

# Evaluación de la sensibilidad costera ante el impacto de derrames de hidrocarburos

## Coastal sensitivity evaluation for the impact of hydrocarbons spills



<https://cu-id.com/2377/v30nspe05>

✉Julio Ernesto Gómez Herrera<sup>1\*</sup>, ✉Lourdes Jiménez de la Fuente<sup>1</sup>, ✉Enzo Pranzini<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Centro de Investigación del Petróleo (CEINPET-CUPET), Cuba.

<sup>2</sup>Department of Earth Sciences, University of Firenze, Italy.

**RESUMEN:** Los mapas de Índice de Sensibilidad Ambiental (ISA) constituyen una herramienta informática de gran utilidad para las instituciones de vigilancia y mitigación de desastres, cuando ocurren impactos de las mareas negras contra la zona costera. Existen a nivel mundial diferentes procedimientos metodológicos para su confección, siguiendo las normas creadas por la Asociación Regional de Empresas del Sector Petróleo, Gas y biocombustibles en Latinoamérica y el Caribe (ARPEL), la *Canadian International Development Agency* (CIDA), la *Nacional Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), *Petróleos Brasileiros S.A.* (PETROBRAS). Cada una responden a patrones de desarrollo tecnológico, aspecto que no se corresponden con la economía e infraestructura de un país como Cuba. El objetivo de este proyecto es evaluar las metodologías existentes y crear una para Cuba, probándola, en esta primera etapa, en el tramo costero de bahía de La Habana hasta la ensenada de Bacunayagua, zona conocida como Franja Petrolera Norte Cubana (FPNC), donde se encuentran los principales yacimientos gasopetrolíferos de Cuba y unos de los mayores corredores marítimos de trasiego de hidrocarburos dentro del estrecho de la Florida. En la evaluación se incluyeron aspectos oceanológicos, geomorfológicos, sedimentológicos, económicos, meteorológicos, medio ambientales, procesamiento de imágenes satelitales, modelación matemática y otras informaciones de interés para la zona costera cubana.

**Palabras clave:** Mapas de índice de sensibilidad ambiental, mareas negras, industria petrolera, franja petrolera norte cubana, plan de contingencia.

**ABSTRACT:** The Environmental Sensitivity Index (ISA) maps constitute a very useful computer tool for disaster surveillance and mitigation institutions, in situations of impacts of oil spills against the coastal zone. At a global level there are different procedures for its preparation, according to the standards created by the *Asociación Regional de Empresas del Sector Petróleo, Gas y biocombustibles en Latinoamérica y el Caribe* (ARPEL), *Canadian International Development Agency* (CIDA), *Nacional Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) and *Petróleos Brasileiros S.A.* (PETROBRAS). Each one responds to patterns of technological development, which do not correspond to Cuba's infrastructure. The objective of this project is to evaluate existing methodologies and create one of our own for Cuba. In this first stage tested for the coastal stretch from Havana Bay to the Bacunayagua cove, an area known as the Cuban Northern Oil Belt (FPNC), where the main gas-oil deposits in Cuba and one of the largest maritime corridors for the transfer of oil are located within the Florida Strait. The evaluation included oceanological, geomorphological, sedimentological, economic, meteorological, environmental aspects, satellite image processing, mathematical modeling and other information of interest for the Cuban coastal area.

**Keywords:** Environmental Sensitivity Index map, oil spill, oil and gas industry, Cuban Northern Oil Belt, contingency plan.

