation channel, which were derived in a previous diagnosis of sediment dynamics in the El Tablazo bay. The results show that an extension (1.5 km) of the existing western breakwater at the north of the bay is the strategy that increases the self-cleaning capacity of the channel without affecting the current pattern in the bay.

Keywords: El Tablazo Bay, sedimentation rate, navigation channel.

Estudio de propuestas hidráulicas para la reducción de los niveles de sedimentación sobre el canal de navegación del Lago de Maracaibo

Resumen

El canal de navegación del Lago de Maracaibo constituye una vía lacustre que permite la navegación de embarcaciones de gran calado a través de la bahía El Tablazo, un cuerpo de aguas pocas profundas perteneciente al sistema hidráulico Lago de Maracaibo, al noreste de Venezuela. Con la construcción del canal de navegación se perdió la simetría natural de la morfología de la bahía, que el cuerpo de agua trata de recuperar mediante un proceso natural de sedimentación. Por tal motivo, es necesario el mantenimiento del canal con frecuentes actividades de dragado que representan un riesgo ambiental potencialmente negativo sobre el sistema. En este artículo se presenta la evaluación computacional, empleando un modelo basado en el método de volúmenes finitos, de estrategias para la reducción de los niveles de sedimentación sobre el canal de navegación del Lago de Maracaibo, las cuales se derivaron en un diagnóstico previo de la dinámica de los sedimentos en la bahía El Tablazo. Los resultados muestran que la extensión (1,5 km) del llamado rompeolas occidental existente al norte de la bahía, es la estrategia que incrementa la capacidad autolimpiante del canal sin afectar el patrón de corrientes en la bahía.

Palabras clave: Bahía El Tablazo, canal de navegación, tasa de sedimentación.

Introducción

El sistema Lago de Maracaibo es un estuario localizado al noroeste de Venezuela que está conformado por cuatro cuerpos de agua estrechamente relacionados: el Lago de Maracaibo también llamado Saco, el estrecho de Maracaibo, la bahía El Tablazo y el golfo de Venezuela.

La bahía El Tablazo es la parte del sistema objeto de estudio en este trabajo. Dicho cuerpo de agua tiene una profundidad promedio que alcanza los 3 m [1]. Lo anterior contrasta con los 13 m de profundidad del canal de navegación que le atraviesa, que rompe la simetría natural de la morfología de la bahía, originando a un proceso natural de sedimentación sobre la vía lacustre. La rapidez con la que ocurre la sedimentación sobre el canal, establece la frecuencia de intensas actividades de dragado que, además de ser costosas, conllevan un riesgo ambiental potencialmente elevado en las zonas donde se ejecutan [2].

A este respecto, el registro histórico de las tasas de sedimentación sobre el canal de navegación entre los años 1967-1987 [3], permite detectar la existencia de una zona crítica o de mayor aporte de material. Haciendo referencia a la Figura 1, ésta se ubica en el extremo norte de la bahía El Tablazo, entre la isla de Pájaros y la boca San Carlos, lugar donde ocurren las tasas de sedimentación más elevadas. Además, existe otra zona de importancia localizada al sur de la bahía donde el aporte de material es en menor cuantía que en el extremo norte.

El comportamiento antes mencionado se ha reproducido mediante un modelo de dinámica de fluidos computacional, calibrado con mediciones de campo en la boca San Carlos. Dicho modelo ha permitido identificar los factores que motorizan este patrón dinámico de deposición de los sedimentos, de lo cual, se han derivado cuatro estrategias para la reducción de la tasa de sedimentación sobre el canal [4]. El objetivo del presente trabajo es evaluar computacionalmente la efectividad de dichas estrategias, con el fin de proponer una obra o conjunto de obras, que permita reducir la tasa de sedimentación sobre el canal y, en consecuencia, la frecuencia de dragado sobre la vía lacustre.

