



<http://www.cioh.org.co> <http://www.dimar.mil.co>

## Artículo

# ESTUDIO Y EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN PARA LA PROTECCIÓN COSTERA DE UNOS SECTORES DE LA COSTA CARIBE COLOMBIANA

Andrés RESTREPO<sup>1</sup>, Pablo AGUDELO<sup>1</sup>, Carlos TEJADA<sup>2</sup>, Ricardo MOLARES<sup>3</sup>, Ricardo TORRES<sup>3</sup>, Andrés OSORIO<sup>4</sup>.

<sup>1</sup> Aqua & Terra Consultores Asociados S.A., Cra 63B No 34 – 22, Medellín, E-mail: [andres.restrepo@aquayterra.com](mailto:andres.restrepo@aquayterra.com).

<sup>2</sup> Dirección General Marítima, El CAN, Bogotá, E-mail: [ctejada@dimar.mil.co](mailto:ctejada@dimar.mil.co).

<sup>3</sup> Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas – CIOH, Isla Manzanillo, Cartagena de Indias, AA. 982, D. T. y C., Colombia, E-mail: [jsemon@cioh.org.co](mailto:jsemon@cioh.org.co).

<sup>4</sup> Universidad Nacional Sede Medellín, Calle 59A No 63 – 20, Medellín, E-mail: [androso@gmail.com](mailto:androso@gmail.com).

**Resumen** - La Dirección General Marítima a través del CIOH con el apoyo técnico de Aqua&Terra Consultores Asociados, ha desarrollado un proyecto titulado “Estudio y evaluación de alternativas de solución para la PROtección costera de unos sectores de la costa Caribe colombiana - EPROCA”, durante los años 2004 y 2005, cuyos objetivos específicos han sido efectuar un diagnóstico de la zona comprendida entre Punta Caribana y el delta del Sinú para conocer y entender los graves problemas de erosión costera de la zona, levantar y generar la información necesaria para caracterizar la hidrodinámica de la zona de estudio y poder desarrollar un modelo morfodinámico que describa el funcionamiento del sistema, para evaluar diferentes alternativas de solución para la protección costera de este sector de la costa Caribe colombiana. El artículo que aquí se presenta es un compendio de dicho proyecto, destacando los principales resultados obtenidos.

**Abstract** - The Dirección General Marítima (DIMAR) commissioned the CIOH with the technical support of Aqua&Terra Consulting, to develop the project “Estudio y evaluación de alternativas de solución para la PROtección costera de unos sectores de la costa Caribe colombiana - EPROCA” during the year 2004 and 2005. The specific objectives of the project were to carry out a study of the coastline between Punta Caribana and the Sinú delta, to get a good understanding of the serious problems caused by coastal erosion in the area and to obtain the necessary information to characterise the hydrodynamics of the zone, so as to be able to develop a morphodynamic model, which would describe the systems’ specific dynamics, in order to evaluate different shore protection solutions for this Colombian Caribbean coastal region. This paper is an abstract from this project, detailing the principal results that were obtained.

**Palabras clave** - Caribe, Colombia, erosión costera, morfodinámica.

**Key words** – Caribbean, Colombia, coastal erosion, morphodynamic.

## INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

La franja litoral comprendida entre el delta del río Sinú y el golfo de Urabá se encuentra sometida a un intenso proceso de erosión desde hace más de 40 años, alcanzando tasas de hasta 47 m/año en Punta Rey. Este proceso ha sido estudiado por diferentes autores y entidades (INVEMAR – 2004; Correa y Vernette – 2004; EAFIT, COLCIENCIAS, CORPOURABÁ, Dapard–2001; INVEMAR-CVS-CARSUCRE– 2001; Palacio y Restrepo – 1999; CORPOURABÁ, Universidad Nacional de Colombia, Medellín – 1998), buscando encontrar una respuesta a los diversos agentes que la causan y las posibles soluciones a los graves problemas que conlleva el retroceso de la línea de costa. Los esfuerzos realizados no han conseguido hasta el momento resolver el complicado problema, ya que en general, no se ha podido caracterizar adecuadamente la hidrodinámica regional asociada a dichos procesos. Para afrontar el problema los habitantes de la zona y sus responsables, han recurrido en muchas ocasiones a soluciones transitorias o carentes de un sustento técnico adecuado, de forma tal que en muchos lugares han terminado por intensificar el problema o simplemente han sido inversiones económicas “arrojadas al mar”, como lo documentan Correa y Vernette (2004), que calculan que se han realizado inversiones millonarias en obras de protección que no han conseguido detener los procesos erosivos.

En esta línea, la Dirección General Marítima a través del CIOH ha adelantado por su parte un proyecto titulado “Estudio y evaluación de alternativas de solución para la PROtección costera de unos sectores de la costa Caribe colombiana - EPROCA”, desarrollado en dos fases durante los años 2004 y 2005, cuyos objetivos específicos han sido efectuar un diagnóstico del área de estudio para conocer y entender la problemática, levantar y generar la información necesaria para caracterizar la hidrodinámica de la zona de estudio y poder desarrollar un modelo morfodinámico que describa el funcionamiento del sistema, para poder “estudiar y evaluar diferentes alternativas de solución para la protección costera de unos sectores de la costa Caribe

colombiana” (Tinajones – Punta Caribana). Para cumplir con estos objetivos, la DIMAR empleó sus capacidades científicas a través del CIOH y los buques de investigación (ARC Malpelo y ARC Quindío), con la asesoría técnica y capacitación de los especialistas en Ingeniería de Costas de AQUA & TERRA Consultores Asociados. El artículo que aquí se presenta es un compendio de dicho proyecto, destacando los principales resultados obtenidos.

El estudio de la estabilidad del tramo litoral comprendido entre el delta de Tinajones (río Sinú) y Punta Caribana no puede ni debe llevarse a cabo sin un análisis regional de la unidad fisiográfica. Es decir, no es posible entender los procesos que ocurren en cada uno de los sectores sin conocer los procesos que ocurren en las zonas litorales de su entorno. Para alcanzar este objetivo se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Recopilar la información existente, generar la que haga falta para el estudio de la dinámica litoral y crear una base de datos para su análisis posterior.
- Realizar una descripción morfológica a nivel regional y sectorial.
- Analizar espacial y temporalmente, mediante técnicas estadísticas, las principales variables hidrodinámicas que influyen en el problema.
- Adelantar un análisis de la evolución y las intervenciones históricas en el litoral.
- Describir la dinámica litoral a nivel regional y sectorial.
- Plantear alternativas de solución a los problemas de la zona de estudio.
- Presentar el proyecto constructivo de la mejor alternativa de solución.

