

## Experiencias hidroecológicas en el diseño del pedraplén de Caibarién (2)

M.Sc. Ángel Quirós Espinosa  
Investigador Auxiliar y Profesor Auxiliar  
Centro de Estudios y Servicios Ambientales, CITMA, Villa Clara  
Email: [aquiros@cesam.vcl.cu](mailto:aquiros@cesam.vcl.cu)

Ing. Roberto Machado López  
Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos, Villa Clara

### RESUMEN

Se expone la forma en que se calculó la abertura de puentes, necesaria para mantener el mayor intercambio hidráulico posible entre ambas márgenes del pedraplén Caibarién-Cayo Santa María, así como la ubicación de cada puente en el vial. Se aplicó un cálculo diferente para cada sección del trazado -no para el trazado total- que tuviera condiciones hidráulicas cuasi-homogéneas basado en la continuidad de la masa e imponiendo una velocidad máxima bajo cada puente de 1,5 m/s que, según la experiencia de flujo de agua en canales, no llega a erosionar grava. Así se evitan erosiones en la abertura y en los conos de entrada y salida del agua. Se incluyen una serie de observaciones que, después de 18 años del cierre, se consideran indicadores de éxito ambiental de la obra.

**Palabras clave:** ambiente marino, hidráulica marina, obra costera, pedraplén marino.

## Hydroecological experiences in the design of Caibarién causeway (2)

### ABSTRACT

The way in which bridge openings were calculated as well as the position of each bridge at the road are presented. The openings must ensure the highest possible hydraulic interchange between both sides of Caibarién-Cayo Santa María causeway. A different calculation was applied for each layout section -not for the total layout- having quasi-homogeneous hydraulic conditions based on mass continuity and enforcing a maximum velocity of 1,5 m/s below bridges to prevent erosion, given that this velocity does not erode gravel according to current experience in channel flow. A series of observations are included that, 18 years after closure, seem to indicate a remarkable environmental success.

