

Batista Silva, J. L. (2018): Aspectos hidrológicos del entorno de la bahía de Mariel. Revista Voluntad Hidráulica N° 124, INRH, ISSN: 0505-9461, pp. 24–31, Cuba.

RESUMEN

Aborda la importancia de las vías del transporte de materiales sólidos (sedimentos en suspensión y/o de arrastre o de fondo) hacia la bahía de Mariel, a partir de la información y los datos relacionados con las precipitaciones, relieve del territorio, cuencas hidrográficas y los caudales líquidos de los ríos Bongo, Dominica y Arroyo Cañas.

Palabras claves: hidrología, escurrimiento sólido, aporte de sedimentos a la bahía de Mariel

INTRODUCCIÓN

Es importante tener en cuenta las características hidrológicas en la dinámica de la utilización del territorio adyacente a la bahía de Mariel, especialmente en el tema del movimiento de tierra ante la ejecución de cualquier tipo de proyecto u obra en desarrollo. El objetivo fundamental es tratar de evitar el aporte directo de sedimentos hacia la bahía, por otra parte, es conveniente analizar el papel que juegan las cuencas hidrográficas tributarias a la bahía y su entorno.

En general, una cuenca hidrográfica natural y abierta (independiente de su magnitud), funciona como un sistema delimitado por un parteaguas y divide la precipitación sobre cuencas contiguas, por tanto, la misma puede considerarse como la principal alimentación de la cuenca fluvial.

La red de drenaje, con sus cauces naturales labrados durante siglos origina la formación de escurrimiento fluvial, tanto líquido como sólido. Las características del agua y su recorrido, desde el nacimiento de la corriente, están relacionadas con múltiples causas y factores determinantes hasta que la corriente superficial llega a su meta, al final de su recorrido.

Todos los procesos en desarrollo dentro de la cuenca hidrográfica se reflejan en su parte baja, es decir, bahías, estuarios, playas o en la propia desembocadura; de estos procesos, la erosión producida por la energía del agua, “*arrancando*” millones de toneladas de suelo anualmente y acarreadas aguas abajo, constituyen un elemento dañino para la franja costera, en este caso para el “vaso” de la bahía de Mariel.

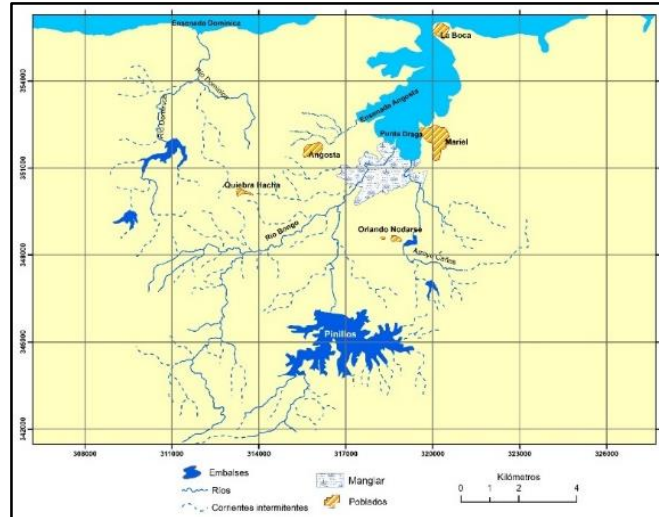
La deposición en cuencas fluviales ha estado actuando durante eras geológicas, aumentado considerablemente por la acción del hombre con sus actividades agrícolas causantes de gran parte del aporte total de sedimentos hacia los ríos, estuarios y finalmente al mar. En la mayoría de los casos la acumulación de sedimentos en las zonas costeras puede inhabilitar una playa, bahía, etc., lo cual requeriría efectuar costosas operaciones de dragado. Sumado a esto, una inadecuada selección del sitio para el vertimiento del material dragado puede provocar efectos no deseados, como una re-deposición en el lugar de donde fue extraído, lo cual provocaría gastos adicionales en las actividades relacionadas con la navegación.