### **Levantamiento y generación de información**

Ha sido necesario levantar, adquirir y generar, según el caso, una base de datos correspondiente a información batimétrica y topográfica, perfiles de playa, muestras de sedimento de playas, líneas de costa, aerofotografías de la zona de estudio, datos de oleaje, datos visuales de oleaje de barcos en ruta y trayectorias de huracanes, entre otros. A modo de resumen se presenta el siguiente cuadro con la información recopilada y generada durante el EPROCA en los años 2004 y 2005:

Tabla 1. Información utilizada durante el proyecto EPROCA.

DATOS	DESCRIPCIÓN
Línea de Costa	Levantamiento Damaquiel-Tinajones. Mediante GPS y fotografías aéreas.
Batimetrías	Base datos CIOH (aguas profundas y someras). Levantamientos 2005 - Caribana, Caribana-Gigantón y Arboletes.
Perfiles de playa	130 perfiles desde la anteplaya hasta la batimétrica - 2m.
Granulometría	Se analizaron 180 muestras cubriendo toda el área.
Salidas de campo de reconocimiento	Levantamiento durante el 2004 y el 2005 en cinco salidas de campo de acuerdo con los requerimientos del proyecto.
Oleaje	Información de barcos en ruta, boyas instrumentales y generación sintética de oleaje por huracanes.
Marca	Información de mareógrafos del IDEAM.

#### ANÁLISIS DE INTERVENCIONES HISTÓRICAS

En los últimos años y con motivo del retroceso acelerado de la línea de costa, los habitantes de la región han intentado de múltiples maneras detener el proceso erosivo, o en su defecto controlarlo, aunque sin mucho éxito. A lo largo de toda la franja litoral se pueden observar gran cantidad de obras de protección, muchas de ellas artesanales, las cuales han sido “diseñadas”, por así decirlo, sin haber caracterizado la zona de actuación, las dinámicas actuantes y los procesos asociados a estas. Por esta razón y debido a la gran complejidad de los procesos sedimentarios asociados a la dinámica litoral de la zona, dichas actuaciones no han funcionado en su gran mayoría, y muchas de ellas han incrementado el problema de erosión local, al convertirse en una barrera para el transporte sedimentario asociado a la deriva litoral y a las corrientes producidas por la rotura del oleaje. Igualmente, en su mayoría, estas estructuras no han sido dimensionadas teniendo en cuenta las características del oleaje incidente, con un periodo de retorno asociado a la vida útil de diseño, por lo que el oleaje asociado a un evento extremal las destruye con relativa facilidad, dispersando por la playa los elementos que las conforman.

En su afán más que justificado por proteger sus viviendas e intereses de la erosión de playas y acantilados, los habitantes y gobernantes de la región han construido innumerables estructuras, entre las que se pueden encontrar espolones, enrocados, muros de protección, obras de defensa mediante la utilización de costales de arena y bolsacreto entre otros. Según un estudio realizado por Correa y Vernet en el 2004, solamente entre las poblaciones de Arboletes

y San Juan de Urabá se han construido cerca de 43 estructuras de protección, demandando inversiones públicas y privadas calculadas en alrededor de los \$2.300'000.000.

En general los resultados obtenidos con estas obras han sido nulos, logrando la formación de pequeñas playas de no más de 15 m en contados puntos. Debido a la dirección de incidencia del oleaje, esta es una zona muy difícil de controlar, ya que las corrientes longitudinales producidas por la rotura del oleaje son muy intensas, dificultando la estabilización del escaso material sedimentario que se deposita en esta zona. Igualmente la degradación de muchas de estas estructuras ponen nuevamente de manifiesto el intento desesperado y sin ningún criterio de tipo técnico, para estabilizar y proteger la zona de los procesos erosivos, mediante la construcción indiscriminada y deficiente en cuanto a la estabilidad estructural de las mismas, generando falsas expectativas y costos económicos que finalmente no conducen a la solución adecuada. La zona de Punta Rey es otro claro ejemplo de lo que allí sucede, encontrándose intentos fallidos de protección del litoral por todas partes, y sin ningún resultado alentador.

#### EXTRACCIÓN INTENSIVA DE MATERIALES

Otro aspecto importante que se debe considerar dentro de las actuaciones antrópicas en la región, es la extracción intensiva de materiales de playa. Esta actividad según relatan los habitantes de la zona, se viene llevando a cabo durante las últimas cuatro décadas, siendo un factor muy importante al momento de evaluar las tasas de erosión en todo el litoral. Las playas que

se forman en las desembocaduras por los aportes de los ríos, se han convertido en lugares muy atractivos para la extracción de arenas a lo largo de toda la zona de estudio. Los habitantes afirman que trabajan de manera continua sacando todo tipo de material (arena, china, etc), donde son llenadas cuatro o cinco volquetas de entre 4 y 5 m<sup>3</sup> diariamente. Haciendo un cálculo aproximado, y suponiendo que solo trabajan unos 200 días al año, da un orden de magnitud de 5.000 m<sup>3</sup> anuales de material extraído en este punto, que si se multiplica por todos los puntos donde se extraen arenas a lo largo de la zona, representa un volumen importante de pérdidas de material dentro del balance sedimentario del sistema dinámico de la zona de estudio.

### DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN ACTUAL

Como ya se ha mencionado en los últimos años se ha producido un retroceso en la línea de costa entre el delta de Tinajones (río Sinú) y Punta Caribana. La magnitud de ese retroceso ha estado marcado tanto por las características físicas del litoral como por la dinámica marina; en algunas zonas, incluso, fenómenos geológicos como el diapirismo de lodo han podido influenciar directamente los procesos erosivos. En relación con lo primero, es claro que donde se observan puntos duros en la costa o donde el sedimento de las playas es más grueso, el retroceso ha sido menor. En cuanto a lo segundo, se ha establecido que donde mayor es la concentración de oleaje, y por ende de corrientes de deriva, mayor ha sido la erosión costera.

Las mayores tasas de retroceso de la línea de costa se observan entre Arboletes y Puerto Escondido. Varios son los factores para que esto ocurra. En primera instancia, Isla Fuerte genera una protección importante frente al oleaje en la parte norte de la zona de estudio, principalmente al delta de Tinajones, Moñitos, Broqueles y Río Cedro. Además, en esta zona se observan puntos duros más resistentes a la erosión que en las partes media y sur de la zona de estudio.

La orientación general de la línea de costa al sur de Arboletes hace que el oleaje proveniente del norte (el más frecuente y energético) incida casi perpendicularmente y las corrientes de deriva que se generan son mínimas como para transportar grandes cantidades de sedimento.

Adicionalmente, en la parte media de la zona de estudio, entre Puerto Escondido y Arboletes se presenta una zona de concentración de la energía del oleaje, que sumada a la oblicuidad con la que este incide sobre la costa, potencian la capacidad erosiva de las corrientes longitudinales.

### CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA

Los registros de oleaje disponibles en el área de estudio proceden de dos fuentes distintas: Datos visuales aportados por barcos en ruta (Módulo OLAS del SMC-COL) y datos registrados por boyas instrumentales en el Mar Caribe para su calibración. Debido a la poca fiabilidad de estos datos para el análisis de oleaje extremal, producido por el paso de tormentas tropicales sobre el Mar Caribe, ha sido necesario también considerar fuentes indirectas para la generación sintética de dichos datos: registros de velocidad del viento y presión atmosférica en algunos puntos del Mar Caribe. En total han sido utilizados 26.000 datos de oleaje visual, desde 1963 hasta 1997, datos de una boya de oleaje durante los años 1994 a 1996, y datos de tormentas tropicales de los últimos 20 años.

Si se realiza un tratamiento estadístico de algunas variables meteorológicas (viento y presión atmosférica) es posible estimar, a partir de modelos paramétricos presentados en la literatura científica, la altura de ola significativa,  $H_s$ , y el período de pico,  $T_p$ , producida por esos huracanes (Cooper, 1998; Young, 1988 y 1996). Después de hacer un exhaustivo análisis de datos de tormentas tropicales de los últimos 20 años en la zona de estudio, se puede concluir lo siguiente:

La altura de ola significativa es proporcional a la velocidad del viento registrada por satélite durante un huracán. Debe aplicarse una doble corrección. La primera de ellas,  $\alpha$ , se debe a la transferencia de energía de la atmósfera (por medio del viento y la presión atmosférica) al océano. La segunda,  $1/\beta$ , está asociada a los errores en el registro de la velocidad del viento por el satélite.

El período de pico está potencialmente relacionado con la altura de ola significativa.

El oleaje de temporal en el Mar Caribe está fuertemente influenciado por las tormentas

tropicales desarrolladas en las zonas del Atlántico cercano, Golfo de México y Caribe.

## REGÍMENES DE OLAJE EN PROFUNDIDADES INDEFINIDAS

### Regímenes medios

En la siguiente figura se presenta el régimen medio de Hs en profundidades indefinidas de la zona de estudio.

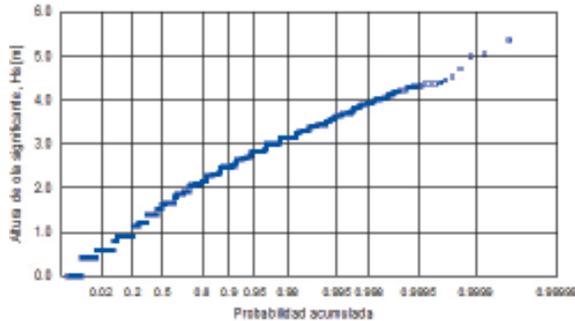


Figura 1. Régimen medio de Hs en profundidades indefinidas.

### Regímenes extremales

Siguiendo la metodología planteada, el régimen de temporal de Hs en profundidades indefinidas de la zona de estudio es el que se presenta en la Figura 2. Las líneas punteadas en rojo corresponden a las bandas de confianza asociadas a la variabilidad de los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$ . Los resultados obtenidos son altamente coincidentes con los encontrados por otros autores para diferentes puntos del Mar Caribe, lo que valida no sólo estos datos sino la metodología empleada para obtenerlos.

Obsérvese que la altura de ola significativa con un período de retorno de 36.57 años, que está asociado a una vida útil de 25 años para las obras que se propondrán, es de 6.63 m, mientras que para 50 años es de 6.85 m.

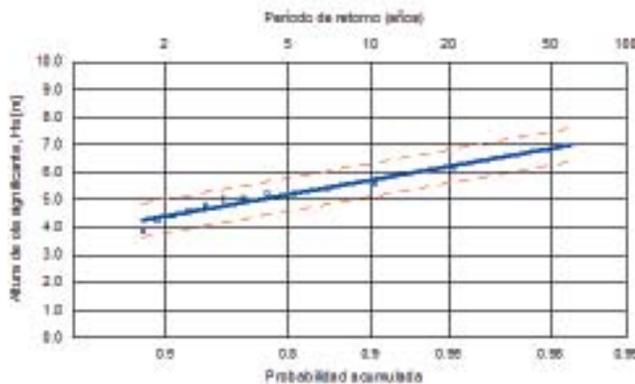


Figura 2. Régimen extremal de Hs en profundidades indefinidas.

### Oleaje en la zona de estudio

Para obtener los regímenes medios y extremales de altura de ola significativa en las zonas de interés, se ha hecho uso de la modelación numérica. En total se han propagado 216 casos de oleaje con el fin de tener información suficiente para la reconstrucción de dichos regímenes. Los resultados arrojan que para la zona de Arboletes, la altura de ola significativa de 36.57 años a una profundidad media de 2 m es de aproximadamente 1.50 m.

### Sistemas circulatorios

La rotura del oleaje genera una corriente, fundamentalmente paralela a la playa, que es función del ángulo con el que el oleaje aborda la costa (corrientes de incidencia oblicua) y de su altura de ola. La determinación de estas corrientes puede ser obtenida por medio de expresiones analíticas en ciertos casos de geometrías de playa simples. En el caso que nos ocupa, la complejidad de los contornos y de la batimetría existente, dan como resultado que estas corrientes sólo puedan ser calculadas por métodos numéricos. Para el presente estudio se ha utilizado como modelo de cálculo de corrientes asociado a la rotura del oleaje, el modelo COPLA desarrollado por el Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas de la Universidad de Cantabria. Básicamente, en lo que refiere a las corrientes por rotura, el modelo determina el tensor de radiación del oleaje a partir de los resultados obtenidos de altura e incidencia del oleaje obtenidos en la propagación, calculando el campo de corrientes y niveles debido a dichos tensores de radiación por medio de un modelo no-lineal que resuelve las ecuaciones integradas de Navier-Stokes.

### ANÁLISIS A CORTO PLAZO

La forma en planta de una playa viene condicionada, principalmente, por el sistema de corrientes asociado a la rotura del oleaje, por el sedimento existente (cantidad, tamaño) y por los contornos o geometría donde ha de encajarse dicha playa. Para el análisis de largo plazo se ha hecho uso de la expresión teórica propuesta por Hsu y Evans (1989) y la metodología propuesta por González (1995) para el ajuste de dicha expresión a playas reales:

$$\left[ \frac{R}{R_0} \right] = C_0 + C_1 \left[ \frac{\beta}{\theta} \right] + C_2 \left[ \frac{\beta}{\theta} \right]^2$$

En este artículo se presenta el ajuste realizado en la zona de Arboletes (Figura 3). Nótese la exactitud entre la línea de costa y el modelo (línea de color rojo). El punto de difracción está localizado a  $L/4$  de la antigua Punta Arboletes, ahora un “stack” situado a 1.6 km de Punta Rey, tal como se muestra en la figura. La zona de influencia de la difracción sólo abarca desde Punta Rey hasta el volcán de lodo. Entre éste y Punta La Tina se aprecia una costa recta. Incluso playas formadas por la difracción del oleaje en pequeños salientes rocosos como Punta La Tina, muestran un excelente ajuste al modelo de Hsu y Evans (1989).

