

Suavizado de datos batimétricos para la determinación del pie del talud continental en el sector noroeste de la plataforma territorial de la República de Cuba

Daniel Pérez Alfonso¹

¹ *Ingeniero geofísico, Aspirante a Investigador, Centro de Investigación del Petróleo, UCTB-Geofísica, calle 23 número 105 entre O y P, Vedado, La Habana, Cuba, C.P. 10400. ORCID: 0009-0003-0776-6631. Correo E.: daniel.perez@cein-pet.cupet.cu; danielperezalfonso89@gmail.com*

RESUMEN

Como parte de la actualización de la Presentación ante la Comisión de Límites de la Plataforma Continental, fue determinada la posición del Pie del Talud Continental (FOS) en el sector noroeste de la plataforma territorial de la República de Cuba. El Pie del Talud Continental se identificó como el punto de máximo cambio de gradiente en la base del talud, mediante el cálculo de la segunda derivada de la función fondo marino. Las irregularidades del fondo marino producen una alta variabilidad en su segunda derivada, por lo cual es imprescindible el suavizado de los datos. Este proceso disminuye las fluctuaciones aleatorias causadas por la componente irregular de la serie de datos. Fueron empleados los filtros matemáticos: Media móvil, Regresión local y Savitzky-Golay en perfiles batimétricos para el suavizado de los mismos con el objetivo de determinar dicho FOS en cada uno de ellos. Los datos empleados provienen del levantamiento batimétrico realizado durante un estudio sísmico 2D marino multicliente, entre 2016 y 2017. Fue empleada la plataforma MATLAB R2013b, para la implementación de los filtros. Los mejores resultados

fueron alcanzados por el filtro Savitzky-Golay y en menor medida por Regresión local, el filtro de Media móvil no arrojó resultados satisfactorios.

Palabras clave: Suavizado de datos, Pie del Talud Continental, filtro Savitzky-Golay

ABSTRACT

As part of the update of the Presentation before the Commission on the Limits of the Continental Shelf, the position of the Foot of the Continental Slope (FOS) in the northwest sector of the territorial shelf of the Republic of Cuba was determined. The Foot of the Continental Slope was identified as the point of maximum gradient change at the base of the slope, by calculating the second derivative of the seabed function. The irregularities of the seabed produce high variability in its second derivative, which is why data smoothing is essential. This process decreases random fluctuations caused by the irregular component of the data series. Mathematical filters were used: Moving Average, Local Regression and Savitzky-Golay in bathymetric profiles to smooth them with the objective of determi-

Pérez-Alfonso, D., 2026, Suavizado de datos batimétricos para la determinación del pie del talud continental en el sector noroeste de la plataforma territorial de la República de Cuba.: Geociencias UO. v. 17, núm. 1, junio 2026 pp. 6-14

ning said Foot of the Continental Slope in each of them. The data used comes from the bathymetric survey carried out during a multi-client 2D marine seismic study, between 2016 and 2017. The MATLAB R2013b platform was used to implement the filters. The best results were achieved by the Savitzky-Golay filter and to a lesser extent by Local Regression, the Moving Average filter did not yield satisfactory results.

Key words: Data smoothing, Foot of the Continental Slope, Savitzky-Golay filter

RESUMO

No âmbito da atualização da Apresentação perante a Comissão sobre os Limites da Plataforma Continental, foi determinada a posição do Pé da Talude Continental (FOS) no setor noroeste da plataforma territorial da República de Cuba. O Pé da Talude Continental foi identificado como o ponto de máxima mudança de gradiente na base da encosta, através do cálculo da segunda derivada da função do fundo do mar. As irregularidades do fundo do mar produzem uma elevada variabilidade na sua segunda derivada, razão pela qual a suavização dos dados é essencial. Este processo diminui as flutuações aleatórias causadas pelo componente irregular da série de dados. Foram utilizados

filtros matemáticos: Média Móvel, Regressão Local e Savitzky-Golay nos perfis batimétricos para suavizá-los com o objetivo de determinar o referido Pé da Talude Continental em cada um deles. Os dados utilizados provêm do levantamento batimétrico realizado durante um estudo sísmico marinho 2D multicliente, entre 2016 e 2017. A plataforma MATLAB R2013b foi utilizada para implementar os filtros. Os melhores resultados foram alcançados pelo filtro Savitzky-Golay e em menor grau pela Regressão Local, o filtro Média Móvel não apresentou resultados satisfatórios.

Palavras chave: Suavização de dados, Pé da Talude Continental, filtro Savitzky-Golay

INTRODUCCIÓN

Como parte de la actualización de la Presentación ante la Comisión de Límites de la Plataforma Continental, fue determinada la posición del Pie del Talud Continental (FOS por sus siglas en inglés) en el sector noroeste de la plataforma territorial de la República de Cuba. Dicha comisión establece la metodología para la delimitación de la plataforma continental más allá de las 200 millas marinas, en el caso de Cuba en el polígono oriental del Golfo de México (**Figura 1**). Este trabajo describe los resultados de aplicar filtros mate-



Figura 1. Sombreado en morado polígono oriental del Golfo de México

máticos en perfiles batimétricos para el suavizado de los mismos con el objetivo de determinar dicho FOS en cada uno de ellos.

Para identificar la zona de talud continental se observaron las mayores pendientes en un modelo batimétrico del Golfo de México (**Figura 1**). Fue definida una región de búsqueda enmarcada por la densificación de isolíneas batimétricas, lo cual indica un abrupto cambio en la profundidad. Se estudió la fisiografía de la zona analizada y se buscaron valores de pendiente del fondo marino característicos para la parte inferior del talud y para la llanura abisal, ya que no se verifica la existencia de la emersión continental. A partir de los valores de profundidad del fondo marino y al utilizar el filtro Savitzky-Golay se definió como pendiente promedio 10° para la parte inferior del talud y 0.1° o menores para la llanura abisal, al definir en este rango la base del talud continental para la zona.

Una vez encontrada la zona de talud continental al usar el modelo batimétrico, se procedió a la determinación del Pie del Talud Continental (FOS) a partir

de la búsqueda del máximo cambio de gradiente en la base del talud al emplear perfiles batimétricos.

En la determinación del máximo cambio de gradiente surgen dos problemas de distinto origen: inestabilidad de la solución y el suavizado artificial asociado a la orientación del perfil en el talud (Naciones Unidas, 2006). La inestabilidad de la solución se debe en lo fundamental, al efecto combinado de la anfractuosidad del fondo marino y los errores en la diferenciación numérica, que hacen de la segunda derivada una función muy variable.

Suavizar un conjunto de datos (**Figura 2**) es crear una función que intente capturar patrones importantes en estos, al mantener fuera la parte de los mismos que se considera ruido. El objetivo de suavizar es disminuir fluctuaciones aleatorias causadas por el componente irregular de la serie de datos.

La **Figura 2** muestra un ejemplo de suavizado en una línea batimétrica mediante el filtro Savitzky-Golay, nótese la diferencia en la anfractuosidad del fondo marino mediante el empleo del filtro.

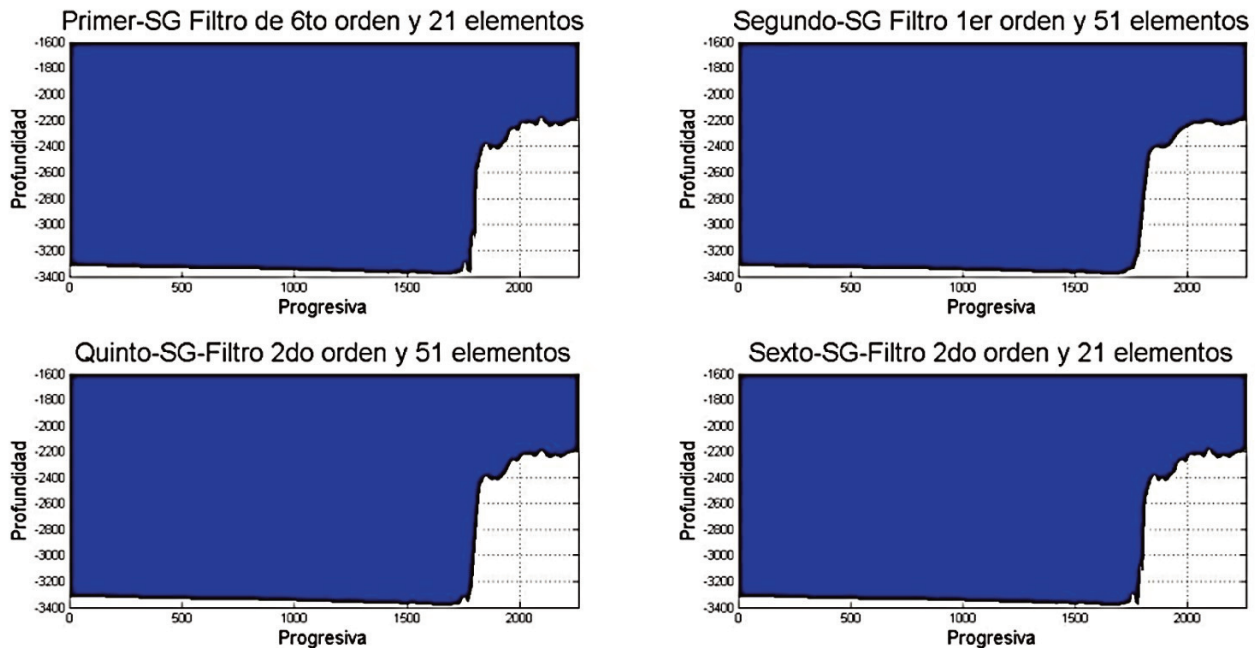


Figura 2. Ejemplo de suavizado en la Línea_GM-62 mediante el filtro Savitzky-Golay con diferentes configuraciones en el orden del polinomio empleado

MATERIALES Y MÉTODOS

Los datos empleados son perfiles batimétricos provenientes de un levantamiento sísmico 2D marino, del tipo multicliente, ejecutado entre los años 2016 y 2017. Este levantamiento fue realizado por los buques BGP Pioneer y BGP Challenger, respectivamente. Ambas naves estuvieron al servicio de la compañía china BGP Geoplotter Ptw. Ltd. Utilizaron un sistema integrado de navegación Spectra v 14.12.1 y un ecosonda modelo Konsberg EA 600 (Morales *et al.*, 2021).

Dichos perfiles son tríadas de valores (longitud, latitud y profundidad) cada 37.5 metros, ubicados en los puntos de excitación de las líneas sísmicas. Para su organización y manejo se empleó el término «Progresiva», sin tener que llamarlos por su correspondiente número de registro, lo cual sería engorroso ya que en cada línea estos se organizan de manera arbitraria según el comienzo y fin de la misma. Por lo que el término Progresiva en todos los casos será adimensional y estará numerado de comienzo a fin de cada línea, pero relacionado a valores de coordenadas.

Fue empleada la plataforma MATLAB R2013b, en la cual se creó el programa DAMA, para la implementación de los filtros empleados en el suavizado de los datos batimétricos. Además, fue usado Global Mapper como sistema de información geográfica para la representación y georreferenciación de los resultados.

Para el suavizado de los datos batimétricos fueron probados los siguientes filtros:

- Media móvil
- Regresión local (*Lowess*)
- Savitzky-Golay

Filtro de Media móvil

Consiste en fijar un número n e impar, de forma preferente y calcular los promedios de todos los grupos de n términos consecutivos de la serie, obteniéndose una nueva serie suavizada por promedios móviles de orden n . De este modo tienden a anularse las variaciones aleatorias. El objetivo es eliminar de la serie los

componentes estacionales y accidentales, de forma matemática se expresa como (**Ecuación 1**):

$$\text{Media móvil} = \frac{\sum(\text{n valores de datos más recientes})}{n} \quad (1)$$

Filtro de Regresión Local (*Lowess*)

El tipo de estimador *LOWESS* más simple, utiliza los k vecinos más cercanos y estima el valor de la función de regresión en el punto x conforme a los siguientes pasos (Olaya, 2005):

- 1) Identificar los k vecinos más cercanos de x y denotar este conjunto como $N(x)$.
- 2) Encontrar la distancia asociada con el vecino más cercano que se encuentra más alejado de x según **Ecuación 2**:

$$\Delta(x) = \max_{\{x_i \in N(x)\}} |x - x_i| \quad (2)$$

- 3) Asignar pesos W_j a cada punto en $N(x)$ al usar la función de pesos tricubo (**Ecuación 3**):

$$W = \left[\frac{|x_0 - y_j|}{\Delta(x_0)} \right] \quad (3)$$

Donde:

$$w(t) = f(x) = \begin{cases} 1 - t^3, & \text{para } 0 < t < 1 \\ 0, & \text{para otro caso} \end{cases} \quad (4)$$

- 4) Ajustar una recta por mínimos cuadrados ponderados de Y en X , confinada al conjunto $N(x)$, al utilizar los pesos obtenidos en 3.

Filtro Savitzky-Golay

Descrito en 1964 por Abraham Savitzky y Marcel Golay (Savitzky y Golay, 1964). El método se basa en el cálculo de una regresión polinomial local (de grado k), que consta de al menos $k+1$ puntos equiespaciados para determinar el nuevo valor de cada punto. Este método tiende a preservar características de la distribución inicial tales como máximos y mínimos relativos, así como el ancho de los picos, que de forma normal desaparecen con otras técnicas de promediado.

Según Schmid, Rath y Diebold, (2022) los filtros Savitzky–Golay (SG) se han popularizado en muchos campos del procesamiento de datos, que van desde espectros en química analítica (Rinnan *et al.*, 2009), en las geociencias y la medicina. Por lo general se aplican a puntos de datos equidistantes y se basan en ajustar un polinomio de grado n dado a los datos en una vecindad (por lo general simétrica) $k - m \dots k + m$ de cada punto de datos k (este rango contiene $2m + 1$ punto de datos). Para suavizar los datos, cada punto de datos se reemplaza por el valor del polinomio de ajuste en este punto k (Schafer, 2011). SG es un filtro lineal y toma un número limitado de puntos como entrada, por tanto, el suavizado SG es un filtro de respuesta de impulso finito (FIR), que se implementa como una convolución con un núcleo adecuado (Savitzky y Golay, 1964) Los núcleos SG se calculan de manera numérica (Presione y Teukolsky, 1990) o de fórmulas analíticas (Madden, 1978 y Persson y Strang, 2003).

En el dominio de la frecuencia, SG es un filtro pasa banda con un corte bastante pronunciado, cuya inclinación aumenta con el grado del polinomio de ajuste (Schafer, 2011). Al ser pasa banda y de corte pronunciado estos filtros conservan los picos y sus al-

turas mejor que muchos otros con una frecuencia de corte similar, propiedad ventajosa para suavizar espectros.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El filtro de Media móvil fue probado con espacio vectorial generado o *span* de 0.1, 1 y de 5. No ofreció resultados satisfactorios en los perfiles donde fue probado, por lo cual se descartó (**Figura 3**).

El filtro de Regresión Local (*Lowess*) fue empleado con dos algoritmos: el clásico y el conocido como “robusto”, el cual reduce su sensibilidad frente a valores extremos. La versión robusta no mostró resultados satisfactorios en los datos empleados por lo cual no fue utilizada finalmente.

La versión clásica del método fue empleada, aunque no mostró resultados mejores que las configuraciones de Savitzky–Golay. La **Figura 3** compara el empleo de los filtros *Lowess* clásico (lineal y cuadrático), *Lowess* en su versión robusta (lineal y cuadrático) y filtro de Media móvil. Todos emplean espacios vectoriales generados o *span* de 0.1. Nótese cómo la respuesta de los filtros de Media móvil y las versiones robustas de *Lowess* suavizan en exceso los datos.

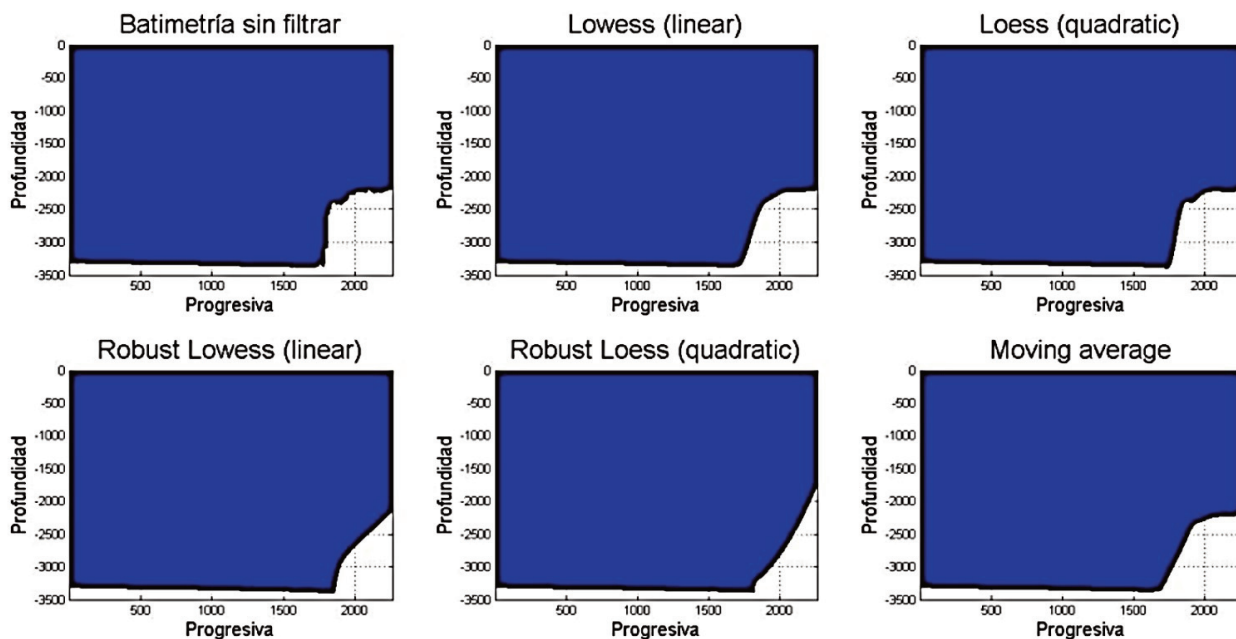


Figura 3. Comparación de los filtros de regresión lineal (*Lowess*) y de Media móvil

Suavizado con Savitzky–Golay

Este filtro fue corrido con 12 configuraciones al variar el orden del polinomio empleado y del tamaño de la ventana de datos (**Tabla 1**):

Las configuraciones que mejor resultados brindaron fueron:

SEGUNDO_SGFILTRADO, PRIMER_SGFILTRADO, SEPTIMO_SGFILTRADO, OCTAVO_SGFILTRADO, las cuales usan de manera iterada el algoritmo, ya que la función de entrada de cada una de ellas es la función de forma previa suavizada mediante SEGUNDO_SG, PRIMER_SG, SEPTIMO_SG, OC-

TAVO_SG respectivamente, o sea se usa dos veces seguidas en cada caso el filtro con cada configuración. En la **Figura 4** nótese el distinto grado de suavizado que ejercen las diferentes configuraciones en el perfil batimétrico.

Luego de varias pruebas se determinó emplear sólo los métodos *Lowess* y Savitzky–Golay para suavizar los datos, según las siguientes configuraciones:

- SEGUNDO_SGFILTRADO
- PRIMER_SGFILTRADO
- *LOWESS*
- SEPTIMO_SGFILTRADO
- OCTAVO_SGFILTRADO

Configuración	Orden del polinomio	Ventana de datos	Comentarios
PrimerSG	6to	21	La entrada de este filtro es la batimetría sin filtrar
SegundoSG	1er	51	
TercerSG	8vo	21	
CuartoSG	6to	51	
QuintoSG	2do	51	
SextoSG	2do	21	
SéptimoSG	8vo	51	
OctavoSG	8vo	91	
SegundoSGFiltrado	1er	51	La entrada de este filtro es el dato, ya filtrado, mediante SegundoSG
PrimerSGFiltrado	6to	21	La entrada de este filtro es el dato, ya filtrado, mediante PrimerSG
SéptimoSGFiltrado	8vo	51	La entrada de este filtro es el dato, ya filtrado, mediante SéptimoSG
OctavoSGFiltrado	8vo	91	La entrada de este filtro es el dato, ya filtrado, mediante OctavoSG

Tabla 1. Configuraciones empleadas del filtro Savitzky–Golay

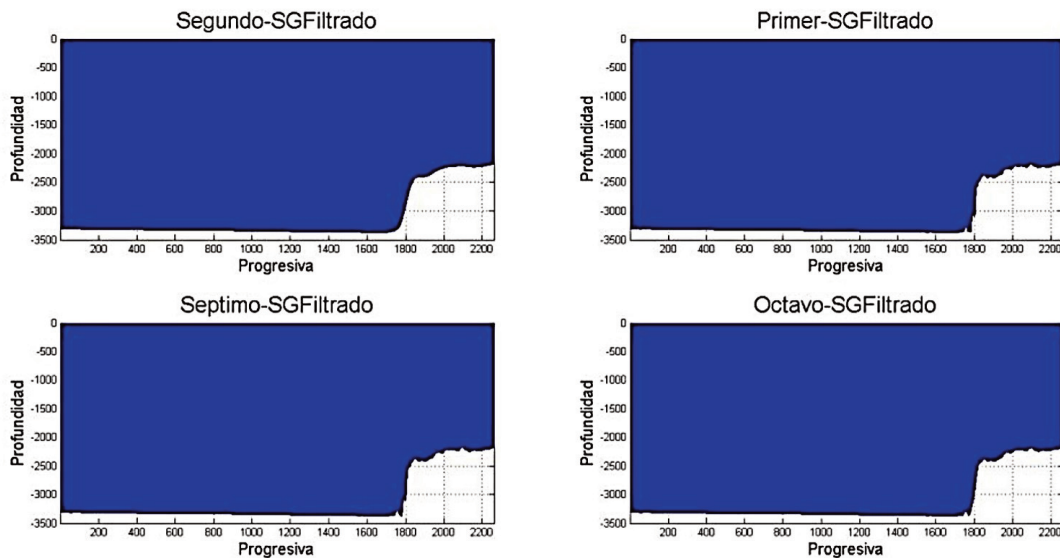


Figura 4. Respuesta del filtro Savitzky–Golay a diferentes configuraciones

Cada una de las cinco configuraciones de suavizado ofreció un par de coordenadas XY en cada FOS a ser determinado. La **Figura 5** muestra un ejemplo de los resultados ofrecidos por las cinco formas de suavizado para la determinación del FOS_GM-302-1 (marcado con un punto rojo en la **figura 5**, sus coordenadas son las determinadas con el SEPTIMO_SG-FILTRADO), en este caso la diferencia máxima entre las coordenadas determinadas entre las cinco configuraciones es sólo de 37 metros.

Para la determinación de cada FOS fueron em-

pleados sólo los resultados que ofrecieron las formas de suavizado con menor dispersión en la posición, al ser por lo general preferido el empleo de los resultados que arrojaron el SEGUNDO_SG-FILTRADO y el SEPTIMO_SG-FILTRADO.

La **Figura 6** muestra la ubicación de los FOS determinados (puntos rojos) sobre un mapa de isolíneas generado a partir del modelo digital batimétrico (MDB) del Golfo de México. La línea anaranjada sigue el Pie de Talud Continental determinado por Morales *et al.*, (2021) a partir del modelo digital batimétrico.