El dragado de una bahía, donde existan instalaciones portuarias, resolvería temporalmente el problema, es decir, se eliminarían las consecuencias pero no la causa que origina el aporte de material sólido hacia la desembocadura de los ríos. El hombre no puede materialmente evitar los procesos de erosión natural, pero si puede reducirlos considerablemente con sus actividades antierosivas y además no crear condiciones para nuevas formas erosivas.

La formación de sedimentos no se produce en la franja costera, pero si en todo el territorio de la cuenca fluvial. El proceso de erosión y acarreo de sedimentos por los cauces es complicado y depende de múltiples factores, entre ellos el uso de la tierra, aunque puede ser transformado y por tanto, reducir las condiciones de degradación en las cuencas aluviales. De esta forma se actúa sobre la causa o la génesis del transporte de sedimentos hacia las bahías, playas y la desembocadura de los ríos. Otro elemento importante a considerar es la ubicación geográfica de la bahía, vulnerable al azote de ciclones, en la mayoría de los casos asociados a intensas y prolongadas precipitaciones.

El objetivo de esta caracterización es mostrar la importancia de las vías del transporte de materiales sólidos (sedimentos en suspensión y/o de arrastre o de fondo) hacia la bahía de Mariel, marcando la información y los datos relacionados con las precipitaciones, relieve del territorio, cuencas hidrográficas y los caudales líquidos de los ríos Bongo, Dominica y Arroyo Cañas. En la Figura 1 se aprecia el entorno de la bahía de Mariel, así como los principales objetos naturales y de origen antrópico del territorio.

Fig. 1. Sistemas fluviales en el entorno de la bahía de Mariel



2. Precipitación

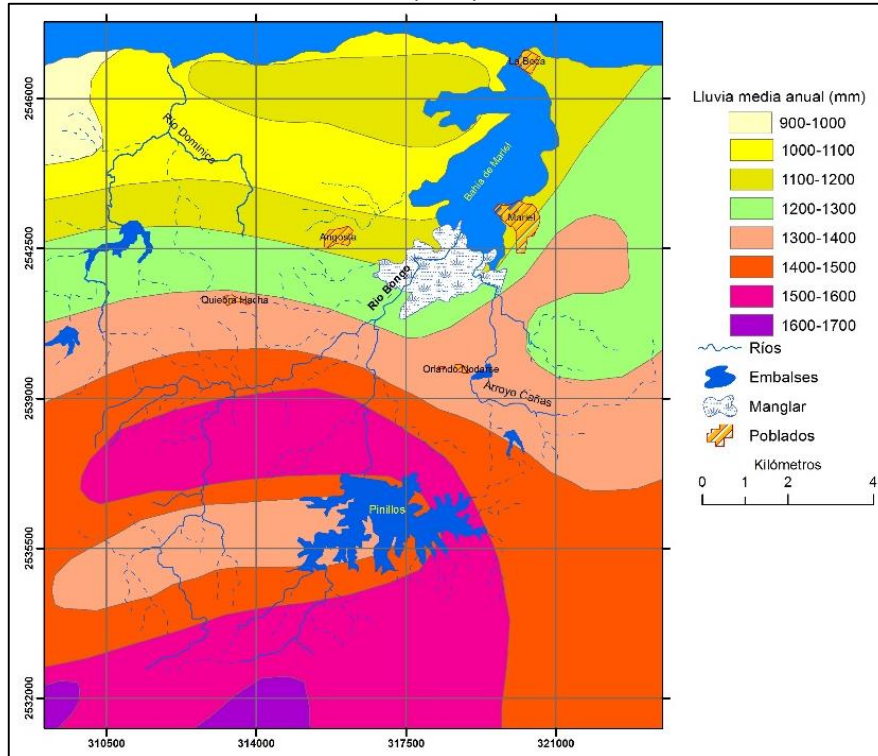
2.1. Lluvia media anual

Considerando la disponibilidad de un mapa isoyético elaborado para todo el país (Rodríguez, F., et al., 2005), se utilizará ese trabajo para determinar la lluvia media anual en el entorno de la zona de estudio, aplicando la técnica de la precipitación media ponderada.