Metodología

A fin de describir las cuatro estrategias a ser evaluadas en el presente estudio, la Figura 1

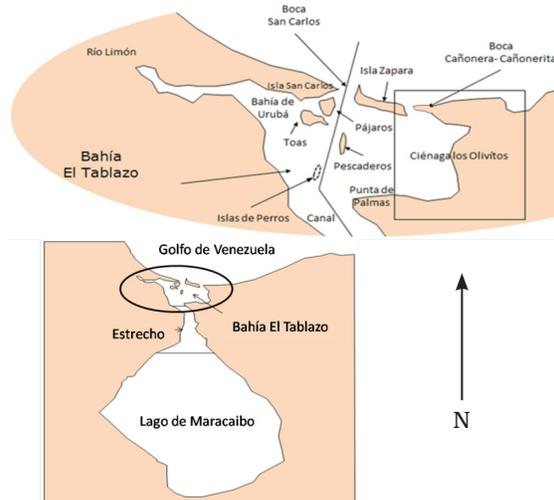


Figura 1. Sistema Lago de Maracaibo.

muestra un esquema de la bahía El Tablazo y sus alrededores. Nótese que este cuerpo de agua se encuentra interconectado con el resto del sistema Lago de Maracaibo. La separación geográfica entre la bahía El Tablazo y el golfo de Venezuela se da por la presencia de una cadena de islas, que forman tres canales naturales o bocas, denominadas: San Carlos, Cañonera y Cañonerita. La boca San Carlos es la más amplia y forma parte del canal de navegación. Por el sur, la bahía se conecta con el estrecho de Maracaibo mientras que por el noroeste recibe la tributación del río Limón.

Casos de estudios

Estrategia 1 (ESC1): Como se muestra en la Figura 2, la primera estrategia consiste en extender en 1,5 km el rompeolas occidental existente en la boca San Carlos. El objetivo de la intervención es incrementar la velocidad de la corriente que circula entre las islas Pájaros y Pescaderos para elevar la capacidad auto limpiante del canal. Dado que esta estrategia es una extensión a una obra existente, se espera que su ejecución no origine un alto impacto desde el punto de vista ambiental, salvo las perturbaciones propias de las actividades de construcción y mantenimiento.

Estrategia 2 (ESC2): Esta intervención se ilustra en la Figura 3 y consiste en construir un espigón al sur de la isla Pescaderos de 1 km de longitud, paralelo al canal de navegación. Se espera que esta obra incremente la velocidad de la co-

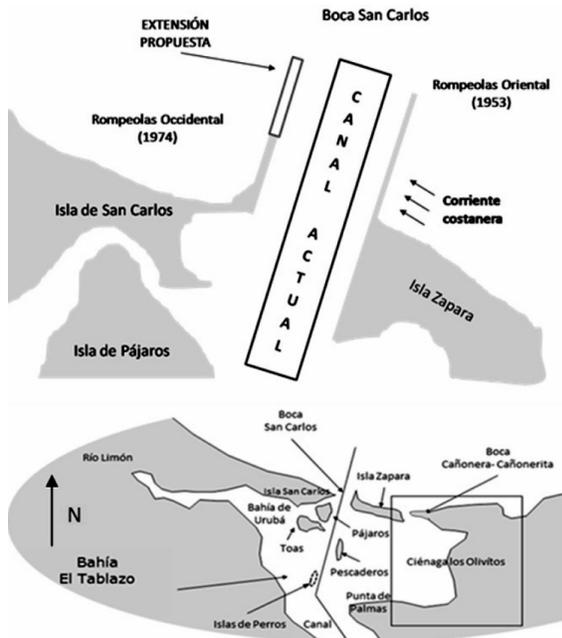


Figura 2. Representación del Escenario ESC1.

riente que circula sobre el canal al sur de la isla, aumentando la capacidad auto limpiante de la vía fluvial. Por otra parte, el espigón al sur de la isla pudiera generar un efecto de bloqueo hidráulico mediante la imposición de la barrera al acarreo de cargas suspendidas y de fondo que tiene lugar en el canal Larrazábal que, como consecuencia de los efectos de inversión de las mareas, pueden ser transportados hacia el canal de navegación.

Escenario 3 (ESC3): Esta opción se representa en la Figura 4 y consiste en construir un espigón alineado con el canal de navegación al norte de Punta de Palmas de 1,5 km. El mismo tiene la finalidad de reducir el transporte de sedimentos hacia el canal mediante el bloqueo parcial de la corriente litoral proveniente de las playas del municipio Miranda, la cual pudiera acarrear sedimentos en suspensión y carga de fondo hacia el canal de navegación, que se depositarían en los procesos de inversión de las mareas, cuando las velocidades de las corrientes se reducen.

