

Diseño de una metodología para cálculo de energía hidrocínética en estuarios: ejemplo de aplicación con el software IBER

Design of a methodology for calculating hydrokinetic energy in estuaries: application example with IBER Software

Andone Amezqueta-García^{a1}, Víctor Manuel Fernández-Pacheco^{a2}, Eduardo Álvarez-Álvarez^{a3*}

^a Área de Ingeniería Hidráulica, Departamento de Energía, Universidad de Oviedo, Escuela Politécnica de Mieres, C/ Gonzalo Gutiérrez Quirós s/n. 33600-Mieres, Asturias, España.

E-mail: ^{a1}UO226541@uniovi.es, ^{a2}fernandezpvictor@uniovi.es, ^{a3}edualvarez@uniovi.es

*Autor para correspondencia

Recibido: 30/07/2021

Aceptado: 05/10/2021

Publicado: 31/10/2021

Citar como: Amezqueta-García, Andone; Fernández-Pacheco, Víctor Manuel; Álvarez-Álvarez, Eduardo. 2021. Design of a methodology for calculating hydrokinetic energy in estuaries: application example with IBER Software. *Ingeniería del agua*, 25(4), 271-286. <https://doi.org/10.4995/la.2021.16043>

RESUMEN

En el contexto actual de una creciente demanda energética, la energía hidrocínética provocada por la interacción de mareas y caudales de agua en estuarios de los ríos es una de las fuentes con mayor potencial por explotar. En este artículo se presenta el diseño una metodología, que incluye un código que permite automatizar la evaluación de la energía hidrocínética disponible en un estuario, así como el valor de la energía que puede ser aprovechada por turbinas hidrocínéticas de eje vertical a partir de los resultados de simulación obtenidos mediante programas de simulación hidrodinámica. Se ha realizado la integración de dicho código con el software de simulación hidrodinámica IBER, aplicándose la metodología al caso del estuario del río Nalón (Asturias, España).

Palabras clave | microturbinas, energía hidrocínética, IBER.

ABSTRACT

In the current context of growing energy demand, hydrokinetic energy caused by the interaction of tides and water flows in river estuaries is one of the sources with the greatest potential to be exploited. This article presents a methodology and a specific code that based on the results obtained by hydrodynamic simulation programmes allows to perform an evaluation of the hydrokinetic energy of an estuary, and the fraction that can be harnessed by vertical axis hydrokinetic turbines. The code has been integrated in IBER hydrodynamic simulation software, applying the methodology to the case of the Nalón river estuary (Asturias, Spain).

Key words | microturbine, hydrokinetic energy, IBER.

INTRODUCCIÓN

El empleo de fuentes de energía tradicionales ha contribuido a un aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero, lo que repercute negativamente en el escenario de cambio climático en el que nos encontramos. El efecto medioambiental de la quema de combustibles fósiles ha llevado a que en los últimos años se hayan desarrollado enormemente las energías renovables, mostrándose como una alternativa de generación limpia y sostenible (Xu *et al.*, 2019) en un contexto de creciente demanda energética (van Ruijven *et al.*, 2019).

La energía de las mareas o energía mareomotriz se muestra como una de las nuevas fuentes de energía más interesantes debido a la cantidad de agua disponible en movimiento y la gran extensión de la superficie de los mares (Huckerby *et al.*, 2012). A pesar del avance en la explotación de la energía mareomotriz basada en plantas de alta potencia, principalmente mediante presas de marea y más recientemente mediante turbinas hidrocínéticas de alta potencia (>500 kW) (Rourke *et al.*, 2010), su implementación ha sido limitada debido a las importantes inversiones, los altos costes operativos y el gran impacto ambiental. La generación local utilizando microturbinas hidrocínéticas dispuestas en matrices, en lugares con altas velocidades de corriente (estuarios o canales de marea), se presenta como una alternativa adecuada a la generación a gran escala (Ferrerías *et al.*, 2014; Sørnes, 2010).

Para optimizar el diseño de esta tecnología, lograr su instalación y uso exitosos, es necesario un conocimiento detallado del potencial energético de las mareas en la ubicación específica. Este cálculo no es fácil y requiere el uso de herramientas de software. Actualmente se utilizan códigos empleados para cálculos hidráulicos (básicamente transporte de sedimentos o contaminantes) y estudios de inundaciones (en ríos, estuarios y regiones costeras), pudiéndose clasificar en función de las dimensiones espaciales estudiadas: tipo unidimensional (1D), bidimensional (2D) y tridimensional (3D). Su adaptación para el cálculo del potencial energético de las mareas es una solución muy útil ya que se trata de herramientas contrastadas y que han sido utilizadas durante años, con una importante comunidad de usuarios y desarrolladores con experiencia.

Actualmente, se han desarrollado estudios de análisis de potencial hidrocínético de flujos de agua en lámina libre utilizando los softwares mencionados anteriormente, siendo de dos tipos: estudios básicos o iniciales donde no se tiene en cuenta el efecto de las microturbinas pero de utilidad para la selección de la ubicación idónea, y estudios donde se tienen en cuenta. Para el último caso se han utilizado dos aproximaciones que permiten simular su efecto en las zonas de ubicación: incrementando la rugosidad del fondo en dichas zonas o convirtiéndolas en sumideros de cantidad de movimiento.

Algunos casos de estudios básicos se detallan en (Neill *et al.*, 2018). Asimismo, se han realizado distintos análisis que tienen en cuenta el efecto de las turbinas en el flujo, incrementando la rugosidad en el fondo en el estrecho de Johnstone (Canadá) utilizando el software 2D denominado TIDE2D (Sutherland *et al.*, 2007) o convirtiendo las zonas ocupadas por estas en sumideros de cantidad de movimiento en el estrecho de Pentland Firth (Escocia) tanto en 2D como 3D empleando el código libre *Regional Ocean Modeling System* (Goward Brown *et al.*, 2017).

En este artículo se presenta un desarrollo de software que permite realizar estudios básicos de potencial hidrocínético a partir de los resultados de velocidad y altura de lámina de agua obtenidos en programas de simulación, permitiendo la selección la ubicación óptima para un conjunto de turbinas. Este desarrollo se ha aplicado al software IBER (Bladé *et al.*, 2014) y como ejemplo de funcionamiento se ha calculado el potencial hidrocínético en el estuario del río Nalón (Asturias, España).

Dentro de los diferentes tipos de modelos existentes, IBER es un modelo numérico bidimensional (2D) para la simulación de flujos superficiales en lámina libre, en régimen no permanente. IBER consta actualmente de distintos módulos: cálculo hidrodinámico, turbulencia, transporte de sedimentos, calidad de agua, hidrología y hábitat fluvial. Para el tipo de simulación a realizar se prescinde de la turbulencia y el transporte al considerarlos poco relevantes para el estudio de la velocidad desarrollada en el curso.

Se ha seleccionado el estuario del río Nalón teniendo en cuenta que en general en los estuarios del norte de España la interacción de los caudales de los ríos frente a las mareas genera zonas de alta energía hidrocínética y, por tanto, susceptibles de colocación de turbinas para su aprovechamiento, siendo esta una alternativa sostenible de generación de energía. Asimismo, las últimas investigaciones han puesto de manifiesto tanto el abaratamiento de las turbinas y equipos auxiliares como su capacidad para trabajar en rangos de baja velocidad (Espina-Valdés *et al.*, 2020). De esta manera el aprovechamiento del recurso hidrocínético

se presenta como una alternativa adecuada para abastecer demandas desconectadas de la red principal y situadas en sus cercanías (Álvarez *et al.*, 2016): iluminación, alimentación de puntos de recarga de vehículos eléctricos.