Mediante un Sistema de Información Geográfica (SIG) y el mapa isoyético elaborado para Cuba, se han incorporado las isoyetas correspondientes al territorio, como puede apreciarse en la Fig. 2.1-1. En el mapa se observa un aumento de las precipitaciones desde la costa hacia el interior, lo cual responde a la regularidad normal del período lluvioso (mayo– noviembre). La precipitación media anual para la zona, según los cálculos realizados es igual a 1 235 mm.

Se observa un núcleo de más de 1 500 mm en la parte alta de la cuenca del río Bongo, el principal acarreador de sedimentos hacia la bahía, constituyendo la alimentación permanente de este río, garantizando así su escorrentía anual.

Fig. 2.1-1. Lluvias medias anuales (mm) en el entorno de la bahía de Mariel



2.2. Lluvia máxima diaria

El valor de las precipitaciones máximas diarias, es decir, la lámina de lluvia máxima registrada durante 24 horas, es un parámetro importante por su influencia en la formación de procesos erosivos y transporte de sedimentos hacia la bahía.

La determinación de las precipitaciones máximas diarias para distintas probabilidades se ha realizado a partir de la información obtenida de los registros de lluvia en cuatro pluviómetros ubicados dentro del área de estudio. En la Tabla 2.2-1 pueden verse los datos de dos de estos equipos, utilizados en los cálculos directos y en el mapa de la Fig. 2.2-1, la ubicación. La metodología a utilizar es conocida en la literatura hidrológica como el “método estación-año”.

Figura 2.2-1. Ubicación de los equipos pluviométricos utilizados en este informe

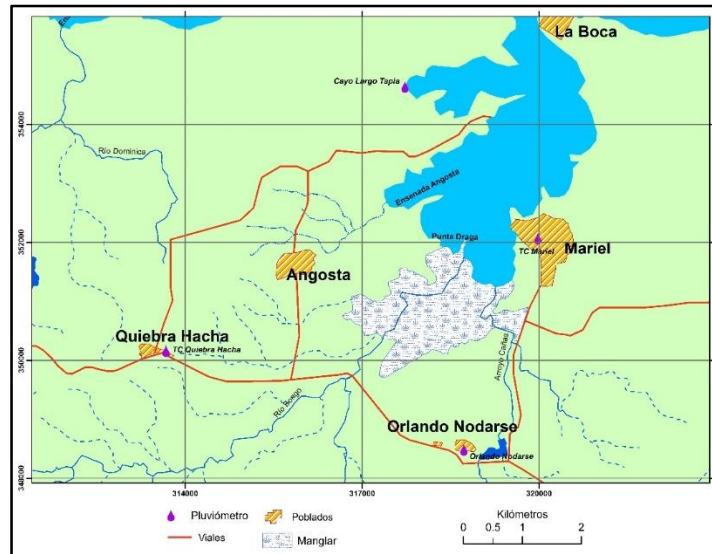


Tabla 2.2-1. Pluviómetros seleccionados para determinar la lluvia máxima diaria en entorno de la bahía de Mariel por el método “estación–año”

N° Control	Coordenadas		Nombre	Altitud (m.s.n.m.)	Período observación
	N	E			
LH-381	354.7	317.6	Cayo Largo Tapia	5	1965 – 1985
LH-384	348.5	318.9	Orlando Nodarse	20	1948 – 1991

Fuente: Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH)

Mediante el procesamiento hidrológico–estadístico ha sido posible calcular los valores de probabilidades de ocurrencia correspondientes a 1%, 5%, 10% y/o de cualquier otra probabilidad (Tabla 2.2-2).