### CÁLCULO DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Para el cálculo del transporte sólido longitudinal de sedimentos se ha hecho uso de la formulación del CERC (1984):

$$Q_s = 0.025 g^{0.5} \gamma^{0.5} (H_{br})^2 \text{seno}(2\alpha_{br})$$

donde:

$$\gamma = H_{br}/h_{br},$$

$H_{br}$  = altura de ola significativa en la línea de rotura.

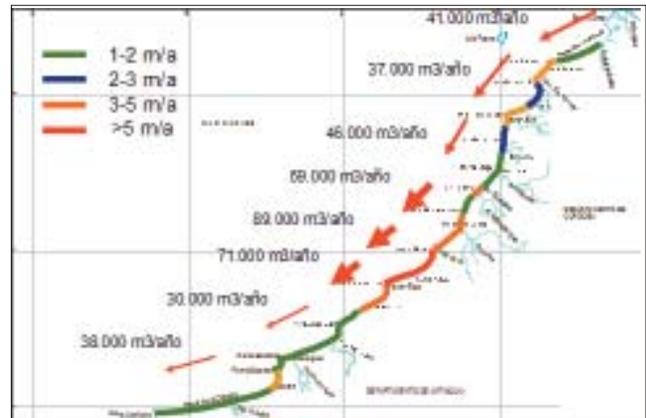
$h_{br}$  = profundidad en la línea de rotura.

$\alpha_{br}$  = ángulo de la cresta de la ola con la línea de costa.



**Figura 3.** Ajuste de la forma de equilibrio de Hsu y Evans (1989) a las playas de Arboletes.

De esta manera, haciendo uso de los resultados de las propagaciones numéricas del oleaje, es posible calcular el transporte de sedimento en cualquier punto del litoral analizado. El transporte neto se ha calculado promediando por zonas homogéneas, a partir de la incidencia del oleaje. Los resultados se presentan en la figura 4.



**Figura 4.** Transporte sólido longitudinal de sedimentos.

Es de aclarar que dadas las diferencias entre las distintas formulaciones para el cálculo del transporte sólido longitudinal, que en algunos casos llega a ser de hasta un orden de magnitud la diferencia, a la falta de datos confiables para una calibración y validación de los resultados obtenidos, estos valores deben ser entendidos en un contexto semicuantitativo. Es decir, presentan una idea del comportamiento y los patrones de esta variable, pero en ningún caso intentan reportar con toda fiabilidad las magnitudes estimadas.

### DIAGNÓSTICO Y ANÁLISIS DE RIESGO

Tras analizar cuidadosamente la zona, revisar diferentes estudios sobre los procesos que vienen ocurriendo, y definir un modelo morfodinámico que reproduzca estos procesos, se puede afirmar con total seguridad que la zona se encuentra en un estado de desequilibrio, debido fundamentalmente a la disminución en los aportes sedimentarios provenientes de la desembocadura del río Sinú, por diferentes causas entre las que se destacan la formación del delta, la construcción de la presa de Urrá y los cambios en los usos del suelo, además de la extracción continuada de materiales de playa (arenas y gravas) a lo largo de todo el litoral.

La disminución del flujo entrante de sedimentos, ha causado que se produzca un proceso de erosión acelerada a lo largo de todo el litoral, asociado a la capacidad erosiva de la corriente litoral, que depende directamente de las características del oleaje incidente y del

ángulo de incidencia sobre la costa. Debido a este desequilibrio, los procesos erosivos continuarán afectando la zona hasta el momento que se reestablezca el equilibrio dinámico anteriormente existente, o hasta que las variables que intervienen en el proceso cambien o modifiquen las condiciones del entorno acercándose al equilibrio. La conclusión general es que en todo el tramo costero entre Punta Caribana y el delta de Tinajones hay un desequilibrio sedimentario cuya consecuencia es una erosión generalizada de toda la zona, exceptuando sitios muy puntuales.

Para intentar solucionar el problema, sería necesario plantear alternativas de solución a lo largo de toda esta franja litoral. Con el ánimo de determinar los sitios donde se plantearán las alternativas de solución de mayor prioridad, se ha hecho un análisis de riesgo que tiene en cuenta tanto la amenaza natural como la vulnerabilidad de la población. Este análisis se ha llevado a cabo en términos de la erosión de la línea de costa y la población en las cabeceras municipales, como es el caso de San Juan de Urabá y Moñitos, con una gran cantidad de habitantes que podrían verse afectados por la erosión de sus playas. No obstante, en estas poblaciones se aprecian tasas de retroceso bajas o medias. Otras poblaciones como Los Córdoba, por el contrario, muestran tasas de erosión muy altas pero la concentración de población es muy baja. En ese sentido, se ha determinado que la zona entre Punta Rey y Arboletes es el tramo de costa que mayor riesgo tiene (considerando las amenazas naturales y la vulnerabilidad de la población).

#### ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN PLANTEADAS

Una vez caracterizada la zona de estudio, entendidos los fenómenos que en esta suceden y teniendo en cuenta el análisis de riesgo de la zona de estudio, se han planteado una serie de alternativas que permitan dar solución a los problemas asociados a la erosión costera en el municipio de Arboletes. Una de las formas más efectivas de intervenir ante el problema de erosión acelerada, es la implementación de sistemas cerrados en equilibrio estático, que garanticen como su nombre lo dice, el equilibrio estático sedimentario, es decir, que además de que el balance sedimentario sea igual a cero, no

exista ningún tipo de flujo sedimentario de entrada y salida en el sistema.

#### Descripción de las diferentes alternativas planteadas

A continuación se describen cada una de las alternativas planteadas y se analiza su influencia sobre la dinámica litoral de la zona.

**Dique en Punta Rey:** Se propone la construcción de un dique de abrigo de 1.450 m de longitud, entre Punta Rey e Isla Rey, y la regeneración de 3 km de playas entre el volcán de lodo y Punta Rey. El dique se plantea en cuatro secciones diferentes, dependiendo principalmente de la profundidad de emplazamiento de cada uno de los tramos, con el objeto de disminuir los costos del proyecto sin perjudicar la estabilidad de la estructura.