METODOLOGÍA

De entre los programas existentes para la simulación en aguas someras, se ha seleccionado IBER (en su versión estándar), por tratarse de un software gratuito, que además garantiza un nivel de precisión elevado y ofrece un coste computacional reducido, pudiendo ser aplicado a casos de flujo altamente bidimensional. Esta metodología se compone de tres fases (Figura 1): el preproceso en el que se crea el modelo geométrico lo que requiere el empleo de un software de Sistemas de Información Geográfica (*Geographic Information System*, GIS) y apoyarse en la cartografía de la zona; el desarrollo del estudio mediante la simulación que se realiza en IBER y la automatización del tratamiento de datos para lo que se implementan una serie de algoritmos en Java.

Preproceso

Durante esta primera fase se lleva a cabo la modelización geomorfológica e hidráulica del terreno permitiendo definir los datos de entrada a utilizar durante la simulación. Para ello se utiliza: un Modelo Digital del Terreno (MDT) con malla de 5×5 m basado en datos LIDAR y disponible en la base de datos del Instituto Geográfico Nacional; y en las zonas bajo el nivel del mar, batimetrías obtenidas de las cartas de navegación, obteniéndose un fichero ráster ASCII de elevaciones.

La definición de las rugosidades del terreno se hace en función de los usos del suelo utilizando la fuente de la Agencia Europa de Medio Ambiente, CORINE Land Cover (Copernicus Land Monitoring Service, 2018), complementado en el caso de España con datos del Sistema de Información de Ocupación del Suelo de España (SIOSE) obtenidos a partir del Instituto Geográfico Nacional (IGN).

El resultado es un fichero en formato *shapefile* (.shp) que mapea los usos del suelo mediante códigos (Figura 2). El cual se transforma: en un ráster ASCII que incluye en cada celda de la superficie un código y un fichero *comma-separated values* (.csv)

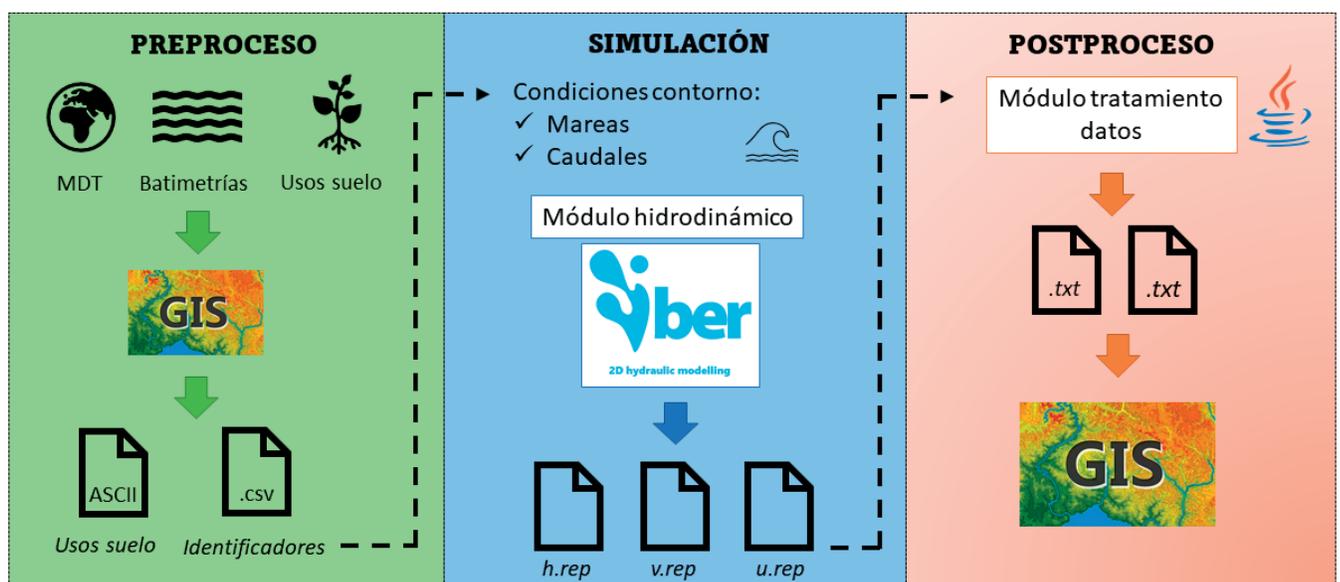


Figura 1 | Esquema general de la metodología propuesta.

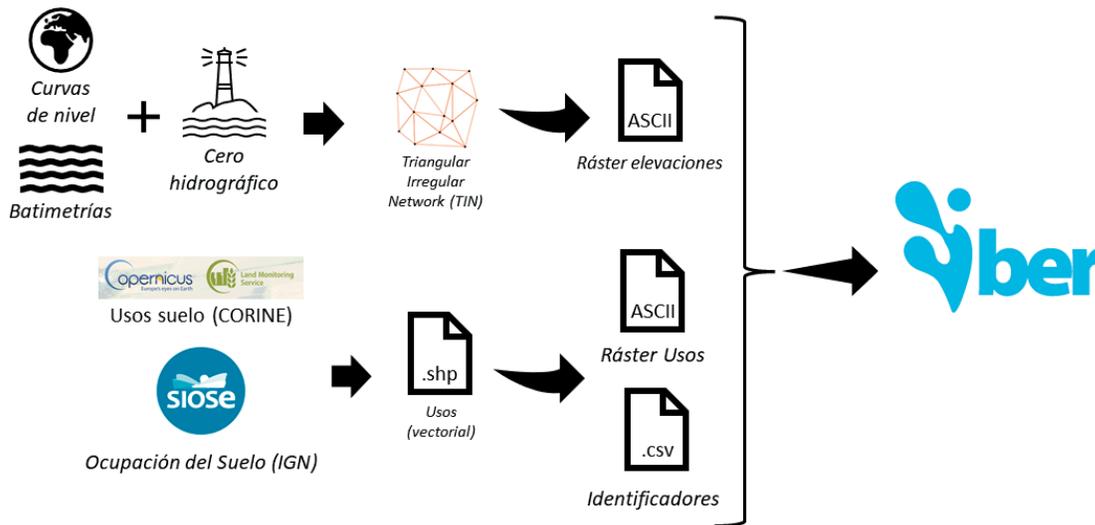


Figura 2 | Esquema del preproceso necesario para definir datos de terreno (importados por IBER).

que asigna a cada de estos valores (código) un tipo de uso (Figura 2). Para su importación posterior en IBER será necesario que este programa disponga de una biblioteca de tipos de uso con sus correspondientes rugosidades.

Antes de iniciar la simulación se deben definir las condiciones de contorno aguas arriba y aguas abajo, como la marea y el caudal respectivamente. Para las mareas se emplearán datos de la red de mareógrafos de la zona que permita consultar y generar series largas de nivel del mar. Para establecer los caudales, se utilizarán los registros de la estación de aforo más cercana a la zona de estudios. Siempre que sea posible, se tomará la mayor serie de datos disponible, a fin de poder estimar unos caudales representativos. Adicionalmente, se deberá revisar la existencia de obras hidráulicas o ríos de entidad considerable que puedan alterar el caudal al cauce en su recorrido desde la estación de aforo elegida hasta la zona de estudio.

Simulación

IBER es un modelo numérico de simulación de flujo en lámina libre y de procesos ambientales de hidráulica fluvial con ejemplos de aplicación muy diversos, por ejemplo, modelización del impacto de los vertidos contaminantes en ríos (Anta Álvarez *et al.*, 2015), estudios en el ámbito de la inundabilidad (Sanz-Ramos *et al.*, 2020), rotura de presas (Álvarez *et al.*, 2017), etc. En este estudio se ha prescindido de la turbulencia por considerar que su efecto en los resultados es poco relevante.