Escenario 4 (ESC4): La cuarta estrategia se muestra en la Figura 5 y consiste en edificar un dique semi sumergido en el canal Larrazábal, entre las islas Pescaaderos y Zapara. Esta obra busca bloquear parcialmente la corriente que circula en la zona sobre el canal Larrazábal, con el fin de reducir la carga de fondo y de superficie al norte

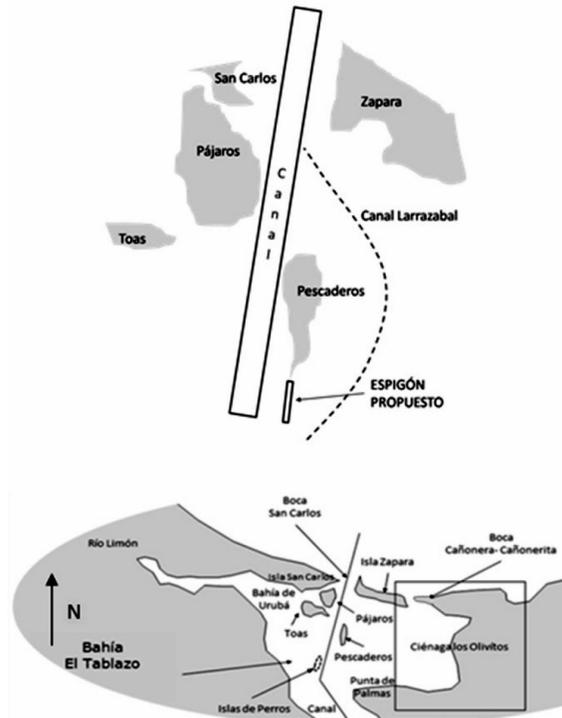


Figura 3. Representación del Escenario ESC2.

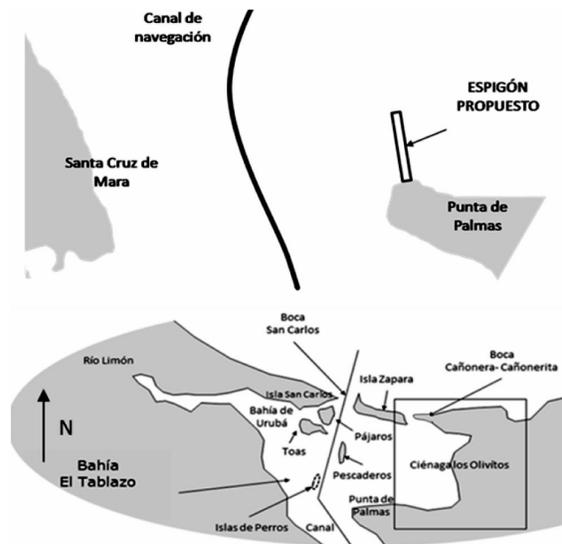


Figura 4. Representación del Escenario ESC3.

de la isla Pescaaderos, que según el diagnóstico inicial, parece explicar la alta tasa de sedimentación existente en la zona.

Finalmente, los mejores escenarios serán combinados generando así nuevos escenarios para su evaluación.

Método de evaluación

La cantidad de material dragado en el canal de navegación está estrechamente relacionado con el comportamiento hidráulico y el movimiento de los sedimentos en la bahía El Tablazo, que a su vez, dependen de las características ambientales y estacionales de la región. Por lo tanto, estos aspectos se integran mediante un programa matemático computacional basado en el método de volumen finito que consta de tres módulos.

El primer módulo resuelve las ecuaciones de Navier Stokes acopladas al modelo de turbulencia de Smagorinsky para obtener la hidrodinámica del sistema [5]. Haciendo referencia a la Figura 6, el dominio de cálculo comprende la bahía El Tablazo y su entorno, las líneas de costas e información batimétrica se obtuvo de base de datos globales y cartas de navegación [6-8]. Por su parte, la malla computacional consta de 25973 elementos.

La simulación hidrodinámica de la Bahía El Tablazo está acotada al periodo de tiempo en donde se dispone información simultánea para las condiciones de bordes y forzantes del sistema, que corresponde desde el 01/01/1998 hasta