Tabla 2.2-2. Cálculo de las lluvias máximas diarias para distintas probabilidades

Promedio de lluvias máx.=112.4	P R O B A B I L I D A D %(Tiempo de retorno en años)			
	0.5 (200)	1 (100)	5 (20)	10 (10)
Coeficiente modular (k)	3.41	2.97	2.02	1.66
Lluvia máxima diaria (mm)	383	333	227	187

Fuente: calculado por el autor

El procesamiento y análisis de la data de las lluvias medias y máximas registradas en la zona muestra valores bajos de precipitación media anual, en comparación con el promedio para Cuba. Por otro lado, los valores máximos diarios para distintas probabilidades son altos, y es precisamente este parámetro el detonador principal de la erosión de los suelos y por ende del acarreo de sedimentos hacia la bahía. En el equipo LH-384, situado en “Orlando Nodarse”, se registró una lluvia máxima diaria de 286 y 367 mm en los años 1968 y 1979, respectivamente.

La fuerte precipitación causa dos tipos de destrucción. El primero es debido a la infiltración del agua en las edificaciones produciendo daños estructurales; si la lluvia es continua y persiste, las estructuras simplemente pueden colapsar por el peso del agua absorbida. El segundo, más generalizado, común y mucho más dañino, es la inundación sobre tierra, que pone en peligro determinado territorio junto con sus estructuras e instalaciones críticas de transporte, tales como carreteras y puentes, entre otros.

Los deslizamientos, como peligros secundarios, frecuentemente son originados por una fuerte precipitación. Las áreas con pendientes, desde medianas hasta muy pronunciadas, se sobresaturan y fallan a lo largo de las zonas más débiles. Esto significa que no son solo los terrenos bajos los únicos lugares vulnerables a la precipitación.

3. Hidrología

En el territorio aledaño a la bahía del Mariel existen varias corrientes fluviales superficiales, muchas de ellas con escorrentía solo durante el período lluvioso (mayo–octubre). Dada la ubicación de la zona de estudio en la franja costera y las precipitaciones medias anuales de 1 235 mm, no son condiciones muy favorables para la formación de importantes caudales. La Figura 3-1 corresponde a la Imagen Bing satelital de la zona en estudio, bajada con el software SASPlanet, donde se aprecian los arroyos Angosta y Cañas, así como el río Bongo, la corriente fluvial de régimen permanente que más aporta a la bahía, regulado por la presa Pinillos en su brazo derecho. También merece citarse el arroyo Dominica o Quiebra Hacha, que corre en la parte oeste y desemboca fuera de la bahía, aunque de acuerdo con la dirección de las corrientes marítimas podría llevar sedimentos hasta el cuerpo de la bahía (Tabla 3-1).

Figura 3-1. Imagen de la bahía de Mariel



Tabla 3-1. Parámetros morfométricos de las cuencas hidrográficas

CUENCA	Hmáx. (m)	A (km ²)	Hm (m.s.n.m.)	Yc (‰)	Yr (‰)	L (km)	Dd (km/km ²)
Río Bongo	143	77.9	46.8	158.0	4.2	14.8	2.4
Río Dominica	73	33.0	29.9	64.0	3.5	11.2	1.4
Arroyo Cañas	130	20.0	53.7	89.1	8.6	9.8	2.5

Hmáx.-altura máxima; A-área; Hm-altura media; Yc-pendiente de la cuenca; Yr-pendiente del río; L- longitud del cauce principal; Dd-densidad de drenaje.