El modelo hidrodinámico resuelve las ecuaciones de St. Venant en 2D aplicadas a la modelización de flujos de lámina libre en aguas someras con régimen transitorio. La discretización se realiza a través de una malla de volúmenes finitos formada por elementos triangulares o cuadriláteros, normalmente se utilizará una malla triangular ya que es la que mejor se adapta a la compleja morfología de los cauces. IBER también considera la fricción del fondo y la evalúa de acuerdo con la fórmula de Manning.

Postproceso

Esta fase de postproceso supone el factor diferencial de esta metodología. Los resultados obtenidos en el software de simulación son explotados mediante un programa diseñado sobre lenguaje Java, desarrollado mediante Eclipse y de libre acceso en <https://mega.nz/file/BVNmyZBb#AVbERvCvTeb177hS2uWBDFziuVEJ1PyG5nBoLiY4FC0>. Esta forma de trabajo permite generar de forma inmediata y fiable tablas con los parámetros que caracterizan el comportamiento del sistema a lo largo de los diferentes meses del año. El volumen de datos a tratar dependerá del tamaño del mallado y del número de instantes evaluados. El

tiempo de postproceso estará sujeto al volumen de datos y a los recursos computacionales disponibles, sin embargo, se pueden obtener resultados en apenas unos minutos empleando ordenadores convencionales. Esta solución supone una mejora sustancial respecto de lo existente por su fiabilidad y rapidez, frente a tratamientos convencionales que se reducen al cálculo analítico de las energías obtenidas en una única sección o punto, y que requieren la entrada manual de los datos.

El código diseñado calcula la cantidad de energía que una microturbina podría extraer en cada intervalo de tiempo en cada celda de acuerdo con los resultados de la simulación. El proyecto implementado en Java se compone de 6 clases: *Turbine*, *DataPack*, *RawDataPack*, *RawDataReader*, *AnualProject* y *DataPlotter*, cuya estructura se puede observar en la Figura 3. El programa diseñado utiliza tres archivos internos que genera el software de simulación IBER (u.rep, v.rep y h.rep) que contienen para cada celda e instante de tiempo la velocidad en el eje X, la velocidad en el eje Y y la altura de la lámina de agua sobre el lecho.

La clase *RawDataReader* se encarga de la lectura de los ficheros de salida que IBER genera tras las simulaciones, dada una ruta determinada. Este lector de datos brutos es creado específicamente para leer ficheros con una estructura determinada, si bien es fácilmente modificable conocida la estructura de los ficheros generados por otros programas.

Del almacenamiento de la información se encargan las clases *RawDataPack* y *DataPack*. *RawDataPack* es un paquete de datos que contiene dos matrices, con los módulos de las velocidades y la altura de la lámina de agua sobre la superficie del terreno, y otra con los tiempos de simulación, para una simulación completa. Por otro lado, la clase *DataPack* es un paquete de datos que realiza una labor de filtrado para el tramo de interés de la simulación, a partir de unos tiempos inicial y final que se almacenan en un vector de instantes, la clase contiene una matriz con los módulos de las velocidades y otra con las profundidades, entre los instantes seleccionados y para cada celda del mallado.

La clase *Turbine* tiene por atributos todo lo necesario para determinar el funcionamiento de una turbina hidrocínética de eje vertical: una velocidad de arranque V_{in} en m/s, velocidad nominal de la turbina V_n en m/s, velocidad máxima a partir de la cual se para por seguridad V_{out} en m/s, la altura de la turbina H en m, densidad de agua $\rho=1000$ kg/m³ y un coeficiente de potencia C_p . Se asumió que la turbina solo funciona cuando (i) la superficie libre estaba por encima de la microturbina (o descubierta en un porcentaje determinado), y (ii) la velocidad de flujo sobrepasaba una cierta velocidad de arranque. En las Ecuaciones 1 y 2 se calcula para cada paso temporal los valores de potencia instantáneos P en W/m y energía obtenida E en kWh/m.

$$P = \begin{cases} 0 & \text{si } V < V_{in} \text{ ó } V > V_{out} \\ \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot H \cdot \rho \cdot V^3 & \text{si } V_{in} \leq V \leq V_n \\ \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot H \cdot \rho \cdot V_n^3 & \text{si } V_n \leq V \leq V_{out} \end{cases} \quad (1)$$

$$E = \begin{cases} 0 & \text{si } h < H \cdot (1 - Tol) \\ P \cdot \Delta T / 1000 & \text{si } h \geq H \cdot (1 - Tol) \end{cases} \quad (2)$$

Donde h en m es la altura de la lámina de agua respecto al fondo del cauce; Tol , es el porcentaje de altura de la turbina descubierta que permite el sistema de control; ΔT es el tamaño del paso temporal en horas.

AnualProject es la clase principal donde se realizan las operaciones y transformaciones necesarias para obtener los datos de salida, un resumen de lo que sucede a lo largo del año en cada celda del mallado. A fin de agilizar el proceso y optimizar el uso de la memoria del computador, los diferentes *datapacks* van leyéndose sucesivamente y se implementa la totalidad de las operaciones en esta clase, evitando la repetición de bucles que ralentizarían el proceso. Esto es posible ya que se sabe que no se producirán errores en la entrada de datos, pudiéndose generalizar el caso delegando las funciones propias de cada *DataPack* a éstos mismos. El procesamiento de los datos se realiza mediante la orden *submit*, que tiene como parámetro de entrada una instancia de una tolerancia. De esta manera, se obtiene la energía aprovechable y el tiempo máximo que, a lo largo del año, la turbina podría no estar completamente sumergida.

Finalmente, la clase *DataPlotter* se encarga de la exportación de datos, ya sea del proyecto en su conjunto o de los diferentes tramos de interés de las simulaciones. Así, genera en una ruta determinada los ficheros *tideOutline.txt* y *projectOutline.txt* en los

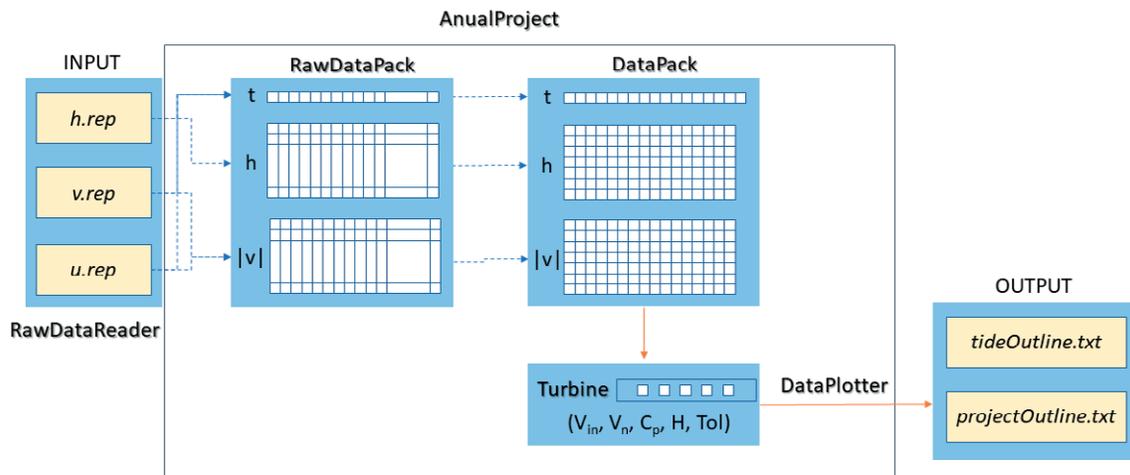


Figura 3 | Diagrama representativo de las diferentes clases implementadas para el módulo de tratamiento de datos.

que se recogen tabulados los diferentes datos de interés para cada marea y para cada año respectivamente. Ambos archivos de texto contienen en la primera columna la numeración de la celda del mallado a la que corresponden los datos que siguen, separados cada uno por espacios en blanco. Este formato de salida ha sido especialmente pensado para que puedan ser leídos y mapeados mediante un programa GIS, cargando estas tablas sobre el mallado del dominio. Éste se importa de los ficheros del proyecto de IBER que se generan cuando se le pide que cree una geometría RTIN. De esta manera se pueden visualizar la cantidad de energía, el desarrollo de la velocidad o la altura de lámina libre.