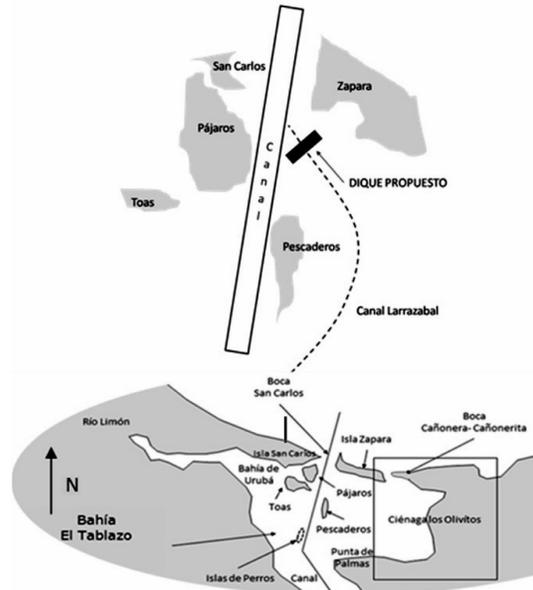


Figura 5. Representación del Escenario ESC4.

ta 31/12/1998. Las condiciones de borde vienen dadas por: mediciones de velocidad y dirección de los vientos locales reportadas por la estación climatológica de Produsal; niveles de mareas en los bordes abiertos norte y sur localizados en las

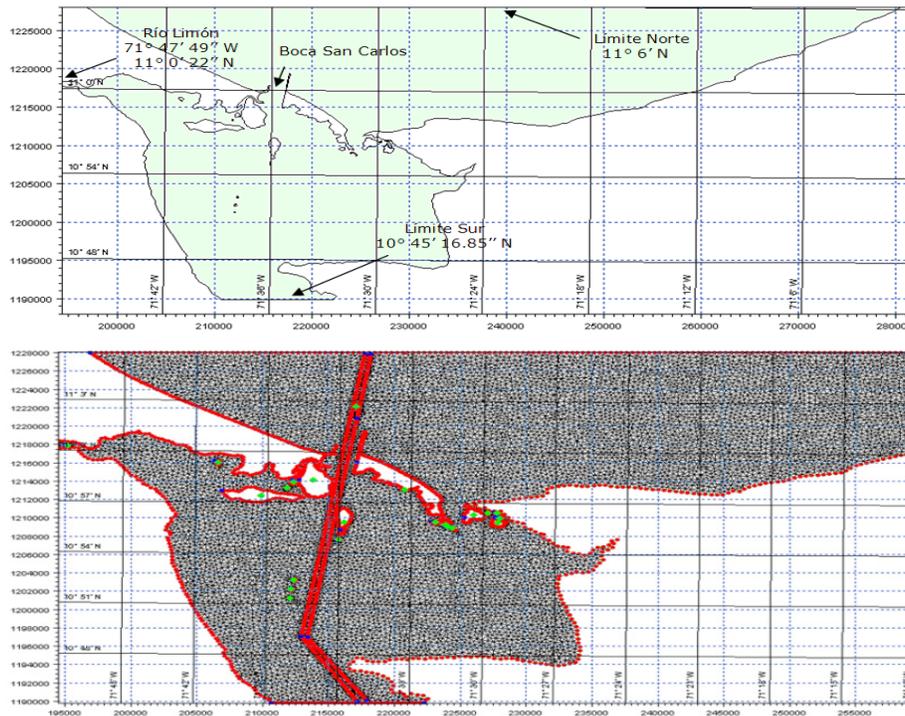


Figura 6. Dominio de cálculo y malla computacional.

latitudes 11°6' 0" N y 10° 45' 16.85" N y valores de descarga del río Limón. Es importante señalar que los niveles de mareas y descargas fueron extraídos de un reporte de simulación para todo el sistema Lago de Maracaibo usando el modelo calibrado MIKE3 [9].

El segundo módulo, comprende el transporte de los sedimentos cohesivos mediante una ecuación de transporte por convección y dispersión, que considera como términos fuentes los mecanismos de erosión y sedimentación, a partir de la velocidad, concentración y otros parámetros del lecho [4]. Por último, en el tercer módulo se calcula el transporte de sedimentos no cohesivos empleando el procedimiento de Engenlund y Hansen que contabiliza las cargas superficiales y de fondo [10]. Las condiciones iniciales y de borde de estos módulos se consideran parámetros libres los cuales se imponen en primera instancia en base a valores de concentración típicos y luego se ajustan mediante la calibración del modelo con los datos reportados para el Aforo SZ ubicado en la boca San Carlos (UTM 19, 216382 E, 1217571 N) [11].