\*Autor para correspondencia: Julio Ernesto Gómez Herrera. E-mail: [juliog@ceinpet.cupet.cu](mailto:juliog@ceinpet.cupet.cu)

Recibido: 02/11/2023

Aceptado: 12/03/2024

Julio Ernesto Gómez Herrera. Centro de Investigación del Petróleo (CEINPET-CUPET). E-mail: [juliog@ceinpet.cupet.cu](mailto:juliog@ceinpet.cupet.cu)

Lourdes Jiménez de la Fuente. Centro de Investigación del Petróleo (CEINPET-CUPET). E-mail: [lourdes@ceinpet.cupet.cu](mailto:lourdes@ceinpet.cupet.cu)

Enzo Pranzini. Department of Earth Sciences, University of Firenze, Italy. E-mail: [enzo.pranzini@unifi.it](mailto:enzo.pranzini@unifi.it)

**Conflicto de intereses:** Declaramos no tener ningún conflicto de interés.

**Contribución de los autores:** **Concepción y diseño de la investigación:** Julio Ernesto Gómez Herrera. **Adquisición de datos:** Julio Ernesto Gómez Herrera, Lourdes Jiménez de la Fuente, Enzo Pranzini. **Escritura y revisión del artículo:** Julio Ernesto Gómez Herrera.

Este artículo se encuentra bajo licencia [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional \(CC BY-NC 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

## INTRODUCCIÓN

Las costas de Cuba presentan un relieve peculiar, por los diferentes procesos que han intervenido en la configuración del litoral costero. Esto ha permitido el desarrollo de una variada y rica morfología que convierte a la línea costera en sinuosa e irregular, además de larga y estrecha, con 5746,0 km de extensión. La parte más extensa se localiza en la costa norte de 3209,0 km (Figura 1).

La zona de estudio abarca la zona costera como línea central desde la bahía de la Habana en la provincia de igual nombre, hasta la ensenada de Bacunayagua en la provincia de Mayabeque y al norte hasta la isóbata de 200,0 m y hacia el sur un kilómetro tierra adentro. El área de interés abarca aproximadamente los 5054,0 km<sup>2</sup>.

Los límites de la zona costera a estudiar se encuentran X1= 360957, Y1= 369479 a X2= 430978, Y2= 368362, divididas en cuatro tramos, en sistema Lambert Cuba Norte, que hacen un total de aproximadamente 107 km (Tabla 1).

## GEOGRAFÍA. CARACTERÍSTICAS HIDROMETEOROLÓGICAS

Las características hidrometeorológicas y oceanográficas se tomaron del informe realizado para la campaña sísmica 3D en el litoral norte de Cuba perteneciente a la FPNC (Gómez, 2021).

Al igual que el resto del archipiélago cubano, las condiciones climatológicas del área de interés se corresponden con las de un clima marítimo tropical.

La temperatura del aire es alta durante casi todo el año, disminuyendo en la temporada invernal. La

temperatura media mensual del aire oscila entre los 25°C - 28°C, la máxima entre 32°C - 35°C y la mínima de 5°C - 15°C. Este régimen de temperaturas divide el año en dos períodos: verano, de marzo a noviembre y un moderado invierno de diciembre a febrero.

La humedad relativa del aire es alta para todo el año. En la época de sequía la humedad relativa mensual del aire oscila entre 65 y 70 % durante el día y mayor en la noche, y en la época de lluvia la humedad relativa mensual es de 75 - 78 %.

Los vientos en la región predominan del ENE. Los vientos alisios soplan todo el año. La entrada de frentes fríos introduce variaciones en el régimen de vientos. Antes de la entrada de estos frentes por lo general se originan vientos del segundo y tercer cuadrante, algo fuertes que pasan después al cuarto y primer cuadrante con velocidades de 65 - 74 km/h. La duración de un Norte (vientos locales que soplan del N y NW ocasionados por los frentes fríos) es de 1-2 días como promedio, originando temperaturas algo frías y mucha nubosidad.

La velocidad media del viento oscila de 15-22 Km/h. Las calmas suceden de forma espaciada con una reiteración que no supera en general el 10 % aproximadamente y la cantidad media de días al mes con vientos fuertes es de 1-4 días.