**Tómbolos en Arboletes y en volcán de lodo:** Formación de Tómbolos mediante la construcción de siete diques exentos frente al casco municipal de Arboletes, de 100 m de longitud cada uno, a una distancia de 85 m de la línea de costa, y la correspondiente regeneración de las playas abrigadas por estas estructuras. De igual forma frente al volcán de lodo se plantea la construcción de tres diques exentos a una distancia de 100 m de la línea de costa.

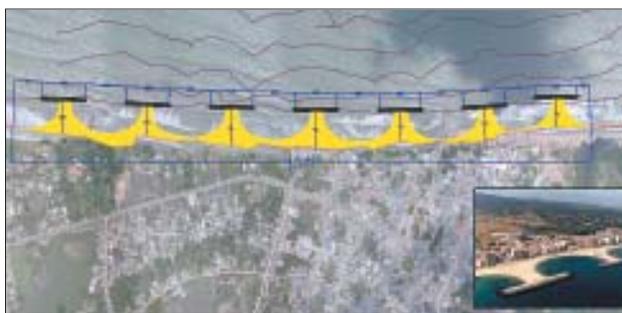


Figura 5. Tómbolos en Arboletes.

**Espolones en Arboletes y volcán de lodo:** Se plantea la regeneración de las playas y su estabilización, mediante la implementación de ocho espolones perpendiculares a la línea de costa frente al casco municipal de Arboletes, de 130 m de longitud cada uno, con una distancia de 145 m de separación entre cada uno de ellos y el posterior vertido de arenas para la regeneración de las playas abrigadas por estas obras. De igual forma, frente al volcán de lodo se plantea la implementación de cuatro

espolones con una distancia de 120 m de separación entre cada uno de ellos y el posterior vertido de arenas.

**Paseo marítimo en Punta Rey y en Minuto de Dios:** Otra alternativa que puede ser implementada para combatir el avance de la erosión costera son las obras de protección longitudinal, paralelas a la línea de costa para detener su retroceso. Se basan básicamente en generar una superficie de contacto con el mar, capaz de soportar la acción del oleaje y las corrientes producidas por éste, garantizando así el no retroceso de la línea de costa definida en el proyecto. Es importante destacar el papel que juegan los diferentes elementos de las estructuras planteadas, ya que cada uno de ellos contribuye a generar las condiciones de filtro necesarias para que la parte más fina del talud no se erosione, al filtrarse por los diferentes intersticios entre las capas de la estructura de protección.

**Tómbolos y paseo marítimo en Arboletes:** Esta alternativa se fundamenta en la combinación de dos de las alternativas anteriormente descritas, buscando optimizar de manera eficiente la superficie de playa y la protección de la línea de costa frente a la erosión. La distribución espacial que aquí se presenta es solamente un ejemplo de las múltiples combinaciones que podrían resultar, al mezclar los tómbolos y los paseos marítimos frente al casco urbano del municipio de Arboletes.

#### Influencia sobre la dinámica litoral

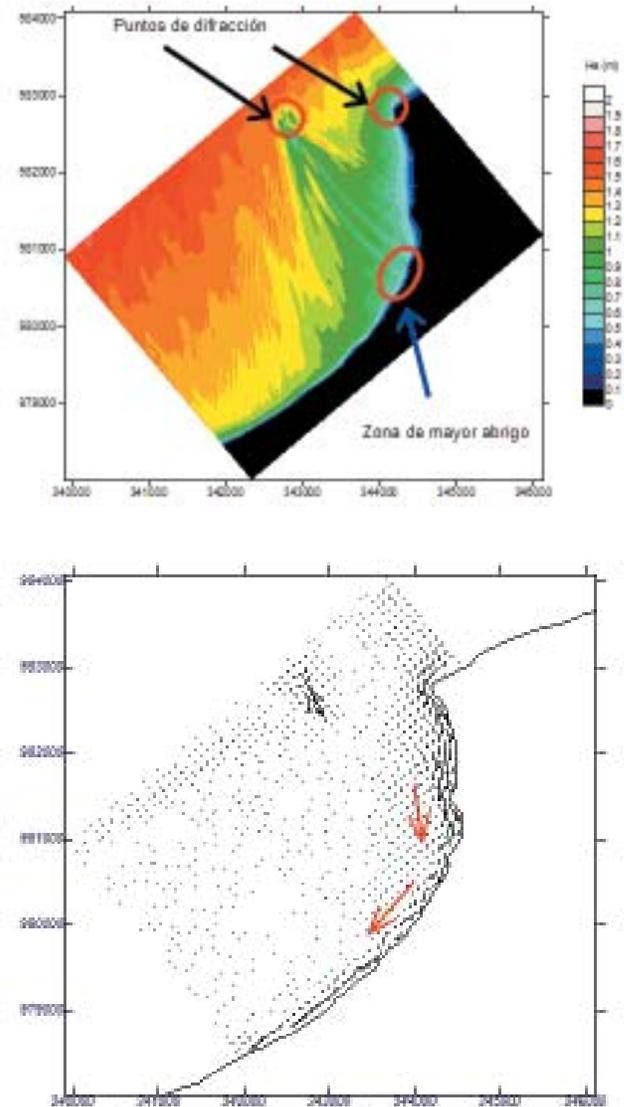
Para ver la influencia de las obras en la dinámica litoral del entorno, se han propagado dos casos de oleaje, un oleaje típico del régimen extremal y un oleaje característico de la rama alta del régimen medio, lográndose así, un análisis en el corto y largo plazo.

#### Situación actual

Para analizar la influencia de las obras sobre la dinámica litoral, se hace necesario caracterizar la situación en la que se encuentra la zona de interés, y de esta forma, mediante la comparación de las diferentes variables que intervienen en la dinámica litoral, se puede proceder a evaluar la influencia de cada una de las actuaciones propuestas.

**Oleaje:** Para analizar el oleaje en esta zona, se ha realizado un estudio de propagación del oleaje en una malla de detalle. Se puede observar que hay dos zonas de difracción, Punta Rey y la

isla localizada frente a ésta. Si bien esta isla tiene un efecto de abrigo sobre buena parte del tramo analizado, la zona de mayor abrigo se encuentra a unos 500 m al norte del volcán de lodo (Figura 6). Entre esta zona y Punta Rey es donde el oleaje incide con mayor oblicuidad, alcanzando un ángulo de  $25^\circ$  respecto a la línea de costa.



**Figura 6.** Altura de ola significativa y corrientes. Situación actual.

**Sistemas de corrientes en playas:** La gran oblicuidad con la que incide el oleaje sobre la zona de Arboletes genera corrientes mucho mayores que en otros puntos del litoral. En general, las corrientes debidas al oleaje siguen una trayectoria Norte-Sur durante casi todo el año en el tramo Punta Rey-volcán de lodo y NE-SW en el tramo volcán de lodo-Arboletes. Las corrientes

que se observan en el islote localizado frente a Punta Rey son producto de la rotura del oleaje.