Como indicador de impacto de alguna obra en la dinámica de los sedimentos cohesivos, se realizan balances de masa sobre las regiones o volúmenes de control mostradas en la Figura 7, durante el periodo de evaluación 01/01-01/03. Para todos los volúmenes de control se debe cumplir que: a) Si el balance de masa neto de sedimentos para un periodo determinado es negativo, indica que hubo una disminución en la concentración de los sedimentos cohesivos en la zona muestreada; b) Si el balance de masa neto en un volumen de control para un periodo determinado es positivo, indica que hubo aumento en la concentración de los sedimentos cohesivos en la zona muestreada; c) Si el balance de masa neto en un volumen de control es cero, indica que no hubo ni aumento ni disminución en la concentración de los sedimentos. En el caso del modelo de transporte de los sedimentos no cohesivos; arenas finas y gruesas, el indicador de impacto es el cambio en el nivel del lecho para puntos localizados sobre el canal de navegación, específicamente en las zonas de altas tasa de sedimentación, como se muestra en la Figura 8.

Estas zonas comprenden los kilómetros denominados N5 al S8 al norte de la bahía y los

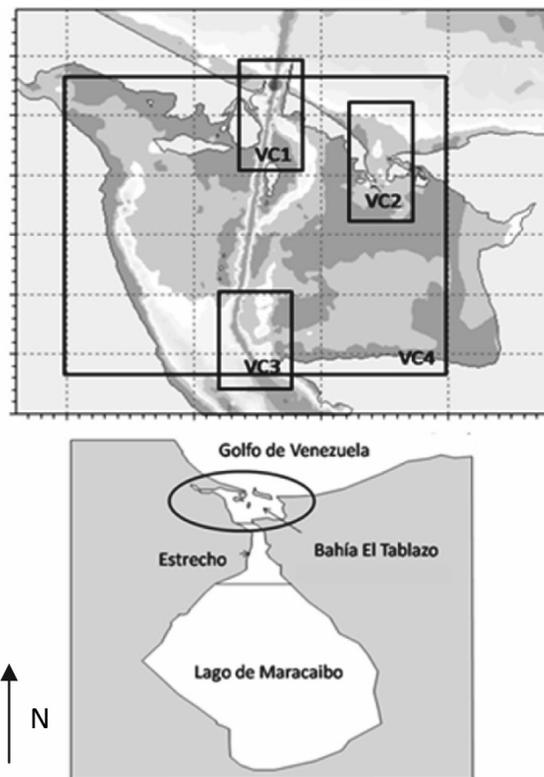


Figura 7. Localización de los volúmenes de control.

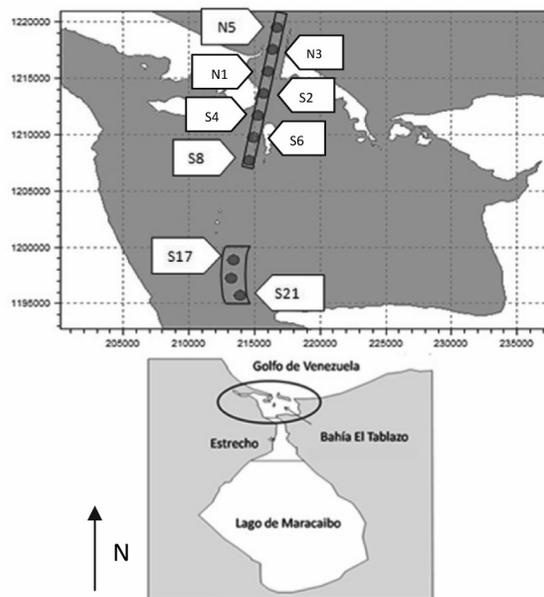


Figura 8. Puntos de muestreo de tasa de sedimentación sobre el canal de navegación.

kilómetros denominados S17 al S21 en el primer cruce del canal de navegación. En dirección norte-sur, el tramo N5 al S8 contiene los puntos intermedios N3, N1, S2, S4, S6. Los cambios en el nivel del lecho (m/día) son cuantificados en los puntos antes señalados y luego se integran numéricamente a lo largo del canal para tramos de 2 km, a fin de estimar la cantidad de sedimento acumulado en m³/año.

El análisis de los escenarios de simulación estudiados en este trabajo se efectúa en relación a los resultados obtenidos para el caso base, correspondiente a una simulación bajo la situación actual. Las variables empleadas para el análisis estimadas para un mismo periodo de evaluación son: concentración promedio de los sedimentos cohesivos en los volúmenes de control: VC1, VC2, VC3 y VC4; y la tasa de sedimentación promedio en los puntos de monitoreo.