Durante el día y la noche, la dirección del viento en la zona costera varía notablemente y se establece un régimen local de vientos. En horas del día soplan las "brisas del mar" con vientos del NE y en la noche sopla el "terral" con dirección SE. En general, el terreal es más débil que las brisas, ya que estas últimas se refuerzan con los vientos alisios.

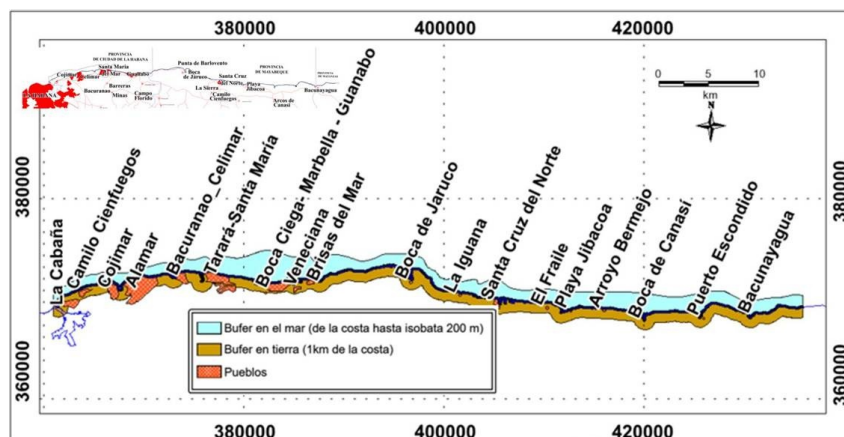


Figura 1. Cuba, área de estudio

Tabla 1. Límites espaciales (Coordenadas WGS-84)

	Sectores costeros	Longitud	Latitud
1	Bahía de La Habana	82,3572	23,1517
	Boca de Jaruco	82,0062	23,1834
2	Boca de Jaruco	82,0062	23,1834
	Ensenada de Bacunayagua	81,67488	23,1834

A la salida y puesta del sol y generalmente en las madrugadas se originan calmas. La brisa marina comienza 2-3 hrs después de la salida del sol y alcanzan velocidades máximas cerca de las 14:00 hrs.

Las precipitaciones son muy variables en tiempo y espacio, las lluvias en verano por lo general son de tipo convectivo, ocasionadas principalmente por la actividad de turbonadas y en especial por la influencia de organismos ciclónicos, ondas tropicales y hondonadas. Durante el invierno son originadas en su mayoría por el paso de sistemas frontales (Gómez, 2021).

### Características oceanográficas

La amplitud media de la marea varía entre los 0,25 m y 0,5 m, pero los vientos fuertes y persistentes del N pueden elevar el nivel del mar ligeramente o disminuirlos cuando estos vientos son del S.

En los estrechos canales de las bahías de bolsa, las corrientes de marea pueden alcanzar valores de interés en momentos de sicigias (mareas que ocurren en luna nueva y luna llena).

Las corrientes litorales tienen una fuerte influencia de las mareas, por lo general la corriente se orienta al E - NE durante la pleamar máxima, durante la bajamar invierte su dirección al W - SW manteniéndose en la misma por un intervalo de tiempo aproximado de 10 a 12 hrs coincidiendo con la pleamar más pequeña, invirtiéndose nuevamente al E - NE con el comienzo del flujo de la marea, este régimen varía en dependencia de la configuración de la línea de costa y la influencia de la desembocadura de ríos y bahías.

En aguas profundas frente al litoral la circulación neta es en dirección E, no se aprecia una influencia significativa de las mareas ni del campo de vientos.

Durante la temporada invernal con el desarrollo de fenómenos atmosféricos de diversa índole, en el Golfo

de México, la corriente de marea en la franja costera se ve bloqueada por una corriente de deriva. Esto puede provocar en las cercanías del litoral costero que se lleguen a alcanzar velocidades muy altas (por encima de los 100 cm/s) por un periodo de tiempo limitado.