### DIQUE EN PUNTA REY

**Oleaje:** Como era de esperarse, el dique propuesto entre Punta Rey y la isla localizada frente a ésta, implica una barrera

para el oleaje incidente, provocando la rotura y difracción del oleaje. Como consecuencia se genera una zona de abrigo bastante amplia entre Punta Rey y el volcán de lodo. No obstante, las playas del casco urbano de Arboletes no alcanzan a sentir la disminución de la altura de ola por efecto de esta obra, tal y como puede verse en la Figura 7.

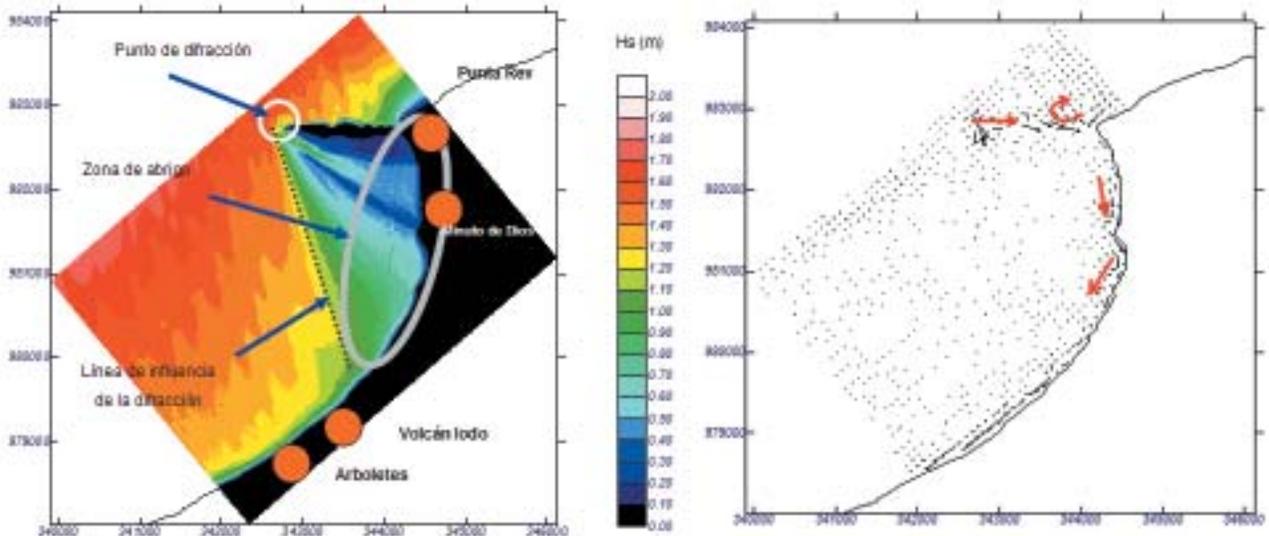


Figura 7. Altura de ola significativa y corrientes para la alternativa del dique.

### SISTEMAS DE CORRIENTES EN PLAYAS

La Figura 7 muestra los sistemas de corrientes producidos por el oleaje con la presencia del dique. Nótese que se forma un bucle circulatorio al norte de la obra, como consecuencia del cruce de los trenes de oleaje que inciden en la playa y a lo largo del dique. El gradiente longitudinal de altura de ola producido por la difracción del oleaje y el abrigo que el dique produce, generan un sistema de corrientes que contrarresta la tendencia sur-oeste de las corrientes de la zona, unido a la transferencia lateral de cantidad de movimiento, generando una zona de calma en la zona de abrigo, donde alcanzan a verse todavía corrientes pero de muy escasa magnitud hacia el Sur.

### Influencia de las obras en la dinámica litoral del entorno

La construcción de un dique de 1.450 m de longitud en Punta Rey garantizaría la estabilidad de las playas y la línea de costa entre Punta Rey y las cercanías del volcán de lodo, debido fundamentalmente al gradiente de altura de ola producido por la difracción del oleaje sobre la estructura, generando una zona de sombra frente al oleaje incidente. De igual forma, la

estructura actuaría como una barrera para el transporte litoral, que viaja con dirección SW, generando una zona de acumulación al Noreste de la obra, haciéndose necesaria la planificación de una campaña periódica de by-pass de arenas desde la zona de acumulación, hacia las playas de Arboletes.

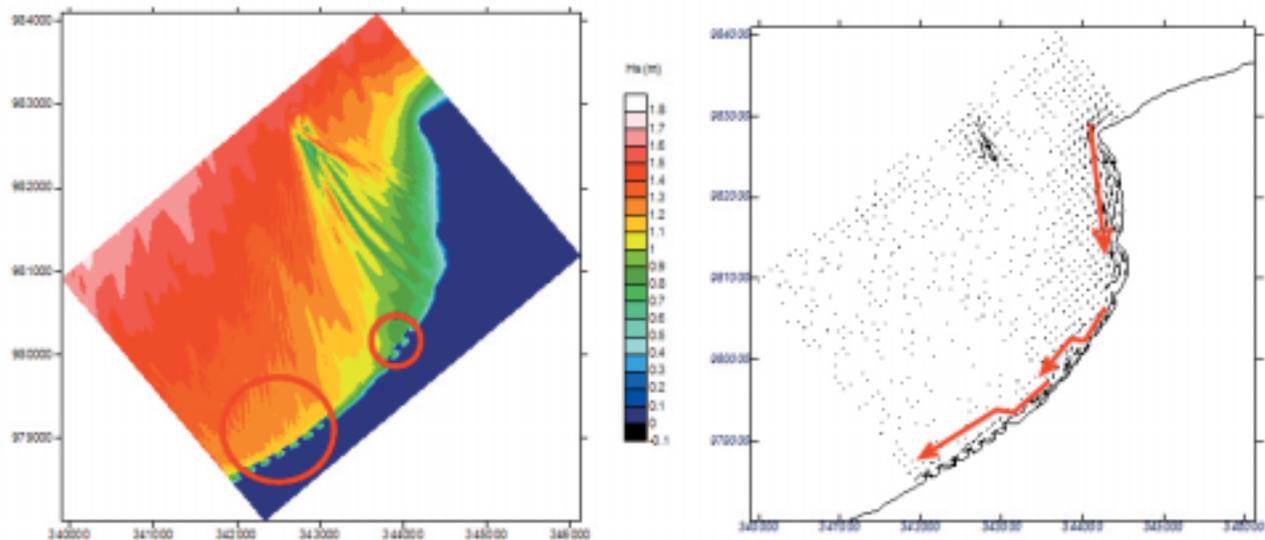
### Diques exentos (tómbolos) o perpendiculares a la línea de costa (espolones) en Arboletes y volcán de lodo

A continuación se presentan los resultados de las simulaciones de oleaje y corrientes de oleaje considerando la alternativa de los diques exentos frente al casco urbano de Arboletes y volcán de lodo para la formación de tómbolos. De manera análoga, los resultados aquí presentados se pueden considerar igualmente válidos para la situación de la alternativa de espolones, ya que la interferencia con el flujo medio de energía que presentan éstos y las corrientes asociadas, son a los efectos, prácticamente similares debido fundamentalmente a su configuración y ubicación.