El procesamiento de los datos consiste en la aplicación de un análisis de varianza (ANOVA) para cada volumen de control, con el fin de determinar si existen diferencias estadísticamente significativas para las concentraciones promedio resultantes de cada escenario de estudio con un nivel de confianza del 95%. El mismo procedimiento se aplica para todos los puntos sobre el canal, empleando en este caso los valores promedio de tasa de sedimentación obtenidos de los casos de estudio. A continuación, se aplica la prueba de comparación múltiple de Fisher, con el fin de determinar si las diferencias entre cada par de medias son estadísticamente significativas con un

nivel de confianza del 95% [12]. Finalmente, con base a los resultados de la prueba de Fisher, se determina la propuesta que logra reducir la tasa de sedimentación sobre el canal de navegación de manera estadísticamente significativa.

Resultados

Sedimentos cohesivos suspendidos

En la Figura 9, las barras muestran el promedio de la cantidad de material cohesivo contenida en cada volumen de control, desde el caso base hasta el ESC4 leídos de izquierda a derecha. Las 2833 muestras extraídas del modelo numérico para cada caso son analizadas estadísticamente mediante los ANOVA y las pruebas de comparación de medias de Fisher. Los resultados se agrupan en grupos homogéneos conformados por escenarios con medias que no presentan diferencias significativas de acuerdo al estudio estadístico. La ubicación relativa de las marcas X mostradas en la Figuras 9 y 10 identifica el grupo al que pertenece cada escenario.

Desde un punto de vista global, al analizar el VC4 que abarca toda la bahía, las estrategias que logran una mayor reducción de la cantidad de material cohesivo respecto al caso base son los representados por los escenarios ESC1 y ESC4, con 22473 TON (-65,03%) y 53939 TON (-16,44%) respectivamente, siendo estas diferencias estadísticamente significativas. Las dos estrategias mencionadas se localizan al norte del sistema, y sir-

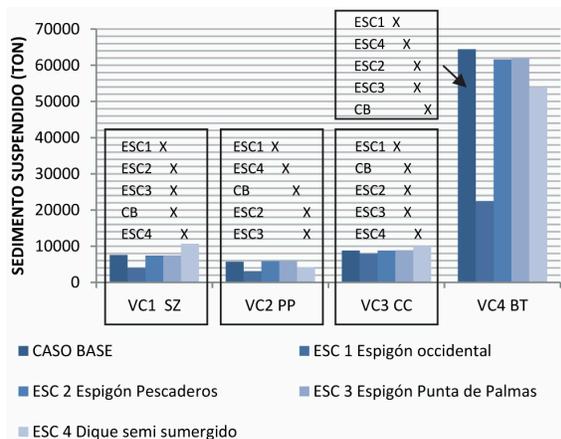


Figura 9. Contenido de sedimentos cohesivos en los volúmenes de control.

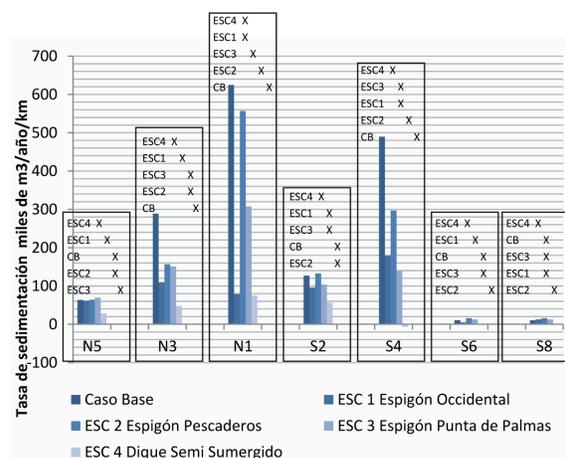


Figura 10. Tasa de sedimentación sobre el canal de navegación.

ven como filtro a las arcillas y limos que proceden principalmente de la erosión costanera del golfo, el intenso transporte litoral y la re suspensión de material fino debido a la acción de las olas, como han indicado otros autores [13].