En la medida que nos alejamos de la costa prevalece la influencia de la corriente de la Florida, las aguas de esta se caracterizan por su relativa alta temperatura superficial, baja salinidad y gran transparencia respecto a las aguas que la circundan, y por su distintivo color azul profundo.

### Clasificación geomorfológica de la costa

Realizado el control de calidad, se procede a la clasificación geomorfológica de la costa, estipulado por el Decreto - Ley 212/2000 para Cuba (González, 2015). Esta división de la línea costera se encuentra vectorizada en formato ArcGis y QGIS, en el Instituto de Geología y Paleontología (IGP), Servicio Geológico de Cuba, se incorpora al SIG (Tabla 2).

### MATERIALES Y MÉTODOS

Para la rectificación se tomó como base cartográfica marina la base de datos ETOPO 3, el modelo digital de elevación *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), la base cartografía - topografía elaborada por GEOCUBA en escala 1:10000. Se emplearon los materiales complementarios Imágenes de Apertura Sintética de radar Sentinel 1, Sentinel 2, ASTER multiespectrales y del espectro visual *Google Earth*.

Ante la necesidad de clasificación de los tipos de costa, la extensión del área de estudio, la falta de personal calificado, costo económico y periodo de pandemia COVID19, se procede a la utilización de las imágenes satelitales de diferentes tipos.

Tabla 2. Clasificación geomorfológica de las costas según Decreto - Ley 212/2000

Tipo de costa	Subtipo
De terraza baja, que predomina en casi todo el sector	Con camellón de tormenta En ausencia del camellón En ausencia del camellón y en presencia del acantilado en un segundo nivel de terraza En ausencia del camellón si el área colindante a la terraza baja es una laguna costera con manglar
Acantilada	
Playa	Con duna En ausencia de duna En ausencia de dunas con acantilado. En ausencia de dunas si el área colindante a la berma, resultara ser una laguna costera con manglar.
Baja de manglar	
Desembocaduras de ríos	
Antropizada	Sectores que, por causas naturales o artificiales, no es posible identificar dentro de los tipos anteriores, al estimar que dichas causas son, en su mayoría resultado de la actividad humana.

Comenzando con un estudio multisensorial para la identificación de las imágenes y rangos del espectro que más se ajustaran al objetivo propuesto.

Se determinó el ancho de banda correspondiente al Infrarrojo cercano (0.7-1.3 nm), útil para la discriminación de concentraciones de humedad. Bandas seleccionadas, 8 del Sentinel 2 mejorada por su resolución espacial de 10 m en comparación con 15 m del ASTER.

Efectuada la corrección espacial y atmosférica por el método de *Flat Field* (Envi 5.3), se construyeron combinaciones de bandas RGB (*red, green, blue*) correspondientes al espectro visual para diferenciar tipos de costas.

Se establecieron 5 patrones acordes con la clasificación granulométrica de las playas brindada por IGP (Tabla 2).

En este caso se clasificaron solamente aquellas áreas catalogadas como playas mediante el método *Density Slice* que consiste en colorear las imágenes en tonos de gris para buscar diferencias basadas en la clasificación de los números digitales de la imagen. Tomando como punto de partida esta primera clasificación se identificaron Regiones de Interés (ROI) a lo largo de la franja de playa de donde se extrajeron diferentes espectros para de forma cualitativa corroborar las diferencias representadas.

Diferentes tipos de costas se reconocieron con las combinaciones RGB 321 del sensor ASTER y combinaciones RGB 842 del Sentinel 2. Partiendo de que las diferencias granulométricas entre las diferentes zonas de playas representan una unidad muy pequeña para diferenciarse mediante los sensores remotos se estudió indirectamente mediante la reflectancia de las superficies (Chiqués, 2005), que la composición de la arena puede afectar la curva de reflectancia (mientras más fino el material existe mayor magnitud en la curva de reflectancia en la parte visible del espectro). Los rangos propuestos quedaron según la tabla 3 y figura 2.