**Oleaje:** Los diques exentos se localizan aproximadamente en la batimétrica -2.0 m, a una

distancia media de 100 m de la línea de costa. Esto hace que la influencia de estas obras sobre la dinámica litoral tenga un carácter muy local. La Figura 8 muestra los resultados de altura de ola significativa para los casos simulados. Nótese que en comparación con la situación actual (Figura 6), en la situación con diques exentos y tómbolos se observan los mismos patrones de oleaje regional, con sus respectivos puntos de difracción y las mismas

zonas de abrigo, y salvo las zonas donde se localizan las obras, muy cerca de la línea de costa, la altura y dirección de propagación del oleaje no varía entre ambas situaciones. De manera muy local, influenciado por las estructuras, el oleaje se difracta en cada uno de los extremos de los diques, propiciando un gradiente longitudinal de altura de ola que converge hacia el interior de la zona abrigada por las estructuras.



**Figura 8.** Altura de ola significativa y corrientes para la alternativa de diques exentos.

**Sistemas de corrientes en playas:** Como ya se expuso anteriormente, el gradiente de altura producido por la difracción del oleaje en los morros de las estructuras, genera un sistema de corrientes hacia el interior de las zonas abrigadas, originando un sistema circulatorio en el interior del tómbolo. Adicionalmente, a nivel regional, se puede observar cómo el sistema de corrientes longitudinales con orientación NE-SW se separa de la línea de costa en cercanías de las estructuras, debido fundamentalmente a los cambios locales de altura de ola, producidos por la presencia de las estructuras y las playas asociadas a estas que han modificado la configuración batimétrica. (Figura 8).

### **Influencia de las obras en la dinámica litoral del entorno**

Las obras planteadas no generan ningún tipo de influencia en la dinámica litoral del entorno a nivel regional, ya que su influencia es muy localizada, generando un sistema circulatorio de corrientes que permiten garantizar la estabilidad de las playas protegidas por las

estructuras, creando un sistema aislado en equilibrio estático.

Las alternativas planteadas buscan establecer sistemas cerrados de equilibrio estático, ya sea mediante la implementación de tómbolos o playas encajadas, partiendo de la premisa de colmatación del sistema, de forma tal, que no se conviertan en un nuevo elemento de afección a la dinámica litoral de la zona, garantizando que el flujo sedimentario que pasa por los contornos de las actuaciones, no se vea afectado de ninguna manera por las nuevas estructuras.

El conjunto estructura-playa está diseñado de tal manera que los perfiles de las playas regeneradas estarán en el umbral del equilibrio, de tal forma que si un grano de arena procedente del exterior entrase en éste, inmediatamente se presentaría un desequilibrio tal que el mismo sistema lo sacaría al exterior, debido a la colmatación sedimentaria con la cual ha sido diseñado. De esta forma se puede garantizar que las alternativas presentadas no influirán en el detrimento del litoral aguas abajo.

ALTERNATIVA		VENTAJAS	DESVENTAJAS
ID	NOMBRE		
1	Diques eventos ARB y VL + paseo marítimo en PR y MD	<p>Genera zonas de playa para garantizar el flujo turístico actual.</p> <p>La influencia de los diques eventos en la dinámica litoral es de carácter local.</p> <p>Protegería a la población de PR y de MD de la erosión costera.</p> <p>Los paseos marítimos no tienen repercusiones de la dinámica litoral.</p> <p>Proporcionarán un lugar de esparcimiento a la comunidad.</p> <p>Es una alternativa medianamente barata.</p>	Es necesario un gran volumen de material para poder desarrollarla.
2	Espolones ARB y VL + Paseo marítimo en PR y MD.	<p>Genera zonas de playa para garantizar el flujo turístico actual.</p> <p>Protegería a la población de PR y de MD de la erosión costera.</p> <p>Los paseos marítimos no tienen repercusiones en la dinámica litoral.</p> <p>Proporcionaría un lugar de esparcimiento a la comunidad.</p> <p>Es una alternativa medianamente barata.</p>	<p>La influencia de los espolones es de carácter regional.</p> <p>Es necesario un gran volumen de material para poder desarrollarla.</p>
3.1	Superdique + Regeneración de playas + Diques exentos en ARB + By-pass	<p>Genera una zona de abrigo entre Punta Rey y Volcán de Lodo.</p> <p>Genera zonas de playa en todas las zonas críticas.</p> <p>Proporciona una zona de apoyo de playa de Los Córdoba.</p> <p>Podría servir de base para la construcción de un puerto pesquero.</p>	<p>Es necesario un gran volumen de material para poder desarrollarla.</p> <p>Es una alternativa muy costosa.</p>
ALTERNATIVA		VENTAJAS	DESVENTAJAS
ID	NOMBRE		
3.2	Superdique + Regeneración de playas + Espolones en ARB + By-pass	<p>Genera una zona de abrigo entre Punta Rey y Volcán de Lodo.</p> <p>Genera zonas de playa en todas las zonas críticas.</p> <p>Proporciona una zona de apoyo de la playa de Los Córdoba.</p> <p>Podría servir de base para la construcción de un puerto pesquero.</p>	<p>La influencia de los espolones es de carácter regional.</p> <p>Es necesario un gran volumen de material para poder desarrollarla.</p> <p>Es una alternativa muy costosa.</p>
3.3	Superdique + Regeneración de playas + Paseo marítimo en ARB + By-pass	<p>Genera una zona de abrigo entre Punta Rey y volcán de Lodo.</p> <p>Genera zonas de playa en PR, ND y VL para garantizar el flujo turístico Proporcionaría un zona de apoyo de la playa de Los Córdoba.</p> <p>Proporcionaría un lugar de esparcimiento a la comunidad.</p> <p>Podría servir de base para la construcción de un puerto pesquero en la influencia en la dinámica litoral del entorno es de carácter local.</p>	<p>Es necesario un gran volumen de material para poder desarrollarla.</p> <p>Es una alternativa muy costosa.</p> <p>Deja a ARB sin playa.</p>
4	Paseo marítimo en PR, MD, VL y ARB.	<p>La influencia de las obras en la dinámica litoral del entorno es nula.</p> <p>Proporcionaría un lugar de esparcimiento a la comunidad.</p> <p>Se necesita poco material para llevarla a cabo.</p> <p>Es una alternativa muy barata.</p>	Deja a todos los casos urbanos sin playa.