CASO DE APLICACIÓN

Área de estudio

El área elegida para la aplicación de la metodología expuesta ha sido la desembocadura del río Nalón, el más caudaloso del Principado de Asturias (Figura 4). Cuenta con una longitud de 138 km y desemboca entre San Estaban de Pravia y San Juan de la Arena, formando la ría de Pravia, objeto de la simulación. Se tomarán los últimos 4.3 km de la desembocadura.



Figura 4 | Vista aérea de la desembocadura del río Nalón (2020, Google).

Preproceso

Se parte de un Modelo Digital del Terreno (MDT) de libre descarga de la página del IGN (IGN, 2020), concretamente el MDT5 de $5 \times 5 \text{ m}^2$ con una precisión de 0.25 m elaborada a partir de los datos del vuelo del LIDAR de 2008. La geometría LIDAR no penetra en la superficie del agua, y por tanto no aporta información sobre el fondo marino. Para completar la información, se recurre a cartas náuticas que la empresa Navionics publica en su *Chart Viewer* (Navionics, 2020). Estas cartas se elaboran a partir de los datos registrados por las embarcaciones dotadas de tecnología SONAR que transitan por las costas. Estas cartas se representan con una altura entre batimetrías de 0.5 m, lo que resulta en un modelo más realista (ver Figura 5).

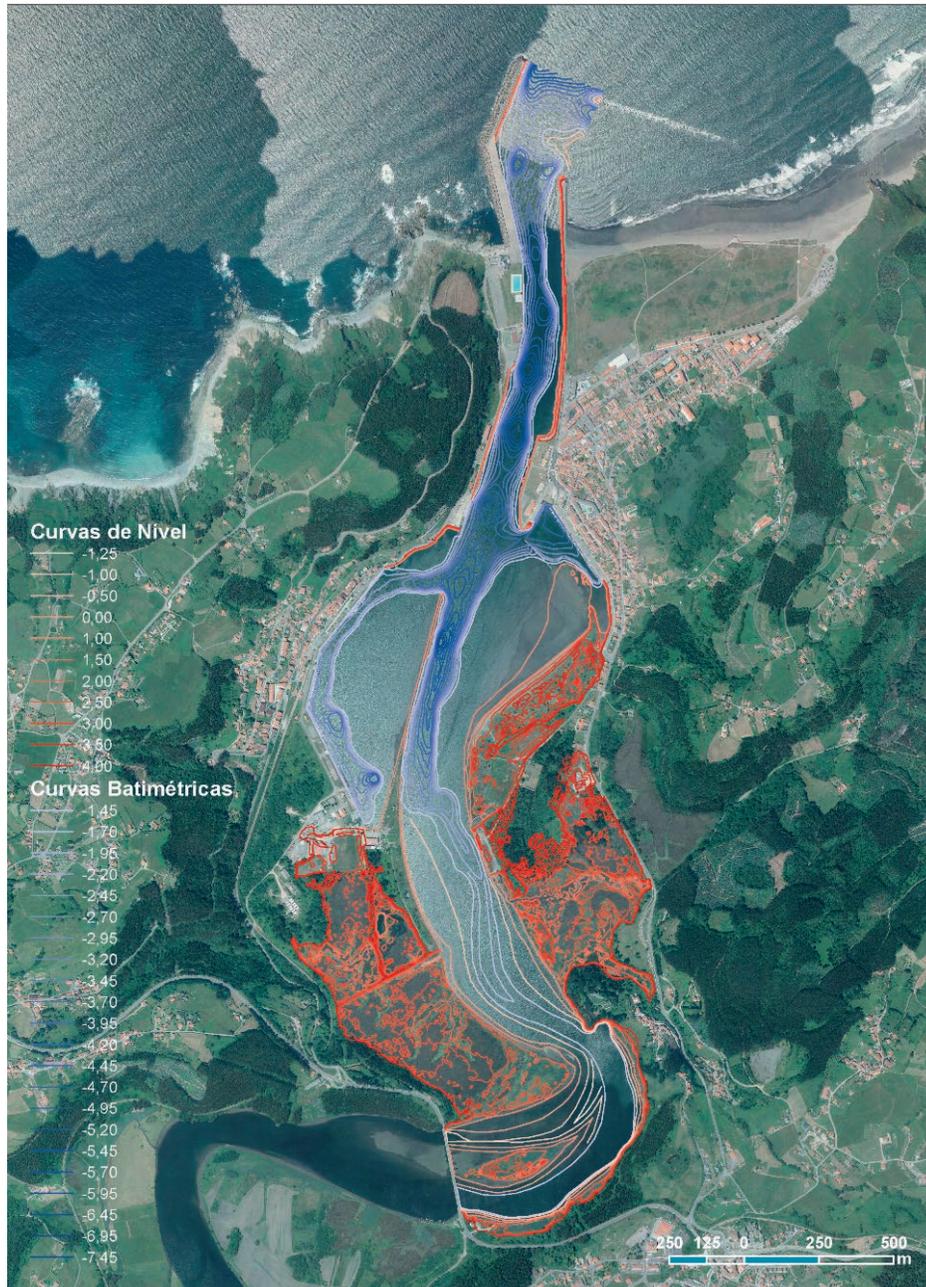


Figura 5 | Curvas de nivel y batimétricas.

Simulación

Se realizaron simulaciones de cada mes del año hidrográfico 2012-2013, utilizando como condiciones de contorno: (i) el caudal medio mensual del río aguas arriba en régimen crítico/subcrítico aguas arriba y (ii) los niveles de agua de una marea media mensual que ha sido definida a partir de datos del mareógrafo de Avilés, aguas abajo.

El caudal medio mensual se ha obtenido a partir de los datos disponibles en las estaciones de aforo más cercanas a la desembocadura del río Nalón en el momento del estudio. En concreto, se han adicionado los caudales de las estaciones con código 1368 (Nalón previa a la incorporación del río Narcea) y 1360 (río Narcea) de la Confederación Hidrográfica del Cantábrico. Para las mareas, se toma el registro horario del mareógrafo del Puerto de Avilés, cuyos datos pueden descargarse en la página web de este organismo.

Para reducir los tiempos de computación, se ha evaluado el modelo en una marea media representativa de cada mes. Cada marea media se calcula interpolando el ciclo de marea entre las mareas de amplitud máxima y mínima obtenidas del mareógrafo una vez realizado un tratamiento de datos para eliminar posibles errores (ver Tabla 1). En cada mes se simulan la marea máxima registrada para inicializar el modelo, seguida de la marea media (ambas con un período $T=12.4$ horas o 44640 s) más un margen de $T/24$ de dicha marea media para garantizar la obtención de los datos finales. En total se simulan por tanto 91 140 s al mes.