Esta clasificación constituyó el punto de partida para realizar un estudio espectral de las diferentes zonas diferenciadas mediante ROI (Figura 3).

Como se aprecia en la figura 3 existen diferencias en cuanto a las curvas espectrales en las regiones seleccionadas, un estudio espectral de las diferentes curvas y de sus rangos de absorción y reflectividad permitió reclasificar los tramos de costa, pero fue necesario realizar un análisis físico (limitado) del comportamiento del subsuelo, para corroborar esta clasificación preliminar.



Figura 2. Ejemplo de clasificación de las playas, banda del infrarrojo térmico Sentinel 2

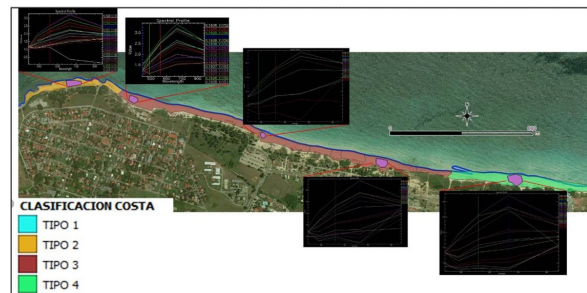


Figura 3. Colección de espectros ROI. Clasificación según valores de la banda 8 del Sentinel 2

### Clasificación de la granulometría de las playas mediante métodos ópticos

Se consideró conveniente tomar los resultados por el análisis por los sensores remotos con imágenes ASTER y rectificarlas de forma indirecta con las diferencias granulométricas de los sedimentos que conforman las playas del área.

El color de 93 playas en Cuba (Figura 4) se evaluó en el espacio de color CIE  $L^* a^* b^*$ , El CIE  $L^*a^*b^*$  (CIELAB) es el modelo cromático usado normalmente para describir todos los colores que puede percibir el ojo humano (Pranzini, 2008).

El espacio de color  $L^* a^* b^*$  se diseñó en base a una teoría de color oponente, que establece que dos colores no pueden ser rojo y verde a la vez, o amarillo y azul al mismo tiempo. Por tanto,  $L^*$  indica la Luminosidad, y  $a^*$  y  $b^*$  son las coordenadas cromáticas. Fue desarrollado específicamente con este propósito por la Comisión Internacional de la Iluminación (*Commission Internationale d'Eclairage* en francés), razón por la cual se abrevia CIE.

Los sitios de estudio comprendieron cayos y playas continentales expuestas y protegidas (Pranzini et al. 2016). A pesar de la extensión limitada de este país,

Tabla 3. Rangos de valores

Banda 8 Sentinel 2	Clasificación
0,7-1,6	Tipo 1
1,6-1,9	Tipo 2
1,9-2,3	Tipo 3
2,3-2,9	Tipo 4
Mixto	Tipo 5