**Keywords:** marine environment, marine hydraulics, coastal works, marine causeway.

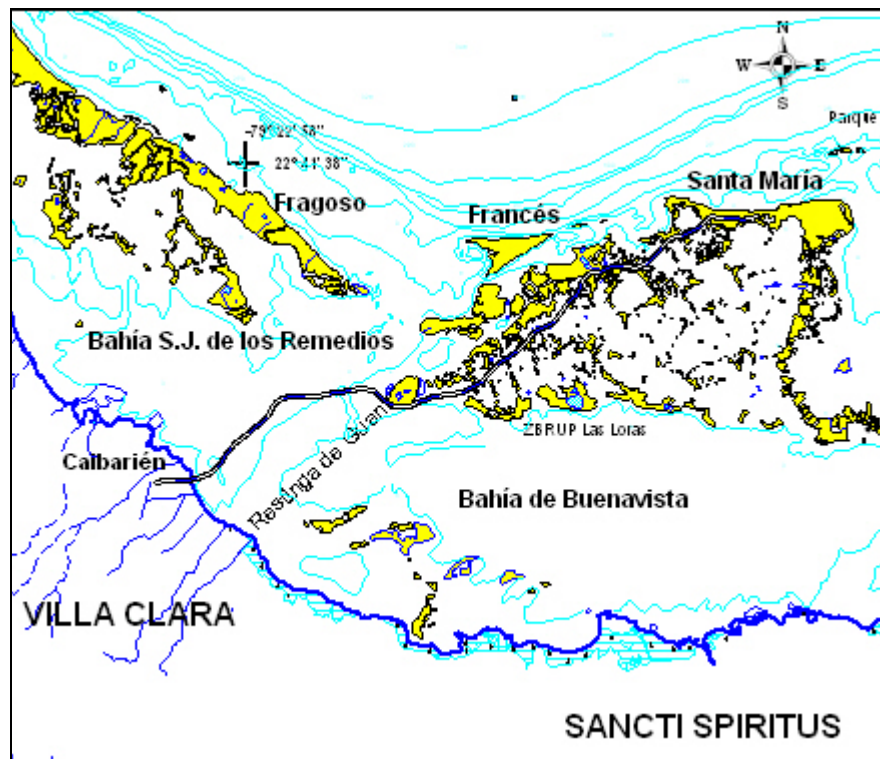
## INTRODUCCIÓN

Los pedraplenes marinos constituyen una fuente de estrés ambiental bien reconocida. Su construcción, sin embargo, es asumida con frecuencia en todo el mundo debido al menor costo de inversión que los viaductos, a manera de puente continuo.

Está demostrado que casi todos los trastornos ecológicos de los pedraplenes, en el ambiente marino donde se insertan, tienen un basamento hidráulico, al interrumpir o atenuar significativamente el recambio de agua plataforma-océano (Quirós 2013).

Para disminuir el efecto ambiental que puede significar la inserción de un muro continuo en el mar, que interrumpe el normal trayecto de las corrientes marinas, se incluyen puentes en su trazado.

No siempre los puentes son calculados de forma hidráulica, pero el cálculo del intercambio de agua en un pedraplén, mediante puentes, constituye una de las principales medidas de éxito ambiental en una obra de este tipo. En el presente artículo se pretende dar a conocer la forma en que se calcularon los puentes del pedraplén Caibarién-Cayo Santa María (figura 1), como una de las principales medidas que contribuyeron a mantener la estabilidad ambiental de la región.

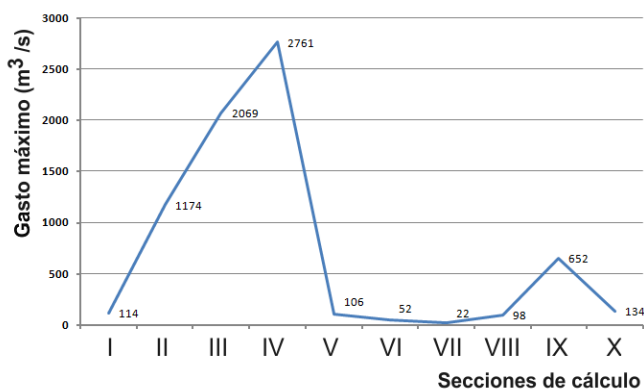


**Figura 1. Ubicación del pedraplén a Cayo Santa María en la región noreste de Villa Clara**

## DESARROLLO

El pedraplén Caibarién-Santa María, ubicado en la porción norte y central de Cuba (provincia de Villa Clara), posee 48 kilómetros de longitud y se extiende desde la costa de la isla principal del archipiélago cubano hasta los cayos más septentrionales de la plataforma insular (figura 1).

Un estudio de corrientes a lo largo del trazado seleccionado (Fernández y Chirino 1993, ICH 1993) permitió agrupar valores de gastos y, de esta forma, se determinaron diez tramos con magnitudes cuasi homogéneas, como se muestra en la figura 2. Los valores tomados son los de invierno por ser mayores que los de verano, y se corresponden a los gastos más altos detectados en los dos ciclos de marea que ocurren en un día.



**Figura 2. Secciones de cálculo identificadas según los valores de gasto medidos en el trazado del vial**

Las secciones de cálculo determinadas no tienen, obviamente, la misma longitud sobre el trazado y obedecen solo a razones hidráulicas que, a su vez, dependen del relieve del fondo y la morfología litoral. La tabla 1 muestra la relación de estos sectores con el trazado del vial. La segunda columna señala el punto inicial y final de cada sección.