El empleo de la marea media simplifica sustancialmente los cálculos y no supone un importante error en los resultados ya que como se puede observar la diferencia entre las amplitudes de las mareas máximas y mínimas en cada mes es reducido, del orden de 2 o 3 metros.

Tabla 1 | Datos de marea en la desembocadura del río Nalón.

	Marea de amplitud máxima			Marea de amplitud media			Marea de amplitud mínima		
	$A_{m\acute{a}x}$	Bajamar	Pleamar	A_{med}	Bajamar	Pleamar	$A_{m\acute{i}n}$	Bajamar	Pleamar
Octubre	452	50	502	305.5	121.5	427	159	193	352
Noviembre	412	44	456	276.5	122	398.5	141	200	341
Diciembre	383	73	456	265	125.5	390.5	147	178	325
Enero	397	82	479	270.5	141	411.5	144	200	344
Febrero	440	60	500	285.5	119	404.5	131	178	309
Marzo	477	15	492	305	98.5	403.5	133	182	315
Abril	477	15	492	316	99	415	155	183	338
Mayo	445	49	494	306	109	415	167	169	336
Junio	362	62	424	258.5	120.5	379	155	179	334
Julio	403	49	452	279.5	113.5	393	156	178	334
Agosto	456	25	481	302	114	416	148	203	351
Septiembre	479	10	489	313.5	99.5	413	148	189	337

Para la simulaciones se utilizó un tamaño de paso temporal de 1 s ($CFL=0.45$) guardando los resultados obtenidos cada 310 s, con una malla compuesta por 27225 celdas triangulares de lado 10 m mínimo, 11.99 m medio y 14.14 m máximo (Figura 7).

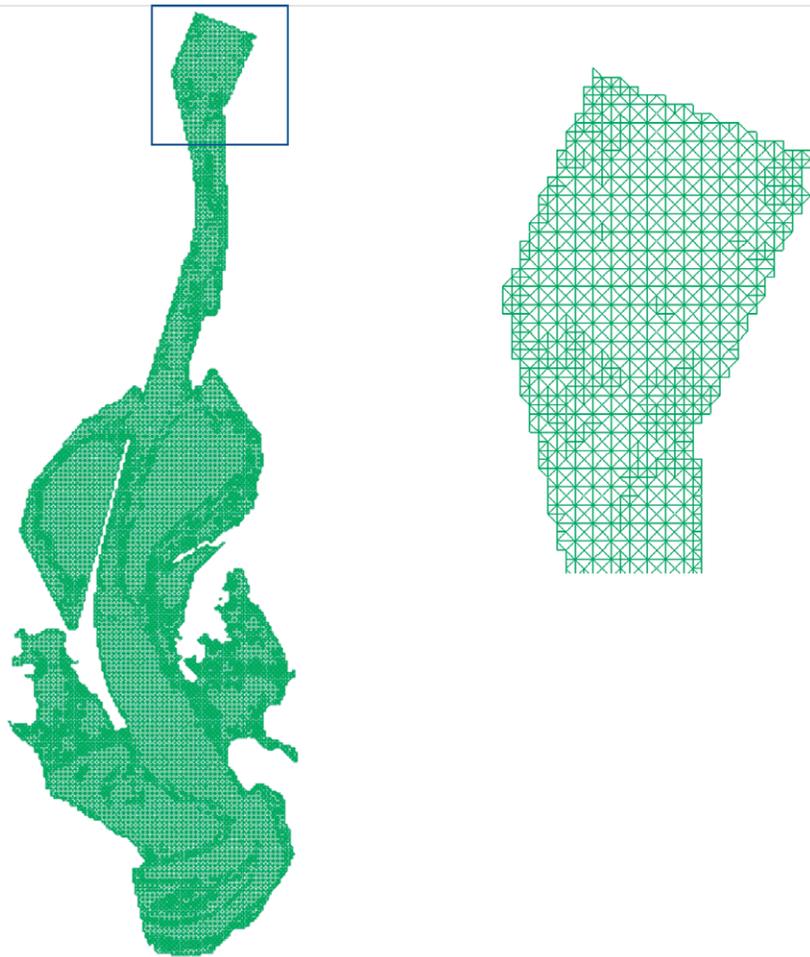


Figura 7 | Vista completa del mallado generado y detalle.

Postproceso

A partir de los algoritmos en Java comentados en la metodología, se realiza el postproceso de los resultados obtenidos en el software de simulación, para cuatro modelos de microturbina hidrocínética de flujo cruzado. Los valores de velocidades y alturas de las turbinas se han fijado según las características de la zona de estudio. Los coeficientes de potencia se establecen en 0.25 y 0.35 ajustados a la experiencia del grupo de investigación de los autores para estas turbinas en condiciones de baja velocidad de flujo y campo abierto (Blanco-Marigorta *et al.*, 2021). Estos valores son más conservadores que los propuestos en el estado del arte para velocidades de flujo más elevadas que sitúan sus coeficientes de potencia en el entorno de 0.4 (Saini *et al.*, 2019; Yuce *et al.*, 2015).

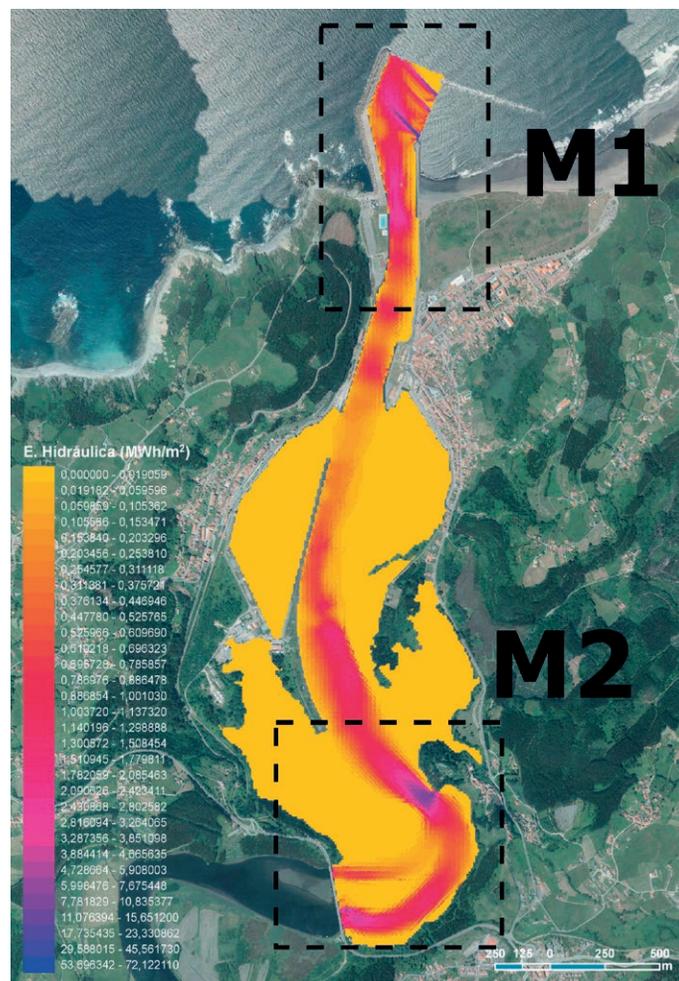
En un primer caso se evalúa la energía hidrocínética de eje vertical definida por los siguientes parámetros: $V_{in}=0.1$ m/s, $V_n=2$ m/s, $C_p=0.25$, $H=1400$ mm. Para el segundo caso se reduce la altura de la microturbina a la mitad ($H=700$ mm), manteniendo el resto de los parámetros. En el tercer caso se añade una tercera microturbina teórica con una altura intermedia entre las dos anteriores ($H=1000$ mm), que trabaja en un rango de velocidades mayor ($V_{in}=0.5$ m/s, $V_n=2.5$ m/s). En estos tres primeros casos la tolerancia definida por el porcentaje de altura de la turbina que puede quedar al descubierto compatible con su funcionamiento se establece en el 0%. En el cuarto caso se mantienen los parámetros de la microturbina del caso 3 ampliándose la tolerancia hasta el 10%. La Tabla 2 resume los valores empleados para la turbina en cada uno de los cuatro casos de estudio realizados.