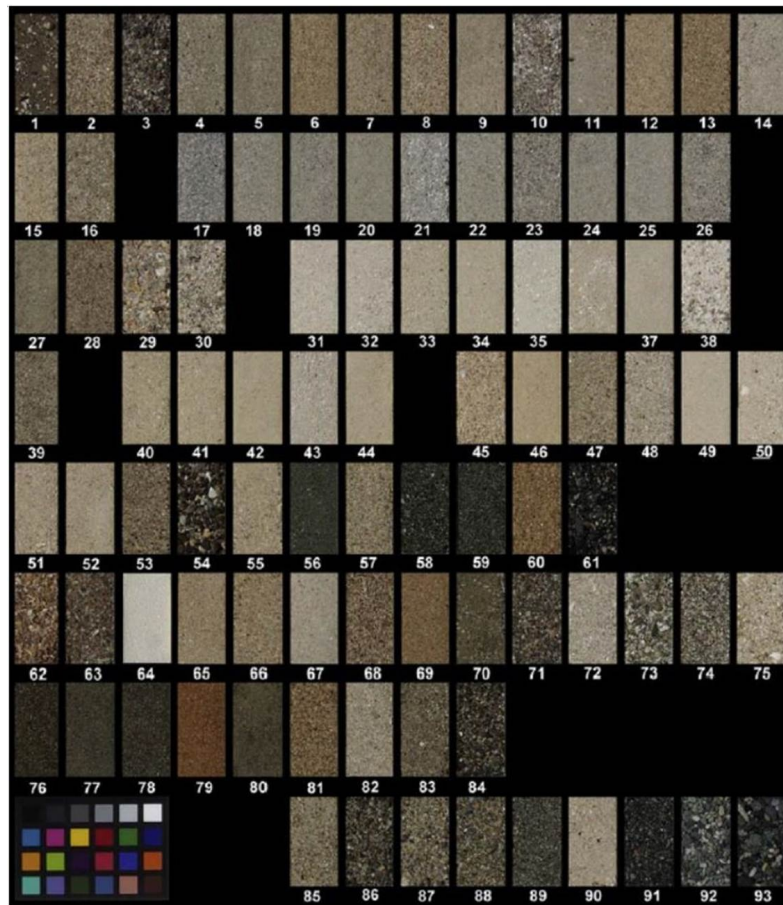


Figura 4. Muestras de arena de 93 playas de Cuba y la tabla de colores

las playas muestran una alta variabilidad de color, debido a las diferencias mineralógicas en los afloramientos rocosos en las diversas cuencas hidrográficas, la proximidad del arrecife de coral y los fragmentos de concha originados en áreas de costa abierta o manglares.

Se procesaron los parámetros mediante el algoritmo de clasificación de componentes principales (PCA), que con los parámetros  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$  permitió agrupaciones de playas que coincidían con sus ubicaciones geográficas e identificaron diferentes tipos. Se estudió el impacto de la dinámica de la playa en función de su color y la afectación de los eventos meteorológicos.

## CONCLUSIONES

Se realizó una buena clasificación semicuantitativa, mediante la metodología de análisis espectral satelital, del color de las arenas de las playas y la medición granulométrica mediante reconocimiento textural de imágenes, con la colaboración con la Universidad de Florencia, Italia.

## REFERENCIAS

- Chiqués, G. (2005). *Spectral characterization of sandy beaches in western portion of Puerto Rico* [Master Thesis of Science in Geology, Mayaguez Campus, Universidad de Puerto Rico]. [https://www.uprm.edu/gerslab/wp-content/uploads/sites/214/2023/07/thesis\\_gretchen.pdf](https://www.uprm.edu/gerslab/wp-content/uploads/sites/214/2023/07/thesis_gretchen.pdf)
- Gómez, J. E., Jiménez, L., Morales, A., Pranzini, E., Mejías, L. M., Fajardo, Y., Tamayo, Y., & Rojas, R. (2021). *Metodología para la evaluación de la sensibilidad costera ante el impacto de derrames de hidrocarburo*. Centro de Investigación del Petróleo (CEINPET).
- González, P. (2015). *Manejo Integrado de las Zonas Costeras en Cuba. Estado actual, retos y desafíos*. Imagen Contemporánea. <http://www.redciencia.cu/geobiblio/paper/2015-Manejo%20Integrado%20de%20las%20Zonas%20Costeras.pdf>
- Pranzini, E. (2008). Il colore della sabbia: Indagine sul gradimento dei frequentatori di spiagge naturali e di spiagge oggetto di ripascimento artificiale. *Studi Costieri*, 15, 109–120. <https://www.researchgate.net/publication/303201207>
- Pranzini, E., Anfuso, G., Botero, C., Cabrera, A., Campos, Y., Martínez, G., & Williams, A. (2016). Sand colour at Cuba and its influence on beach nourishment and management. *Ocean & Coastal Management*, 126, 51–60. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2016.03.013>