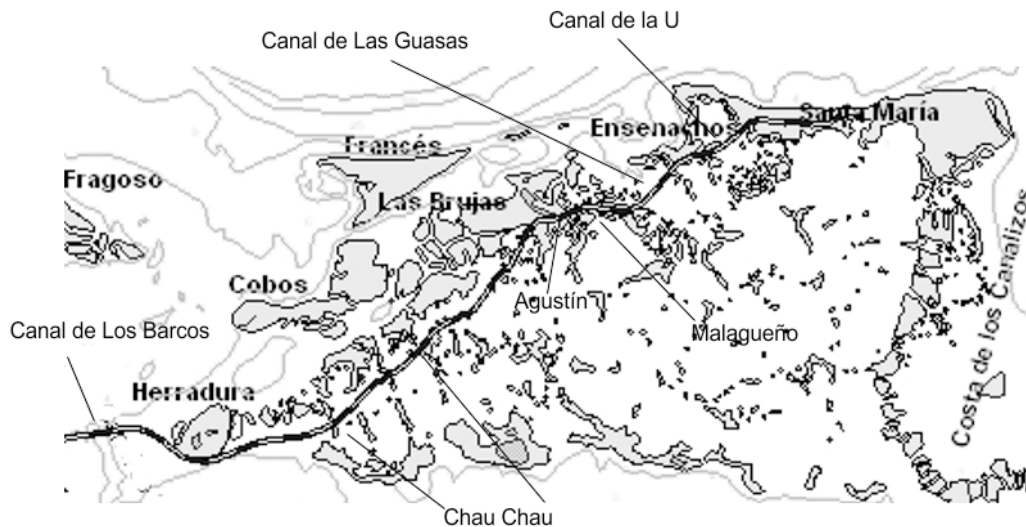
**Tabla 1. Secciones de cálculo hidráulico, límites superiores en el trazado, gastos y profundidad promedio**

Sección	Límites (m) (desde hasta)	Gasto (m³/s)	Prof. (m)
<b>I</b>	0 000 a 5 815	114	1.25
<b>II</b>	5 815 a 15 745	1174	3.95
<b>III</b>	15 745 a 17 975	2069	4.82
<b>IV</b>	17 975 a 28 465	2761	4.27
<b>V</b>	28 465 a 30 200	106	0.57
<b>VI</b>	30 200 a 31 130	52	0.28
<b>VII</b>	31 130 a 38 260	22	0.05
<b>VIII</b>	38 260 a 39 485	98	0.16
<b>IX</b>	39 485 a 44 825	652	1.42
<b>X</b>	44 825 a 48 000	134	0.45

Puede apreciarse una débil corriente litoral (sección I). Otro tanto ocurre con las secciones V, VI, VII y VIII, que se corresponden al tramo donde el vial, ya superadas las bahías interiores, ingresa en una zona de circulación muy limitada a causa de los numerosos cayos circundantes y la poca profundidad.

Si las secciones de cálculo son agrupaciones de valores continuos en el trazado, en estas, a su vez, pueden apreciarse cuatro grupos. El primero es la solitaria sección I que identifica la débil corriente litoral de deriva; en el segundo se agrupan las secciones II, III y IV, que identifican el paso por las bahías interiores y en el que influyen poderosamente las corrientes de la Canal de Los Barcos.

Las secciones de la V a la VIII forman un tercer grupo: las dos primeras son la zona de Chau Chau, para seguir con otras dos (VI y VII) de muy poca profundidad, tanto que emergen en mareas bajas, para seguir con los canales de Agustín y Malagueño (sección VIII). Por último, el resto de las secciones (IX y X) reflejan el Canal de Las Guasas y el Canal de la U, con evidente menor corriente el segundo por el carácter semi-cerrado del Sur de Santa María (figura 3).



**Figura 3. Extremo distal del vial. Se señalan canales y zonas relacionadas desde la V hasta la X secciones de cálculo**

El tratamiento hidráulico para determinar los puentes, no obstante, se realizó en cada sección de cálculo por separado, lo que tiene la ventaja de ubicar las aberturas para el intercambio de forma más eficiente.