Tabla 2 | Resumen de los parámetros de los distintos casos de estudio.

	V_{in}	V_n	C_p	H	Tolerancia
Caso 1	0.1 m/s	2.0 m/s	0.25	1.4 m	0%
Caso 2	0.1 m/s	2.0 m/s	0.25	0.7 m	0%
Caso 3	0.5 m/s	2.5 m/s	0.35	1.0 m	0%
Caso 4	0.5 m/s	2.5 m/s	0.35	1.0 m	10%

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El primer análisis del potencial hidrocínético de la ría del Nalón se realiza sin tener en cuenta el aprovechamiento energético de las turbinas, es decir a partir del cálculo de la potencia disponible en cada punto e instante temporal según $P=\frac{1}{2}\cdot\rho\cdot V^3$ y sin ninguna restricción para el cálculo de la energía (alturas de lámina de agua o rango de velocidades del flujo). Los resultados se muestran en la Figura 8, en ella se pueden observar en tonos morado y rojo las zonas con mayor energía anual. Concretamente los máximos, del orden de 50-60 MWh/m² se localizan en zonas de estrechamiento del río, una situada al final de la desembocadura (zona M1) y otra aguas arriba de la misma en una zona de división en dos del río (zona M2). Dada la situación de las zonas de mayor interés en los límites del dominio, la precisión de los resultados obtenidos podría mejorarse si se extendiera la malla más allá de dichas zonas.

**Figura 8** | Potencial de energía hidrocínética en la desembocadura del río Nalón.

Tanto en el Caso 1 (Figura 9a) como en el Caso 2 (Figura 9b) los valores máximos de energía aprovechable con microturbinas se reducen considerablemente hasta máximos del orden de 1.5-2 MWh/m debido a la reducción en la fracción de tiempo en la cual la velocidad es superior a la velocidad de arranque de la microturbina seleccionada (0.1 m/s). Asimismo, en el caso 1 solo la zona M1 es aquella susceptible de la colocación de turbinas constatándose que en la zona M2 el calado es durante todo el año inferior a 1.4 m.

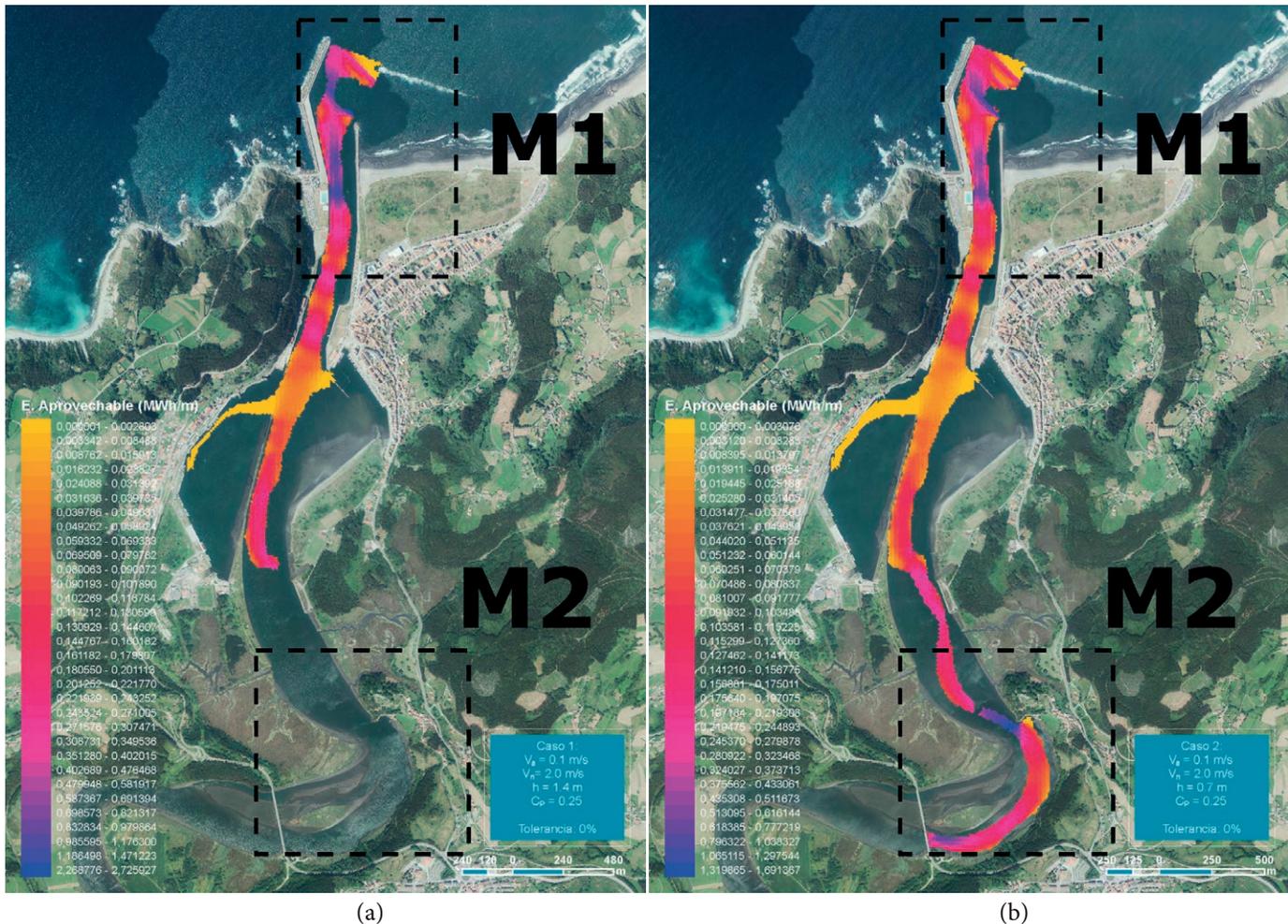


Figura 9 | Energía aprovechable correspondiente a las turbinas definidas en el Caso 1 (a) y Caso 2 (b).

En el Caso 3 (Figura 10a) y Caso 4 (Figura 10b) en las zonas de máxima energía los valores obtenidos son aproximadamente el doble que en los casos 1 y 2 debido al incremento de la velocidad nominal (V_N) de la turbina y del C_p . La diferencia entre ambos demuestra que en la zona M2 la altura del agua nunca es superior a 1 m y, por tanto, se destaca la importancia de que el sistema de control de la turbina permita que la lámina de agua sea inferior a ese valor durante la fase de operación. Así en el caso 4, donde se permite que la turbina emerja un 10% del tiempo anual, se puede aprovechar la energía de la zona M2, obteniendo un orden de magnitud de aproximadamente el doble que en casos anteriores en torno a 5 MWh/m.