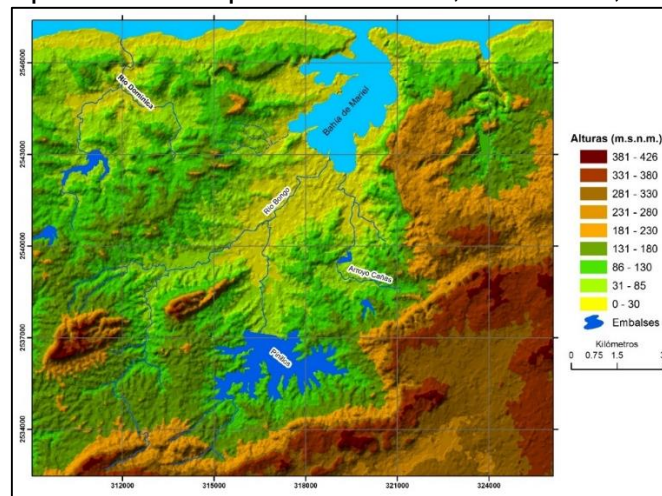
En el mapa se aprecian varios pequeños embalses (micropresas) de cortinas de tierra contruidos en las cuencas de los citados ríos y en el arroyo Cañas, también vertiendo en la bahía. Es importante señalar las áreas bajas pantanosas y de manglares alrededor de la bahía –en condiciones naturales– y que podrían ser “transformadas” parcialmente si se llevan a cabo construcciones en el área por encontrarse en un alto estado de vulnerabilidad y fragilidad.

4. Condiciones para la formación y acarreo de sedimentos hacia la bahía del Mariel

En este informe solamente se presentan las características generales relacionadas con la génesis y transporte de sedimentos hacia la bahía, lo cual podría servir como un llamado para la ejecución de trabajos prácticos–investigativos que permitan tomar las medidas requeridas para reducir la afluencia de materiales sólidos hacia la bahía. Si se observa el modelo digital del relieve del territorio en estudio (Figura 4-1), es comprensible que todo el material líquido y sólido de las cuencas de las corrientes

fluviales del Bongo y Cañas (en menor grado los arroyos de Angosta) tributan directamente a la bahía, principalmente durante las crecidas del período lluvioso (noviembre– abril) y en la temporada ciclónica, favorecido por zonas de altas pendientes del terreno. Por otro lado, el río Dominica fluye hacia el norte y no desemboca en la bahía, pero las crecidas del mismo pueden llevar los sedimentos al área de la bahía, movidos por las corrientes marinas.

Figura 4-1. Modelo Digital de Elevación (MDE) en el entorno de la bahía de Mariel (elaborado por el autor a partir del SRTM, 30 metros, NASA, 2010)



Otro elemento influyente en los procesos erosivos y en la formación de sedimentos es la cobertura vegetal en la superficie de una cuenca hidrográfica. Ante precipitaciones máximas de baja probabilidad y una protección escasa del terreno, las partículas del suelo son arrancadas y transportadas hacia la corriente fluvial más cercana para terminar su recorrido finalmente en el mar. Aunque este es un análisis preliminar, vale señalar, como potencialmente áreas erosionables, a los cultivos temporales –debido a la roturación y a quedar desprovistos de cobertura después de la cosecha– y las superficies no aptas para la agricultura y silvicultura.

Otra fuente de acarreo de sedimentos hacia la bahía es la potencial rotura de las cortinas de los pequeños embalses construidos en la zona, ante la formación de extraordinarias crecidas de los ríos captados, debido a las extremas precipitaciones asociadas a los ciclones y a la poca compactación de los diques de estos embalses.

5. Aporte de sedimentos a la bahía

La realización de las mediciones para determinar la formación y transporte de sedimentos lleva tiempo y resulta costosa, su precisión puede ser baja, incluso si se

dispone de datos correctos sobre el movimiento de una corriente no se sabe de dónde procede el suelo y cuándo se produjo el movimiento

No existen mediciones directas de sedimentos en las cuencas de los ríos Bongo, Dominica y Cañas, por tanto, en este informe se utilizarán modelos de cálculo deducidos para condiciones tropicales en base a datos de mediciones directas. En la práctica hidrológica internacional pueden encontrarse varios esquemas empíricos para determinar los sedimentos, pero es más aceptable emplear ecuaciones o metodologías ajustadas a las condiciones físico–geográficas insular y caribeña.