Sin embargo, al analizar el VC1 se observa que ESC4 incrementa, de forma estadísticamente significativa respecto al caso base, la cantidad de material cohesivo en dicha región pudiendo afectar de forma negativa la navegación, ya que bajo la condición actual, ya la zona se caracteriza por la presencia del efecto de falso fondo o “*fluff*”, que dificulta las maniobras de las embarcaciones con rumbo al Lago de Maracaibo [14]. En contraste, el ESC1 alcanza 4010 TON (-47,16%) lo que representa una reducción sustancial de material cohesivo en la región. Finalmente, cabe señalar que los escenarios ESC2 y ESC3, correspondientes al espigón en el sur de Pescaderos y el espigón en Punta de Palmas respectivamente, no tienen un impacto estadísticamente significativo en la reducción de los niveles de concentración de los sedimentos cohesivos para ninguno de los volúmenes de control señalados respecto al caso base.

Sedimentos no cohesivos

La Figura 10 muestra los resultados obtenidos en la tasa de sedimentación promedio en los puntos de muestreo sobre el canal entre los kilómetros N5 y S8, así como los grupos homogéneos obtenidos del análisis estadístico de las 2833 muestras extraídas del modelo numérico en cada caso.

De la Figura 10 se destaca que, nuevamente los escenarios ESC4 y ESC1, son los que permiten una mayor reducción, en este caso, de la tasa de sedimentación en todos los puntos monitorea-

dos. Esto se confirma mediante una integración de la tasa de sedimentación a lo largo del tramo N5-S8, cuyos resultados se muestra en la Tabla 1.

Ahora bien, en el caso del escenario ESC4, en los kilómetros S4, S6 y S8 ubicados cerca de la isla de Pescaderos (ver Figura 7), la tasa de sedimentación es negativa, lo que sugiere la presencia de erosión sobre el canal. Esta tendencia no necesariamente descarta dicha estrategia, sin embargo, su aplicación pudiera poner en marcha procesos de erosión y sedimentación cuyo punto de equilibrio no fue posible de obtener con el modelo computacional disponible.

Cabe destacar que, el estudio en la zona del primer cruce del canal para el escenario ESC4, muestra que existe un incremento estadísticamente significativo de la tasa de sedimentación respecto al caso base, lo que permite prever que los sedimentos que se desprenden de la erosión cerca de la isla Pescaderos, se movilizan en buena medida hacia esta zona. En este sentido, los valores de sedimentación total para la zona del primer cruce (Tramo S17-S21), que resultan de la integración de la tasa de sedimentación para las localizaciones monitoreadas, se presentan en la Tabla 2. Nótese que en este caso, la mayor reducción estadísticamente significativa se alcanza con el escenario ESC1.

De los resultados obtenidos se observa que los escenarios ESC1 y ESC4 presentan los más bajos niveles de sedimentación total a lo largo del canal en las zonas monitoreadas. Sin embargo, dado que el escenario ESC4 aumenta la cantidad másica de sedimento suspendido en la boca San Carlos potenciando el fenómeno de *Fluff* y presenta tasa de sedimentación es negativa en los kilómetros S4, S6 y S8 provocando erosión en la zona, se elige el escenario ESC1 como la estrate-

Tabla 1

Sedimentación total para el tramo N5 al S8

Escenario	Sedimentación (m ³ /año)
Caso base	3226825
ESC1 Espigón occidental	1097901
ESC2 Espigón pescaderos	2464937
ESC3 Espigón Punta de Palmas	1660973
ESC4 Dique semi sumergido	404121

Tabla 2

Sedimentación total para el tramo S17-S21

Escenario	Sedimentación (m ³ /año)
Caso base	38279
ESC1 Espigón occidental	13702
ESC2 Espigón pescaderos	22057
ESC3 Espigón Punta de Palmas	76946
ESC4 Dique semi sumergido	418306

gia estadísticamente efectiva y de menor impacto de acuerdo a la evaluación computacional.

Adicionalmente, en este estudio se incluyó la verificación de la combinación de los escenarios ESC1-ESC2 y ESC1-ESC3 respectivamente. Los resultados de la sedimentación total para el Tramo N5-S8 con los escenarios combinados se presentan en la Tabla 3.

Como se puede observar, los escenarios combinados no alcanzan una reducción adicional en la sedimentación sobre el canal, lo que confirma que la principal fuente de sedimentos ocurre desde el golfo y por el extremo norte del canal Larrazábal. Lo mismo ocurre en la zona del primer cruce, razón por la cual, no está justificada una obra adicional a la contemplada en el escenario ESC1.