Este tratamiento es el siguiente: se fijó una corriente máxima bajo los futuros puentes, que en este caso fue 1,5 m/s dado que la experiencia de transporte de agua en canales indica que valores superiores comienzan a erosionar grava.

Posteriormente se aplicó:

$$Q = AV \quad (1)$$

donde:

$$\begin{aligned} Q &= \text{gasto (m}^3/\text{s)} \\ V &= \text{velocidad del agua (m/s)} \\ A &= \text{sección hidráulica (m}^2\text{)} \end{aligned}$$

A su vez:

$$A = p \times L \quad (2)$$

Siendo  $p$  la profundidad más la carrera de mareas de 18 cm del lugar (sección hidráulica), y  $L$  la longitud total de puentes a determinar en la sección de cálculo en cuestión. Como medida de seguridad, la sección hidráulica se completa con la carrera de mareas menor de entre las identificadas, espacial y estacionalmente (18 cm), pues una menor sección indicaría mayor abertura de puentes; ello constituye un factor de seguridad al considerar en el cálculo la menor energía potencial para el movimiento de las masas de agua.

Así, la longitud total de puente de cada sección de cálculo es:

$$L = Q (1,5 \times p)^{-1} \quad (3)$$

El resultado obtenido se refleja en la tabla 2, donde también se consignan las profundidades promedio de la sección y las soluciones de puentes ejecutadas. Estas diferencias entre lo calculado y ejecutado se deben a los ajustes realizados según la tecnología constructiva (longitud de las piezas prefabricadas, tipo de cimentación, etc.) empleada en cada puente. Puede apreciarse en la misma tabla 2 que los puentes construidos suman 18,74 metros más que los calculados, y esto debe interpretarse como algo favorable al intercambio.

Los puentes se construyeron, para que fueran más eficientes, en los lugares más profundos y que exhibían corrientes más fuertes. Para esto, además de disponer de la batimetría del trazado, se realizó un análisis de fotos aéreas (vuelo K10, es el nombre dado al vuelo soviético, de fotos aéreas pancromáticas del territorio cubano, realizado en 1970.). En estas fotos se pueden apreciar claros arrastres de sedimentos en el fondo, que son el resultado de corrientes mayores que las de las zonas aledañas.

La demanda, de un año, de elementos pre-fabricados para los puentes, equivalía a la capacidad de construcción de cinco años de la provincia. Esta fue una de las razones que no permitieron ejecutar todos los puentes en la medida que avanzaba el vial. Para paliar el inconveniente se ubicaron pases de tubos de hormigón en desvíos, dejando el lugar donde se debía construir el puente.

Concluido el mismo se retiraban los tubos y el árido del desvío. Los pases de tubos, obviamente, no tienen la capacidad de intercambio hidráulico de un puente, por lo que se trató por todos los medios de acortar su permanencia. Además, no constituyen una solución a las migraciones de peces: la experiencia en lugar indica que los peces no intentan pasar por los tubos y son capaces de dejarse atrapar con redes antes de intentarlo.

**Tabla 2. Aberturas de puentes calculadas y ejecutadas por sección de cálculo** (La columna de la extrema derecha consigna el número de puentes y su longitud, se plasman de forma secuencial )

Sección	Profund. (m)	Abertura de puentes (m)			Puentes ejecutados cantidad (m)
		calculada	ejecutada	diferencia	
I	1,25	60,80	60	-0,80	(60)
II	3,95	198,14	200	1,86	2(100)
III	4,82	286,17	280	-6,17	2 (60) + 2(80)
IV	4,27	431,07	430	-1,07	(350) + (80)
V	0,57	123,98	120	-3,98	(24) + (60) + 3(12)
VI	0,28	123,81	120	-3,81	2(60)
VII	0,05	293,33	324	30,67	3(12) + 3(18) + (12) + (18) + 2(12) + 6(24) + 2(18)
VIII	0,16	408,33	405	-3,33	(24) + (100) + 2(18)
IX	1,42	306,10	310	3,90	(245) + (40) + (25)
X	0,45	198,52	200	1,48	(120) + (80)
Totales		<b>2430,26</b>	<b>2449</b>	<b>18,74</b>	43 puentes