Considerando las condiciones insulares y las características fisiográficas e hidrometeorológicas de Cuba, es posible aplicar la metodología propuesta por Pérez Monteagudo (1985), quien empleó la data de mediciones hidrométricas realizadas en ríos cubanos por el INRH, para deducir ecuaciones que permiten determinar el módulo de escorrentía sólida a partir del módulo de escurrimiento líquido.

$$M_s = 11.76M_o^{0.8}$$

M_s - Módulo de escorrentía sólida (t/km².año)

M_o - Módulo o caudal específico de escorrentía líquida (L/s.km²)

R_o - Gasto o caudal sólido (kg/s)

ρ - Turbiedad media anual (g/m³)

W_s – Producción de sedimentos (t/año)

En el esquema de cálculo propuesto por P. Monteagudo, se aprecia un paso inicial, es decir, determinar el módulo o caudal específico de escorrentía líquida, pero tampoco existen datos de mediciones directas de los caudales líquidos en los ríos del territorio en estudio, en el entorno de la bahía de Mariel. Por tanto, es necesario aplicar el algoritmo deducido por Batista, J. L. (1991) para calcular el módulo de escurrimiento líquido, según la ecuación de tipo parabólica para las regiones Occidental y Central:

$$M_o = 1.15P^{4.74} * 10^{-14}$$

La determinación de la lluvia media anual (P) se calculó por el método de “ponderación”, de acuerdo con las áreas parciales y la precipitación entre las isoyetas correspondientes, utilizando el mapa isoyético elaborado por Rodríguez Rodríguez (2005).

A partir de los datos de la precipitación media, área se calcula el escurrimiento medio anual líquido para cada una de las cuencas hidrográficas (Bongo, Dominica y Cañas),

teniendo en cuenta las recomendaciones de Batista, J. L. (1991), obteniéndose los resultados apreciables en la Tabla 5-1.

Tabla 5-1. Precipitación media anual (**P**) y módulo de escorrentía líquida (**Mo**) en los ríos estudiados

CUENCA	A (km²)	Hm (m.s.n.m.)	P (mm)	Mo (L/s.km²)
Río Bongo	77.9	46.8	1 444	10.9
Río Dominica	33.0	29.9	1 221	4.92
Arroyo Cañas	20.0	53.7	1 367	8.40

Por último, se calcula el escurrimiento sólido de los tres ríos hacia la bahía, expresados en la cantidad de toneladas a escurrir desde un km², durante un año promedio (**M_s**); los kg por segundo de sólidos en suspensión acarreados por la corriente líquida (**R_o**) y los gramos de sedimentos sólidos en la corriente (**ρ**), Tabla 5-2.

Tabla 5-2. Sólidos en suspensión en las corrientes fluviales de Bongo, Dominica y Cañas

CUENCA	A (km²)	Mo (L/s.km²)	M_s (t/km².año)	R_o (kg/s)	ρ (g/m³)
Río Bongo	77.9	10.9	79.6	0.20	236
Río Dominica	33.0	4.92	41.6	0.04	250
Arroyo Cañas	20.0	8.40	62.2	0.04	235

Para conocer la producción de sedimentos o la cantidad de escorrentía sólida que aportan los ríos anualmente, como promedio hacia la bahía de Mariel, se aplica la ecuación siguiente, mientras los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 5-3.

$$W_s = \frac{R_o \cdot 31536}{\beta}$$

Tabla 5-3. Promedio anual de la producción de sedimentos en suspensión en los ríos

CUENCA	A (km²)	R_o (kg/s)	β	W_s (t/año)
Río Bongo	77.9	0.20	0.9	7 008
Río Dominica*	33.0	0.04	0.8	1 577
Arroyo Cañas	20.0	0.04	0.75	1 682

β- relación entre sedimentos de fondo con los de suspensión.