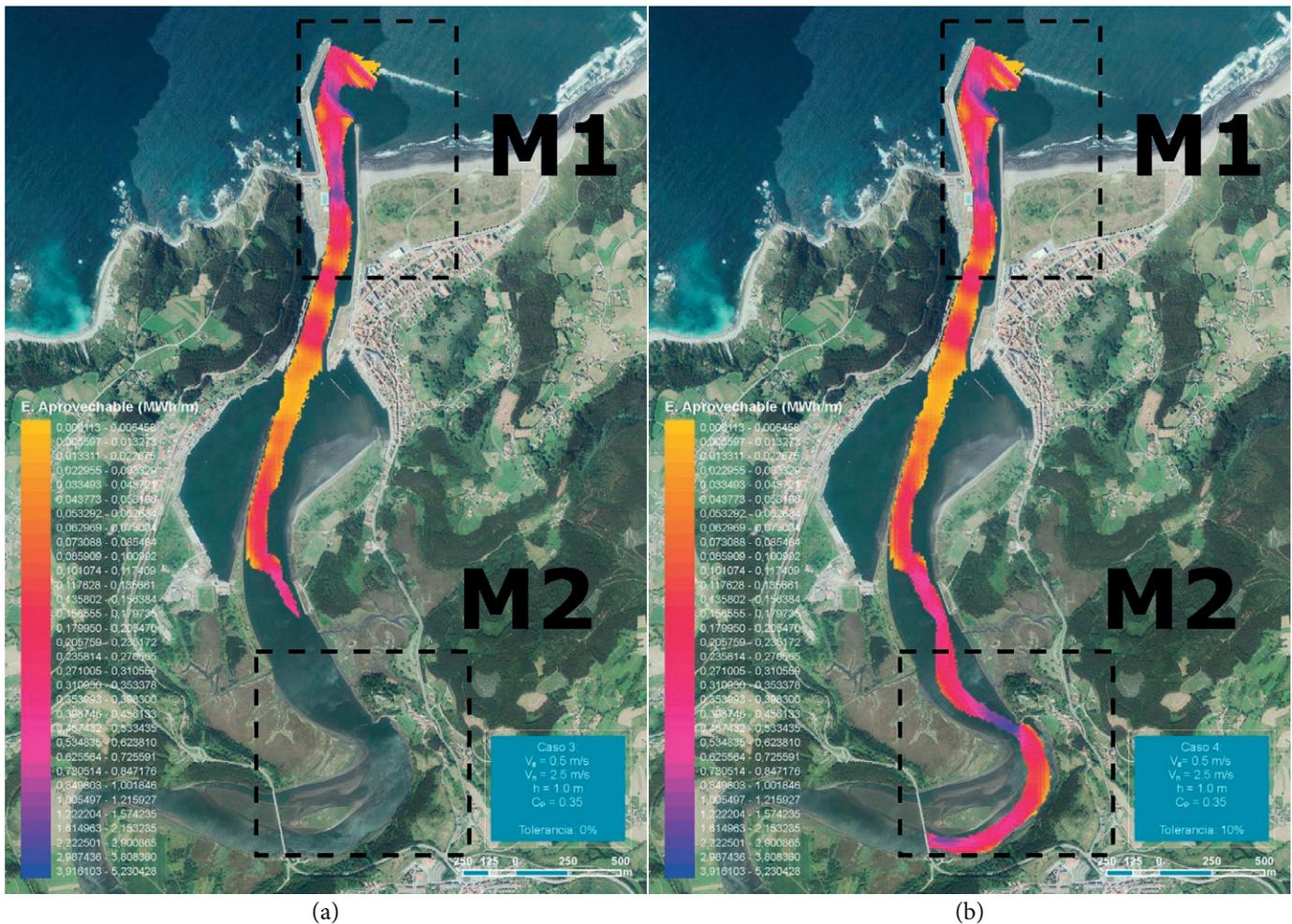


Figura 10 | Energía aprovechable correspondiente a las turbinas definidas en el Caso 3 (a) y Caso 4 (b).

A partir de los módulos de postproceso desarrollados y adicionalmente a valores de energía anual, también se pueden obtener otras informaciones necesarias para el dimensionamiento del aprovechamiento energético a partir de un determinado tipo de turbinas hidrocínéticas como por ejemplo las horas equivalentes de funcionamiento anual o la evolución temporal de la energía aprovechada en intervalos de días, meses o estaciones.

A modo de ejemplo, en la Figura 11 se muestran las horas equivalentes de funcionamiento anual de las turbinas de características según el Caso 4 en la zona M2, donde sería posible un aprovechamiento que no interrumpe el tráfico fluvial, obteniéndose valores máximos del entorno a las 2000 horas/año. Téngase en cuenta que la potencia nominal de estas turbinas por metro de ancho se calcula según: $P = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot H \cdot \rho \cdot V^3 = \frac{1}{2} \cdot 0.35 \cdot 1 \cdot 1000 \cdot 2.5^3 = 2734.37 \text{ W} = 2.73 \text{ kW/m}$.

Asimismo, en la Figura 12 se muestran dos días representativos de máximo y mínimo aprovechamiento energético utilizando una turbina de características definidas en el Caso 1.

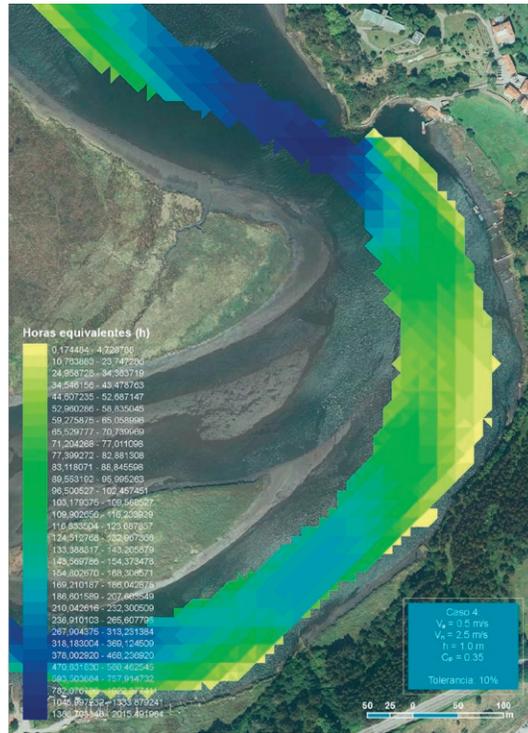


Figura 11 | Horas equivalentes en la zona M2 para el Caso 4.