## INDICADORES DE ÉXITO

El seguimiento ambiental de una obra de este tipo requiere dos enfoques: un tamizaje grueso y un tamizaje fino. El segundo, por su complejidad, amerita de un artículo en particular, por lo que en este trabajo se limita a exponer observaciones macroscópicas.

En todo el territorio influido hidrológicamente por el pedraplén, que alcanza más de 1000 km<sup>2</sup>, no se apreciaron muertes de manglares, ni siquiera de individuos aislados. Este, que fue uno de los efectos más reconocidos en la bahía de Los Perros (Gómez y Pasos 1992) y en Nuevitás (Quirós y Hernández 1983), resulta un excelente indicador.

En la sección V, distante más de 20 km de los arrecifes coralinos externos, se apreció la aparición de peces propios de estas formaciones, así como de colonias de corales de varias especies. Ello debe tomarse como un buen indicador, pues estas especies no pueden prosperar en aguas con turbiedad donde la luz no penetra eficientemente. Asociado también con la turbiedad, se constató el incremento de aves marinas en las bahías anteriores (secciones I a la V): unas especies aumentaron su abundancia (como el Pelicano, *Pelecanus occidentalis*) y otras aparecieron por primera vez en el lugar (como la Gaviota Real, *Thalasseus maximus*).

Estas especies, para existir en la zona, requieren que existan peces para su dieta y que las aguas tengan la visibilidad adecuada para poderlos ver y capturar.

En estas mismas zonas se incrementó el cangrejo moro (*Menipe mercenaria*), que era un recurso pesquero en el que la disminución de sus poblaciones había anulado su pesca; las poblaciones se han restablecido y la exploración del recurso ha sido continuada. Ningún otro recurso pesquero mermó su abundancia.

Los indicadores de éxito expuestos resultan muy confiables, pues la biodiversidad, el fitobentos y, sobre todo, los recursos pesqueros son factores muy dependientes de los cambios hidrodinámicos que puedan manifestarse debido a la construcción de pedraplenes (Quirós 2013).

## CONCLUSIONES

El uso de secciones hidrodinámicas cuasi-homogéneas constituye una forma adecuada de calcular los puentes necesarios para un pedraplén extenso.

La ubicación de los puentes por foto-interpretación es una forma confiable para lograr una mejor eficiencia en el intercambio, pues permite una mayor sección y modifica poco, en lo espacial, los flujos normales de agua.

La construcción del pedraplén a Cayo Santa María no ha provocado impactos ambientales negativos en la biota en general, ni en los recursos pesqueros, en particular.

## REFERENCIAS

- Fernández L.J. y Chirino A.L.** (1993) “Atlas oceanográfico de las aguas del archipiélago Sabana – Camagüey”. Instituto Cubano de Hidrografía, La Habana, 235 p.
- ICH** (1993). “Atlas de las aguas del archipiélago Sabana – Camagüey”. Instituto Cubano de Hidrografía, La Habana. 230 p.
- Gómez R. y Pasos C.** (1993) “Efectos del pedraplén en la bahía de Los Perros”. Informe Técnico. Centro de Investigaciones de Ecosistemas Costeros Cayo Coco, 21 p.
- Quirós A. y Hernández J.M.** (1983) “Efectos ambientales de la carretera a Cayo Sabinal”. Reunión Científica de los Profesores, Universidad Pedagógica José Martí, Camagüey.
- Quirós, A.** (2013) “Experiencias hidroecológicas en el diseño del pedraplén de Caibarién (1)”. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, 34 (2): 62-72, CIH, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae).