# Delimitación de la zona intermareal de cinco estuarios patagónicos mediante el uso de imágenes satelitales

# Federico Haspert<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Nacional del Agua - Laboratorio de Hidráulica - Programa de Hidráulica Marítima.

E-mail: fhaspert@gmail.com

#### Resumen

En el actual contexto de cambio climático, las fuentes de energía renovables tienen cada vez mayor respaldo de la comunidad científica internacional para su desarrollo debido a su menor efecto contaminante en comparación con las fuentes convencionales (petróleo, gas natural, carbón). La energía mareomotriz es aquella producida por el movimiento de las mareas; una de las formas de aprovechamiento consiste en la instalación de turbinas hidrocinéticas que captan la energía cinética de las corrientes de marea. Los estuarios, zonas donde los ríos desembocan hacia el océano, se presentan como sitos con potencial para el aprovechamiento de las corrientes de marea. En el marco del proyecto "Evaluación del potencial energético de las corrientes de marea en estuarios patagónicos mediante modelación numérica", se delimitó y calculó la superficie de la zona intermareal de cinco estuarios patagónicos (Río Deseado, Río Santa Cruz, Río Coyle, Río Gallegos y Río Grande); es decir, las zonas que carecen de la profundidad necesaria para la explotación de la energía mareomotriz con la tecnología disponible actualmente. Para ello, se utilizaron imágenes del sensor OLI a bordo del satélite Landsat 8 y datos de marea de los puertos más cercanos a cada estuario. Mediante herramientas SIG, se otorgó la clasificación de agua o tierra a los píxeles de las imágenes obtenidas a partir del uso del Índice de Agua de Diferencia Normalizada Modificado (MNDWI). Las imágenes más representativas de los eventos de marea alta y baja obtenidas para cada estuario se compararon, otorgándosele la clasificación de zona intermareal a aquellas zonas que cambiaron de clase (tierra o agua) entre una imagen y otra. La combinación de materiales y métodos utilizada demostró ser muy eficaz para la caracterización de la zona intermareal de los diferentes estuarios.

Palabras clave: Energía mareomotriz, Landsat 8, Índice de Agua de Diferencia Normalizada Modificado

#### 1 - Introducción

Las energías renovables son aquellas fuentes energéticas capaces de renovarse de manera ilimitada, como por ejemplo el sol, el viento, el agua o la biomasa vegetal, entre otras. En el actual contexto de cambio climático, estas fuentes renovables tienen cada vez mayor respaldo de la comunidad científica internacional para su desarrollo debido a su menor efecto contaminante en comparación con las fuentes de energía convencionales (petróleo, gas natural, carbón), que producen grandes cantidades de anhídrido carbónico.

La energía mareomotriz es aquella producida por el movimiento de las mareas, y puede ser aprovechada de dos maneras: 1) utilizando presas de marea, que hacen uso de la energía potencial provocada por los cambios en el nivel del mar; 2) captando la energía cinética de las corrientes de marea mediante turbinas hidrocinéticas (Etemadi et al., 2011). En la actualidad, hay una tendencia hacia los sistemas de producción de energía que utilizan turbinas debido a que son removibles, se pueden ampliar gradualmente (desde unos pocos hasta una matriz), y tienen menores costos potenciales e impacto ambiental (FORCE, s.f.).

La amplitud de marea en el océano abierto nunca es demasiado grande; sin embargo, puede llegar a ser importante cerca de la costa, particularmente en mares y estuarios semi-cerrados, debido a la resonancia y convergencia de las fronteras terrestres (Greaves e Iglesias, 2018). En la Argentina, los estuarios patagónicos del Río Deseado, Río Santa Cruz, Río Coyle, Río Gallegos y Río Grande presentan las mejores condiciones para el aprovechamiento de la energía mareomotriz; en ellos, se tienen amplitudes de marea máximas que van de los 6,18 m a los 13,07 m, y amplitudes medias en el rango 4,34-8,37 m. Esto permite pensar en velocidades de corrientes de marea que hacen viable la explotación del recurso energético.

En el marco del proyecto de investigación "Evaluación del potencial energético de las corrientes de marea en estuarios patagónicos mediante modelación numérica" (PIO CONICET - Fundación YPF), se

delimitó y calculó la superficie de la zona intermareal de los cinco estuarios patagónicos. La zona intermareal de un estuario es el área de costa expuesta al aire durante la marea baja y cubierta con agua de mar durante la marea alta; es decir, una zona de baja profundidad (no apta para la instalación de turbinas hidrocinéticas) que limita el aprovechamiento de las corrientes de marea en el entorno de los estuarios.

# 2 - Metodología

Los sitios de estudio fueron los estuarios del Río Deseado, Río Santa Cruz, Río Coyle, Río Gallegos (ubicados todos ellos en la provincia de Santa Cruz), y Río Grande (provincia de Tierra del Fuego; Figura 1). Para explicar los métodos utilizados, se tomará como ejemplo el caso del estuario del Río Grande.



Figura 1. Localización de las zonas de estudio.

La delimitación y cálculo de la superficie de la zona intermareal de los estuarios se llevó a cabo mediante la adquisición y el procesamiento de imágenes satelitales. Las imágenes fueron obtenidas con la herramienta USGS Earth Explorer, la cual permite, entre otras cosas, la descarga rápida y gratuita de imágenes Landsat. Para este caso, se utilizaron las imágenes de los sensores OLI (Operational Land Imager) y TIRS (Thermal Infrared Sensor) a bordo del satélite Landsat 8, operativo desde 2013. Estos instrumentos recogen datos de imagen de nueve bandas de onda corta con resolución espacial de 30 m (visible, NIR y SWIR) y 15 m (pancromático), y dos bandas térmicas de onda larga con resolución espacial de 100 m, respectivamente. El Landsat 8, por su parte, tiene una orbita heliosincrónica (705 km de altitud) con un período de revisita de 16 días y una cobertura espacial por escena de 185x180 km.

También fue necesario disponer de los datos de las tablas de marea del Servicio Hidrografía Naval de los puertos más cercanos a los estuarios<sup>1</sup>. De esta manera, fue posible vincular la fecha y hora de las imágenes obtenidas para cada estuario con una altura de marea. Del total de imágenes disponibles, se seleccionaron solamente las más representativas de los eventos de marea de mayor y menor altura (Figura 2). Los criterios aplicados para dicha selección fueron: a) que el porcentaje de nubosidad sea bajo (<15%); b) que exista el menor lapso de tiempo posible entre los eventos; y c) que las imágenes sean recientes.



Figura 2. Imágenes Landsat 8 OLI/TIRS del estuario del Río Grande correspondientes a los eventos de marea de mayor (a; 7,29 m) y menor altura (b; 1,82 m).

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Puerto Deseado, Puerto Punta Quilla, Puerto Punta Loyola y Puerto Río Grande.

Mediante la utilización del software libre "Quantum GIS 2.12.2 Lyon", se otorgó la clasificación de agua o tierra a los píxeles de las imágenes obtenidas a partir del uso del Índice de Agua de Diferencia Normalizada Modificado (MNDWI). Este índice permite diferenciar los territorios cubiertos por agua de aquellos que no lo están (Xu, 2006). La fórmula para su cálculo es la siguiente:

$$MNDWI = \frac{Green - MIR}{Green + MIR}$$

Donde:

Green (Banda del verde) = Banda 3 del sensor OLI.

MIR (Banda del infrarrojo medio) = Banda 6 del sensor OLI.

Valores positivos del índice clasifican a los píxeles en la categoría agua, mientras que valores de cero o negativos están asociados a la vegetación, el suelo o las construcciones (Matsushita, 2016). No obstante, según Xu (2006), la mejor caracterización de la superficie de agua de una imagen se consigue utilizando un valor umbral de 0,09. Este valor fue el que se utilizó para clasificar los píxeles de las imágenes en agua (1 si MNDWI>0,09) o tierra (0 si MNDWI≤0,09). En las Figuras 3 y 4 se pueden observar las imágenes generadas luego del cálculo del MNDWI, antes y después de la aplicación del umbral.



Figura 3. Imágenes del estuario del Río Grande generadas con el MNDWI, antes (a) y después (b) de utilizar el valor umbral (evento de marea alta).



Figura 4. Imágenes del estuario del Río Grande generadas con el MNDWI, antes (a) y después (b) de utilizar el valor umbral (evento de marea baja).

Posteriormente, se realizó la operación matemática de suma entre los valores de los píxeles de las imágenes de marea alta (Figura 3b) y marea baja (Figura 4b). Como resultado de este procedimiento, se obtuvo una nueva imagen con tres valores posibles para sus píxeles (0, 1 y 2; Figura 5). Los píxeles que cambiaron de clase (tierra o agua) entre una imagen y la otra, quedaron con el valor 1 y fueron clasificados como zona intermareal; aquellos que no cambiaron fueron clasificados como tierra (valor 0) o agua (valor 2). La imagen creada debió ser procesada para remover las áreas que cambiaron de clase entre las situaciones de marea comparadas pero no correspondían a la zona intermareal, como fue el caso de las lagunas.



Figura 5. Zona intermareal (en blanco) del estuario del Río Grande.

Para calcular la superficie que representa la zona intermareal dentro de cada estuario fue necesario en primer lugar el establecimiento de los límites de cada uno de ellos (Figura 6).



Figura 6. Superficie (en rojo) del estuario del Río Grande.

Teniendo en cuenta estos límites, se vectorizaron y recortaron imágenes ráster previamente utilizadas para la delimitación de la zona intermareal (Figura 7). Esto facilitó el cálculo de las superficies a partir de las herramientas básicas del software SIG utilizado.



Figura 7. Imágenes vectorizadas y polígonos de corte para la superficie del estuario (a) y de la zona intermareal (b).

### 3 - Resultados

La metodología empleada demostró ser muy apropiada para delimitar la zona intermareal de los estuarios (Figuras 8-12). Por un lado, esto se debe a la efectividad del MNDWI para la extracción de superficies de agua de datos de imagen. Este índice se ha utilizado para evaluar cambios espacio-temporales en cuerpos de agua dulce (Sarp y Ozcelik, 2017), identificar zonas anegadas en situaciones

de exceso (Passucci, 2017), detectar cambios en la línea de costa (Fuad y Fais, 2017), etc. El otro motivo es la gran calidad de las imágenes satelitales utilizadas; los sensores a bordo del satélite Landsat 8 pueden distinguir 4096 tonos de grises (resol. radiométrica de 12 bits). Murray et al. (2012), por ejemplo, aplicando un método muy similar, consiguió una precisión del 85% al mapear la zona intermareal de más de 1000 km de costa calculando el NDWI (menos eficaz que el MNDWI; Xu, 2016) a partir de imágenes Landsat TM y ETM+ (resol. radiométrica de 8 bits; 296 tonos de grises).



Figura 8. Zona intermareal (en naranja) del estuario del Río Deseado.



Figura 9. Zona intermareal (en naranja) del estuario del Río Santa Cruz.



Figura 10. Zona intermareal (en naranja) del estuario del Río Coyle.



Figura 11. Zona intermareal (en naranja) del estuario del Río Gallegos.



Figura 12. Zona intermareal (en naranja) del estuario del Río Grande.

En la Tabla 1 se puede ver la extensión absoluta y relativa de la zona intermareal de cada estuario. Mientras que esta zona representa casi el 68% de la superficie total del estuario del Río Grande, solo significa el 12,16% del estuario del Río Deseado. En los otros estuarios, caracterizados por tener mayores amplitudes de marea, la zona intermareal representa entre el 30 y el 50% de la superficie total. Las imágenes utilizadas correspondientes a las situaciones de marea alta y baja no siempre reflejaron las situaciones más extremas (pleamar y bajamar media) buscadas para el mapeo de la zona intermareal, lo cual significa que los valores de superficie calculados están subestimados en distinta medida según el caso.

	Altura marea (m)				Superficie	
	Pleamar	Bajamar	En imágenes		$Km^2$	07
	media	media	Alta	Baja	KIII	%0
Estuario del Río Deseado	5,89	1,30	4,28	1,05	48,02	-
Zona intermareal					5,84	12,16
Estuario del Río Santa Cruz	10,36	2,26	9,93	5,32	204,78	-
Zona intermareal					68,27	32,39
Estuario del Río Coyle	11,04	2,69	10,89	3,56	48,62	-
Zona intermareal					23,5	48,33
Estuario del Río Gallegos	11,04	2,69	10,76	3,76	164,33	-
Zona intermareal					63,22	38,47
Estuario del Río Grande	7,43	1,82	7,29	1,82	6,36	-
Zona intermareal					4,32	67,92

Tabla 1. Extensión absoluta y relativa de la zona intermareal de cada estuario.

### 4 - Conclusiones

• El trabajo presenta una metodología simple y efectiva para mapear la zona de transición entre el ambiente marino y el terrestre.

- Se utilizaron las imágenes satelitales más representativas de los eventos de marea alta y baja de cada estuario, las cuales fueron transformadas en imágenes binarias tierra/agua mediante el cálculo del MNDWI. Con una simple operación ráster, se identificaron los pixeles que cambiaron de clase (tierra ó agua) entre estas imágenes y se obtuvo la zona intermareal.
- Los resultados obtenidos pueden servir para evaluar la posibilidad de aprovechamiento de las corrientes de marea en el entorno de los estuarios.

# 5 - Referencias

- Etemadi, A.; Emami, Y.; AsefAfshar, O; y Emdadi, A. (2011). Electricity Generation by the Tidal Barrages. *Energy Procedia* (12): 928-935.
- FORCE (s.f). Tidal Energy Generation. Recuperado de: http://fundyforce.ca/renewable-and-predictable/tidal-energy-generation/
- Fuad, M. y Fais, M. (2017). Automatic Detection of Decadal Shoreline Change on Northern Coastal of Gresik, East Java - Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 98.
- Greaves, D. e Iglesias, G. (2018). Wave and Tidal Energy. John Wiley & Sons. 720 págs.
- Matsushita, B.; Yang, W.; Muhamad Jaelani, L.; Setiawan, F.; y Fukushima, T. (2016). Monitoring Water Quality with Remote Sensing Image Data. En: Weng, Q. (Editor) Remote Sensing for Sustainability. Boca Raton, FL: CRC Press/Taylor and Francis, Capítulo 9, pp. 163-184.
- Murray, N.; Phinn, S.; Clemens, R.; Roelfsema, C.; y Fuller, R. (2012). Continental Scale Mapping of Tidal Flats across East Asia Using the Landsat Archive. *Remote sensing* (4): 3417-3426.
- Passucci, V. (2017). Uso de técnicas de teledetección para la elección de potenciales sitios de instalación de estaciones de monitoreo ambiental. Trabajo Final de Licenciatura en Tecnología Ambiental. Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires.

- Sarp, G. y Ozcelik, M. (2017). Water body extraction and change detection using time series: A case study of Lake Burdur, Turkey. *Journal of Taibah University for Science* (11): 381-391.
- Servicio de Hidrografía Naval (SHN). Tablas de Marea. En: http://www.hidro.gov.ar/oceanografia/Tmareas/Form\_Tmareas.asp
- Xu, H. (2006). Modification of Normalised Difference Water Index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *Int. J. Remote Sens.* (27): 3025-3033.