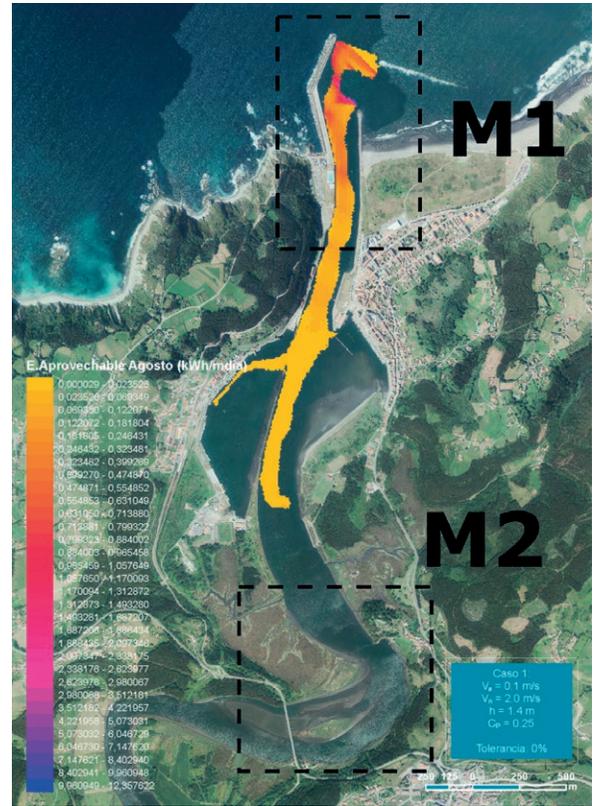
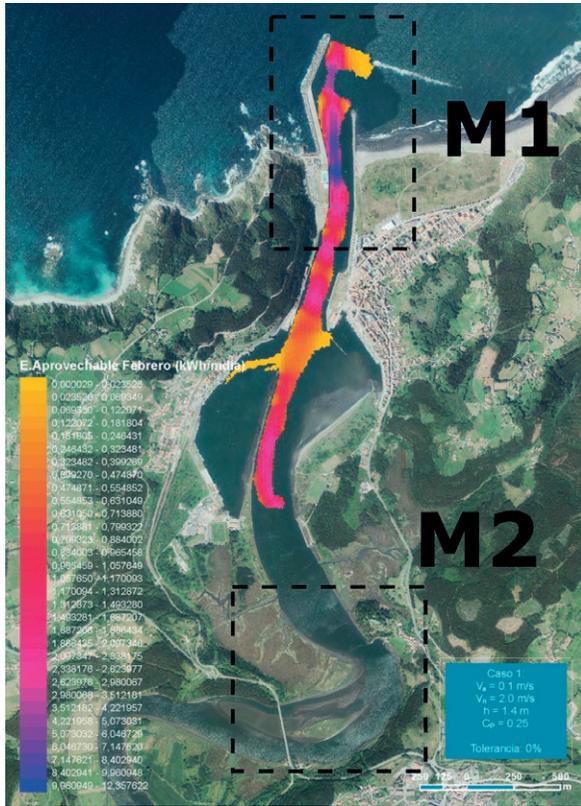


Figura 12 | Energía aprovechable correspondiente a un día tipo del Caso 1 para el mes de febrero (a) y el mes de agosto (b)

CONCLUSIONES

Se presenta el diseño una metodología que incluye un código, implementado mediante clases del lenguaje de programación Java, que permite realizar una primera aproximación de la energía hidrocínética disponible en un estuario, así como la energía que puede ser aprovechada mediante turbinas hidrocínéticas de eje vertical teniendo en cuenta sus características: altura de rotor, coeficiente de potencia, velocidades de arranque, nominal y máxima, así como el porcentaje de turbina al descubierto permitido en su funcionamiento. Dicho código automatiza la captura de datos obtenidos en programas de simulación hidrodinámica, los almacena y realiza cálculos energéticos para finalmente representarlos mediante una herramienta GIS.

A modo de ejemplo de utilización de la metodología y del código desarrollado se ha probado su integración con el software IBER en la desembocadura del río Nalón (Asturias) obteniendo mapas de energía hidrocínética disponible y aprovechable para turbinas con distintas características. Los resultados obtenidos permiten seleccionar zonas de aprovechamiento y seleccionar el tipo de turbina hidrocínética de eje vertical que mejor se adapta para su aprovechamiento energético.

REFERENCIAS

- Álvarez, E.A., Rico-Secades, M., Suárez, D.F., Gutiérrez-Trashorras, A.J., Fernández-Francos, J. 2016. Obtaining energy from tidal microturbines: A practical example in the Nalón River. *Applied Energy*, 183, 100-112. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.173>
- Álvarez, M., Puertas, J., Peña, E., Bermúdez, M. 2017. Two-dimensional dam-break flood analysis in data-scarce regions: The case study of Chipembe dam, Mozambique. *Water (Switzerland)*, 9(6), 432. <https://doi.org/10.3390/w9060432>
- Anta Álvarez, J., Bermúdez, M., Cea, L., Suárez, J., Ures, P., Puertas, J. 2015. Modelización de los impactos por DSU en el río Miño (Lugo). *Ingeniería Del Agua*, 19(2), 105-116. <https://doi.org/10.4995/ia.2015.3648>
- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., Dolz, J., Coll, A. 2014. Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Metodos Numericos Para Calculo y Diseno En Ingenieria*, 30(1), 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004>
- Blanco-Marigorta, E., Gharib-yosry, A. 2021. *Evaluación de una turbina hidrocínética de eje vertical para su uso en canales*. 96, 1-6.
- Copernicus Land Monitoring Service. 2018. *CORINE Land Cover*. Recuperado de <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover>
- Espina-Valdés, R., Fernández-Jiménez, A., Fernández Francos, J., Blanco Marigorta, E., Álvarez-Álvarez, E. 2020. Small cross-flow turbine: Design and testing in high blockage conditions. *Energy Conversion and Management*, 213(April). <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112863>
- Ferreras Moreno, M., Gutiérrez, A., Álvarez, E. 2014. Análisis del potencial de energía hidrocínética en la desembocadura de la ría de ribadesella. *Repositorio Institucional - Universidad de Oviedo*, 1–13. Recuperado de <http://hdl.handle.net/10651/32378>
- Goward Brown, A.J., Neill, S.P., Lewis, M.J. 2017. Tidal energy extraction in three-dimensional ocean models. *Renewable Energy*, 114, 244-257. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.04.032>
- Huckerby, J., Jeffrey, J., Sedgwick, J., Jay, B., Finlay, L., Ocean Energy System (OES). 2012. An International vision for Ocean Energy - Version II. *Ocean Energy Systems Implementing Agreement*. Recuperado de http://www.policyandinnovationedinburgh.org/uploads/3/1/4/1/31417803/oes_booklet_fa_print_08_10_2012.pdf
- IGN. 2020. *Instituto Geográfico Nacional*. Recuperado de <https://www.ign.es/web/ign/portal>
- Navionics. 2020. *ChartViewer*. Recuperado de <https://webapp.navionics.com/?lang=es#boating@6&key=cpvhGnpa%40>

- Neill, S.P., Angeloudis, A., Robins, P.E., Walkington, I., Ward, S.L., Masters, I., Lewis, M.J., Piano, M., Avdis, A., Piggott, M.D., Aggidis, G., Evans, P., Adcock, T.A.A., Židonis, A., Ahmadian, R., Falconer, R. 2018. Tidal range energy resource and optimization – Past perspectives and future challenges. *Renewable Energy*, 127, 763-778. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.05.007>
- Rourke, F.O., Boyle, F., Reynolds, A. 2010. Tidal energy update 2009. *Applied Energy*, 87(2), 398-409. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.08.014>
- Saini, G., Saini, R.P. 2019. A review on technology, configurations, and performance of cross-flow hydrokinetic turbines. *International Journal of Energy Research*, 43(13), 6639-6679. <https://doi.org/10.1002/er.4625>
- Sanz-Ramos, M., Bladé, E., Escolano, E. 2020. Optimización del cálculo de la Vía de Intenso Desagüe con criterios hidráulicos. *Ingeniería Del Agua*, 24(3), 203. <https://doi.org/10.4995/ia.2020.13364>
- Sørnes, K. 2010. *Small-scale Water Current Turbines for River Applications*. Recuperado de <https://www.zero.no>
- Sutherland, G., Foreman, M., Garrett, C. 2007. Tidal current energy assessment for Johnstone Strait, Vancouver Island. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 221(2), 147-157. <https://doi.org/10.1243/09576509JPE338>
- van Ruijven, B.J., De Cian, E., Sue Wing, I. 2019. Amplification of future energy demand growth due to climate change. *Nature Communications*, 10(1), 1-12. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-10399-3>
- Xu, X., Wei, Z., Ji, Q., Wang, C., Gao, G. 2019. Global renewable energy development: Influencing factors, trend predictions and countermeasures. *Resources Policy*, 63, 101470. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.101470>
- Yuce, M.I., Muratoglu, A. 2015. Hydrokinetic energy conversion systems: A technology status review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 72-82. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.037>