Nomenclatura utilizada: PR: Arboletes VL: volcán de lodo MD: Minuto de Dios PR: Punta Rey

Una vez analizados los seis grupos de alternativas, se ha concluido que solamente los grupos 1 y 4 son viables desde el punto de vista técnico, económico y funcional, y por tanto, se plantean como posible solución a los problemas erosivos anteriormente analizados. Para ello será necesaria la realización de un proyecto constructivo, en el cual se presenten los diseños definitivos para las actuaciones planteadas.

#### Nota

La presente investigación ha estado vinculada al proyecto “Estudio y Evaluación de Alternativas de Solución para la PROtección Costera de unos Sectores de la Costa CARibe Colombiana Fase II”, realizado por el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas, CIOH, de la Dirección General Marítima de Colombia, DIMAR, con la capacitación y asistencia técnica de Aqua & Terra Consultores Asociados S.A.

#### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrade, C. A. (2002). Análisis del nivel del mar en la zona costera colombiana. En: INVEMAR, 2001. Definición de la vulnerabilidad de los sistemas bio-geofísicos y socioeconómicos debido a un cambio en el nivel del mar en la zona costera colombiana (Caribe, Insular y Pacífico) y medidas para su adaptación. Santa Marta, Colombia, Informe técnico N 4.
- Banton, J. D. (2002). Parametric Models and Methods of Hindcast Analysis for Hurricane Waves. IHE/Alkyon. MSc. Thesis Report.
- Birkemeier, W. A. (1985). Field data on seaward limit of profile change. *J. Waterways, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, 111, pp.598-602.
- Calverly, M. J., D. Szabo, V. J. Cardone, E. A. Orelup y M. J. Parsons (2002). Wave climate study of the Caribbean Sea, Proceedings of 7th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting.
- Chevillot Ph., A. Molina, L. Giraldo, C. Molina (1993). Estudio Geológico e Hidrológico del golfo de Urabá, *Boletín Científico CIOH*, (14), pp. 79-89.
- CIOH (1991). Condiciones Generales Climáticas Oceanográficas y Geomorfológicas, Golfo de Urabá, Anexo D, Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas – CIOH.
- Cooper, C. K. (1988). Parametric Models of Hurricane-Generated Winds, Waves and Currents in Deep Water, Proceedings of 20th Annual OTC, Houston, Texas, USA. pp 475-484.
- CORPOURABÁ - UNIVERSIDAD NACIONAL (1998). Informe Final sobre la “Evaluación de Zonas de Erosión Crítica en el Litoral Caribe Antioqueño”, Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Medellín, 1999p.
- Correa I. D. (1990). Inventario de Erosión y Acreción Litoral (1793-1990) entre Los Morros y Galerazamba, Departamento de Bolívar, Colombia. En: Hermelin M. (ed.) Memorias del Primer Seminario Andino de Geología Ambiental-I Conferencia Colombiana de Geología Ambiental. Agid Report No. 13.
- Dean, R. G. (1991). Equilibrium beach profiles: Characteristics and application. *J. Of Coastal Research*, 7.
- Dirección General de Puertos de España (1991). *Estudio sobre las observaciones visuales de barcos en ruta del N.C.D.C.* Programa de Clima Marítimo. Publicación No. 46.
- Duque-Caro, H. (1984). Estilo estructural, diapirismo y episodios de acrecimiento del terreno Sinú – San Jacinto en el Noroccidente de Colombia. *Boletín Geológico INGEOMINAS*. 27, (2), pp. 1-29.
- Goda, Y. (1988). On the Methodology of Selecting Design Wave Height. Proceedings of the 21st International Conference in Coastal Engineering, pp. 899-913.
- González, M. (1995). Morfología de playas en equilibrio. Planta y perfil. Tesis Doctoral. Universidad de Cantabria.
- Hsu, J. R. C. y C. Evans (1989). Parabolic bay shapes and applications, *Proc. of the Institution of Civil Engrs.*, 87, (2), pp. 557-570.
- IDEAM (2005). *Pronóstico de Pleamares y Bajamares Costa Caribe Colombiana*, IDEAM, Bogotá, D. C.
- INVEMAR (2002). NCCSAP, Colombia: Definición de los sistemas bio-geofísicos y socioeconómicos debido a un cambio en el nivel del mar en la Zonas Costeras colombianas (Caribe, Insular y Pacifico) y medidas para su adaptación, Informe Técnico No. 4, Evaluación de Impactos, Efectos y Respuestas del Sistema Natural, Santa Marta, Colombia. 107 p + anexos.
- INVEMAR (2004). Posibilidades de Reconstrucción de Punta Arboletes (Límites entre los departamentos de Antioquia y Córdoba).

- Laboratorio de Ensayos Hidráulicos de las Flores (1995). Obras de protección costera y muelle para embarcaciones menores, Puerto Escondido – Cordoba, Barranquilla.
- Molares, R. (2004). Clasificación e Identificación de las Componentes de Marea del Caribe Colombiano, *Boletín Científico CIOH*, (22), pp. 105-114.
- Molina, A., C. Molina, Ph. Chevillot (1992). La Percepción Remota Aplicada para Determinar la Circulación de las Aguas Superficiales del Golfo de Urabá y Las Variaciones de su Línea de Costa. *Boletín Científico CIOH*, (11), pp. 43-58.
- Page, W. (1986). *Geología sísmica y sismicidad del Noroeste de Colombia. ISA-INTEGRAL-WOODWARD - CLYDE CONSULTANTS*. Versión española por Rodrigo Alvarez, Ingeniería e Hidrosistemas IEH Ltda. 156p.
- Palacio, H y A. Restrepo (1999). *Influencia de la evolución del delta del río Sinú en los procesos morfodinámicos del litoral Caribe Antioqueño*, TDG Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.
- Robertson, K. (1989). *Evolución reciente del delta del Río Sinú, Colombia*, Cours International d'Océanographie Côtière en Région Caraïbe, Bull. IGBA, Bordeaux, (45), pp. 305-312.
- USACE (1984). *Shore Protection Manual*, U.S. Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center (CERC), Vicksburg, Mississippi, 2 vols.
- Vernette, G. (1985). *La Plate-forme Continentale Caraïbe de Colombie (du débouché du Magdalena au Golfe de Morrosquillo)*. Importance du diapirisme argileux sur la morphologie et la sédimentation. Thèse de Doctorat d'état, Université Bordeaux 1. France, 378 p.