*No afluye directamente a la bahía

Teniendo en cuenta la ausencia de observaciones sistemáticas relacionadas con el arrastre de fondo, se asume que los materiales gruesos, acarreados y transportados por los ríos durante las crecidas, es una cantidad aproximadamente igual a 20–30% de los sedimentos en suspensión. Esto significa un volumen total de escurrimiento de arrastre de fondo de los ríos Bongo y Cañas, movidos por las corrientes durante las crecidas y transportado hacia la bahía de Mariel, entre 2 100 – 2 200 t/año. La corriente del río Dominica no llega directamente a la bahía, por tanto, no podría mover arrastres de fondo hacia la bahía.

Conclusiones

Como se ha expresado anteriormente la producción de sedimentos depende de múltiples factores, no obstante, representado en un esquema muy simple podría resumirse que la situación de la cuenca fluvial (uso de la tierra), la cantidad e intensidad de precipitaciones y el escurrimiento fluvial constituyen los tres elementos claves.

No es posible actuar sobre la fuente natural de alimentación de los sistemas hídricos, es decir, las precipitaciones, pero sí reducir la magnitud de las crecidas o avenidas del río, y regular el escurrimiento medio anual, mediante un correcto manejo de las cuencas hidrográficas. Esto conllevaría a la reducción del transporte de sedimentos por los cauces fluviales y por tanto, la descarga de partículas hacia la desembocadura y la bahía de Mariel.

Esta disminución de la cantidad de sedimentos y cambios en el régimen hídrico sería el resultado de las acciones relacionadas con el uso de la tierra, tomando medidas encaminadas a reducir al mínimo posible las fuentes de producción de sedimentos que llegan a la bahía de Mariel, sin embargo, este tema podría ser objeto de una ulterior investigación mediante la aplicación de un proyecto aplicado.

Recomendaciones

- Durante un recorrido por el territorio de las cuencas hidrográficas aportantes a la bahía de Mariel, efectuado en agosto, 2015 y, analizando la génesis de formación de sedimentos en suspensión y de arrastre, se pudo constatar que la cubierta vegetal de las cuencas de los ríos Bongo, Cañas, Dominica, así como otras corrientes fluviales menos importantes presentan un cubrimiento de medio a alto, sin clasificar el tipo de vegetación. No obstante, sería

conveniente aumentar la cobertura boscosa en el entorno de la bahía de Mariel.

- Aunque de forma general, podría pensarse en la instalación de estaciones medidoras del caudal líquido y contenido de sedimentos en suspensión en los ríos Bongo y Cañas, lo más cercano posible a la bahía, donde no exista la influencia de la marea. Además de esto, mediciones sistemáticas de la batimetría de la bahía también serían muy necesarias para, en un futuro inmediato, establecer correlaciones entre el aporte de sedimentos medido en las estaciones de los ríos y la sedimentación en la bahía.

Referencias

1. Batista, J. L.: Cálculo del escurrimiento medio anual sin observaciones hidrométricas”. Revista Voluntad Hidráulica No.85, ISSN 0505-9461, pp. 2-7, La Habana, 1991.
2. NASA: Archivos hgt, Misión Topográfica Radar Shuttle (SRTM), 30 m, EE.UU. 2010.
3. Pérez Monteagudo, O. y A. Villamil: Sedimentos en suspensión en los ríos de Cuba. Revista Voluntad Hidráulica, N° 64, La Habana, 1985.
4. Rodríguez Rodríguez, F. F. y colectivo de autores: Estudio pluvial de Cuba. Período principal 1961-2000, INRH, La Habana, 2005.
5. SAS.Planet. GNU General Public License. <http://Sasgis.org>, versión 151111.9233, 2015.