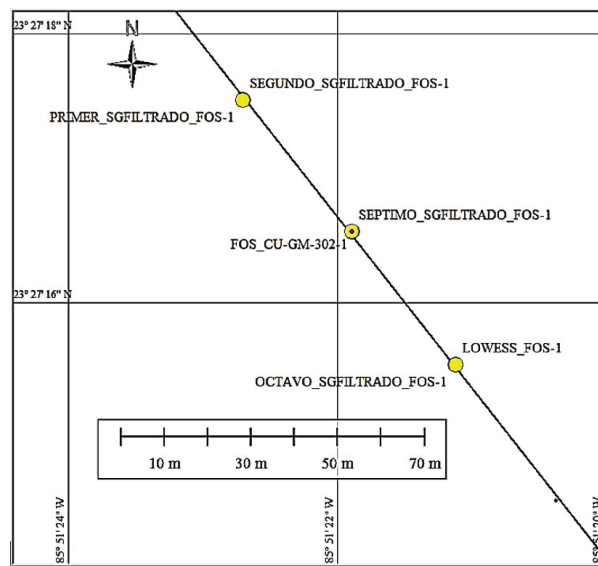


Figura 5. Diferencia en la ubicación del FOS_GM-302-1 al emplear diferentes suavizados

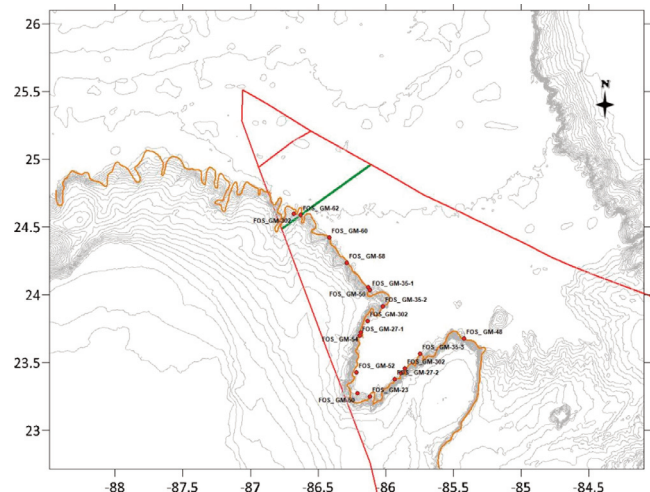


Figura 6. Comparación de la posición de los FOS sobre los perfiles batimétricos contra la posición de la isolínea que describe la posición del Pie del Talud Continental al aplicar el filtro de M.U. Sagitov (Morales *et al.*, 2021)

La **Tabla 2** muestra la diferencia entre las cinco configuraciones de filtros para la determinación de cada FOS. Nótese cómo el error en la posición del FOS está siempre cercano a los 40 metros con una desviación estándar de 38.3 metros. El promedio o media aritmética de la diferencia en distancia es de 64.3 me-

tros para todos los FOS. Si omitimos de este cálculo los resultados alcanzados en la determinación del FOS_GM-27-1 y del FOS_GM-302-3 el promedio es de sólo 53.6 metros de diferencia. La **tabla 3** muestra un resumen estadístico del error en la estimación de los FOS.

FOS Determinados	Diferencia en la posición entre métodos [m]	FOS Determinados	Diferencia en la posición entre métodos [m]
FOS_GM-23	76	FOS_GM-52	75
FOS_GM-27-1	187	FOS_GM-54	37
FOS_GM-27-2	37	FOS_GM-56	37
FOS_GM-29	37	FOS_GM-58	75
FOS_GM-35-1	75	FOS_GM-60	37
FOS_GM-35-2	37	FOS_GM-62	37
FOS_GM-35-3	75	FOS_GM-302-1	37
FOS_GM-48	75	FOS_GM-302-2	75
FOS_GM-50	37	FOS_GM-302-3	113

Tabla 2. Diferencias en la determinación de los FOS.

Resumen estadístico del error en la estimación de los FOS	
Estadígrafo	metros
Media geométrica	56.73
Media geométrica (ajustada*)	50.44
Promedio	64.38
Promedio (ajustado*)	53.68
Desviación estándar	38.31
Desviación estándar (ajustada*)	19.54
*Ajustada al eliminar los dos valores extremos de los datos	

Tabla 3. Resumen estadístico del error en la estimación de los FOS.