Conclusiones

Todos los resultados obtenidos a lo largo de la presente investigación indican que la extensión al rompeolas occidental ubicado en la boca San Carlos en 1,5 km, es la estrategia que logra una reducción estadísticamente significativa en la cantidad másica de los sedimentos cohesivos en el canal de acceso. Además, el modelaje de la dinámica de los sedimentos no cohesivos indica una reducción estadísticamente significativa en la tasa total de sedimentación a lo largo del canal de navegación sin comprometer la vía lacustre, aspecto que se verifica por la no presencia de zonas con tasas de sedimentación negativa que sugieren procesos de erosión. Esto hace del escenario ESC1, una propuesta de bajo impacto a la dinámica del sistema. Finalmente, la combinación simultánea de las estrategias representadas por los escenarios ESC1-ESC2 y ESC1-ESC3, no ofrecen una reducción adicional en la tasa de sedimentación respecto al escenario ESC1, razón por la cual, no se justifican una inversión en obras adicionales a la extensión del rompeolas occidental.

Agradecimientos

Al Convenio Específico de Cooperación suscrito entre el Instituto para el Control y la Conservación de la Cuenca del Lago de Maracaibo (ICLAM) y la Universidad del Zulia (LUZ); al Instituto Nacional de Canalizaciones (INC) y al Labo-

Tabla 3
Sedimentación total con los escenarios combinados para el tramo N5-S8

Escenario	Sedimentación (m ³ /año)
ESC1 Espigón occidental	1097901
ESC1_ESC2 Espigón occidental y pescaderos	1152796
ESC1_ESC3 Espigón occidental y en Punta de Palmas	1674437

ratorio de Geodesia Física y Satelital de la Universidad del Zulia, por su apoyo en el desarrollo de este trabajo.

Referencias bibliográficas

1. Bautista, S.: "Proceso de Salinización del Lago de Maracaibo". ICLAM/CORPOZULIA, Maracaibo, Venezuela, 1997.
2. Landaeta, C.: "Potential environmental impact generated by dredging and disposal dredged material processes", Colorado, USA, 1995.
3. INC. "Actualización de la tasa de sedimentación del canal de navegación del Lago de Maracaibo", Instituto Nacional de Canalizaciones, Caracas, Venezuela, 1988.
4. Araujo, C.: "Dinámica sedimentológica de la bahía El Tablazo del sistema hidráulico Lago de Maracaibo", Tesis Doctoral. Universidad del Zulia, Facultad de Ingeniería, División de Posgrado, Maracaibo, Venezuela, 2012.
5. DHI: "MIKE User Guide", Danish Hydraulic Institute Group, Denmark, 2006.
6. NOAA. Agencia de administración nacional de la atmósfera y océanos. Recuperado el 1 de 11 de 2010, de <http://www.noaa.gov/>
7. GEBCO. General Bathymetric Chart of the Oceans. Recuperado el 1 de 11 de 2010, de <http://www.gebco.net>
8. Costas de Venezuela. Costas de Venezuela. Recuperado el 1 de Septiembre de 2010, de http://www.costadevenezuela.org/wordpress/?page_id=7
9. Flores, J.: "Influencia del aumento del nivel medio del mar sobre el sistema Lago de Mara-

- caibo". Tesis Doctoral en Ingeniería Ambiental, Departamento de Hidráulica, Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela, 2008.
10. Pacheco, C: "Transporte de sedimentos en la bahía del Tablazo", Trabajo Especial de Grado para optar al título de Ingeniero Civil, Departamento de Hidráulica, Universidad del Zulia, Maracaibo, Venezuela, 2012.
 11. Laboratorio Nacional de Hidráulica. "1ra Campaña de aforos en el canal de acceso al Lago de Maracaibo". Reporte de Medición, Caracas, Venezuela, 1999.
 12. Montgomery, D.: "Applied Statistics and Probability for Engineers", John Wiley & Sons, New York, USA, 2003.
 13. Bautista, S.; Bernard, M.; Romero, M.; Troconis, M.; Segovia, S.; Paredes, J.: "Environmental impact of mercury discharges in the navigation channel, Lake of Maracaibo", Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia, Vol. 22, No. 1, (1999). 42-50.
 14. Alkyon Hydraulic Consultancy & Research. "General Masterplan for Zona Portuaria Simon Bolivar". Informe técnico final, Maracaibo, Venezuela, 2006.

Recibido el 22 de Febrero de 2014

En forma revisada el 2 de Marzo de 2015