CONCLUSIONES

Se determinaron 18 FOS en perfiles batimétricos los cuales son consistentes con la zona de Pie de Talud Continental determinada a partir del MDB.

Se validó el empleo del filtro Savitzky–Golay y *Lowess* para el suavizado de los datos, no así el filtro de Media móvil.

En perfiles con una caída abrupta en la profundidad el suavizado permite determinar el FOS con menor grado de incertidumbre.

Las configuraciones del filtro Savitzky–Golay: SEGUNDO_SGFILTRADO (1er orden con ventana de datos de 51 elementos) y el SEPTIMO_SGFILTRADO (8vo orden con ventana de datos de 51 elementos) al ofrecer los mejores resultados. Estas usan de manera iterada el algoritmo, teniendo como función de entrada la función de forma previa suavizada.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Olaya, J.O.**, 2005, “Suavización y regresión no paramétrica: una alternativa de modelación estadística”: Simposio de Estadística 2005, pp. 107 a 129, ISBN: 958-701-559-2, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
- Morales-Abreu, A., Carbonell-López, Y., Roca-Vidal, Y.M., Pérez-Alfonso, D., García-Martínez, A., Rodríguez-Morán O., Ojeda-César, R., Pról-Betancourt, J.G.L., Rifá-Hernández, M.C., Bejerano-Kindelán, A.M., Ojeda-Jaile, D., Arriaza-Fernández, G.L.**, 2021. “ESTUDIOS PARA LA ACTUALIZACIÓN DE LA DEMOSTRACIÓN DE LA PROLONGACIÓN NATURAL DE LA PLATAFORMA CONTINENTAL DE CUBA MÁS ALLÁ DE LAS 200 MILLAS NÁUTICAS EN EL POLÍGONO ORIENTAL DEL GOLFO DE MÉXICO.”: Informe Técnico Final del Proyecto 5506, Centro de Investigación del Petróleo, (Ceinpet), La Habana.
- NACIONES UNIDAS (NU)**, 2006, MANUAL DE CAPACITACIÓN, División de Asuntos Oceánicos y del Derecho del Mar Oficina de Asuntos Jurídicos. Sobre el trazado de límites exteriores de la plataforma continental más allá de 200 millas marinas y para la preparación de presentaciones de información a la comisión de límites de la plataforma continental, ISBN 92-1-333369-2, Nueva York, 632 pp.
- Savitzky, A., Golay-Marcel J.E.**, 1964, “Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures”: *Analytical Chemistry*, 36 pp.
- Rinnan, A., Van Den Berg F., Engelsen, S.B.**, 2009, “TrAC, Tendencias en química analítica”, 28 (10), 1201-1222 CODEN: TTAEDJ; ISSN: 0165-9936. (Elsevier Ltd.)
- Schafer, R.W.**, 2011 “¿Qué es un filtro Savitzky-Golay?” *Revista de procesamiento de señales IEEE*, 28, 111 – 117, DOI: 10.1109/MSP.2011.941097.
- Presione, W.H., Teukolsky, S.A**, 1990, “Filtros de suavizado Savitzky-Golay. Computadoras en Física” 1990, 4, 669 – 672, DOI: 10.1063/1.4822961.
- Madden, H.H.**, 1978, “Comentarios sobre el método de convolución Savitzky-Golay para el suavizado y diferenciación de datos digitales por ajuste de mínimos cuadrados” *Anal. Química*, 50, 1383 – 1386, DOI: 10.1021/ac50-031a048 10.
- Persson, P.O., Strang, G.**, 2003, “Suavizado mediante filtros Savitzky-Golay y Legendre. Teoría de Sistemas Matemáticos en Biología, Comunicaciones, Computación y Finanzas”, Springer: Nueva York, págs. 301 – 315.
- Schmid M., Rath D., y Diebold U.**, 2022, “Por qué y cómo se deben reemplazar los filtros Savitzky-Golay”, *ACS Meas. Ciencia*. Agosto 2022, 2, 2, 185–196, febrero de 2022, <https://doi.org/10.1021/acsmeasuresciau.1c00054>,. Sociedad Química Estadounidense.