



INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)

C/ Cañadilla 6, local 68, C. Comercial Coronado, Las Rozas de Madrid 28231, Madrid

Pza. de la Montañeta 4, entresuelo, 03001 Alicante

Tfno.: 918961731; Fax: 918903410; e-mail: idyma@idyma.es

**ESTUDIO DE INUNDACIÓN EN LA PLAYA DE PALOMBINA, ENSENADA DE CELORIO,
EN EL T.M. DE LLANES, ASTURIAS**

**INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)**

C/ Cañadilla 6, local 68, C. Comercial Coronado, Las Rozas de Madrid 28231, Madrid

Pza. de la Montañeta 4, entresuelo, 03001 Alicante

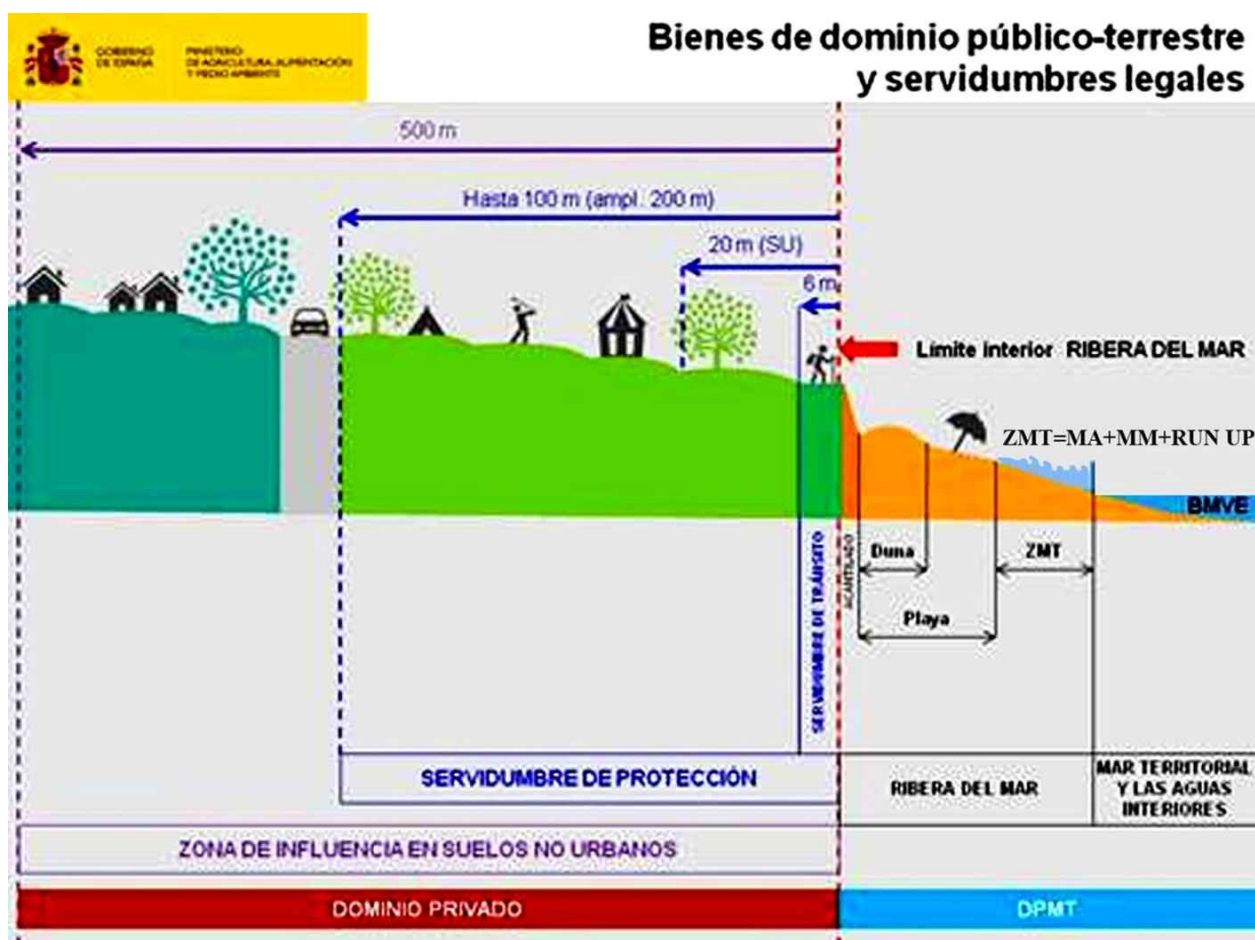
Tfno.: 918961731; Fax: 918903410; e-mail: idyma@idyma.es

INDICE

1.	INTRODUCCIÓN: ZONA DE ESTUDIO Y ASPECTOS GENERALES DE LA METODOLOGÍA APLICADA.....	Pag 1
2.	ANÁLISIS DE LOS DATOS DE LOS INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN PARA EL DISEÑO DEL TEMPORAL.....	Pag 6
	2.1. ANÁLISIS DE DATOS DEL OLEAJE.....	Pag 7
	2.2. ANÁLISIS DE DATOS DE LOS MAREÓGRAFOS.....	Pag 22
3.	PROPAGACIÓN DEL OLEAJE.....	Pag 27
	3.1. PRIMERA FASE: DESDE LA BOYA O PUNTO GEOGRÁFICO FUENTE DE DATOS DE MODELOS NUMÉRICOS, HASTA PROFUNDIDADES INDEFINIDAS, SEGÚN LOS SECTORES PRINCIPALES DE INCIDENCIA.....	Pag 27
	3.2. SEGUNDA FASE: DESDE PROFUNDIDADES INDEFINIDAS HASTA PIE DE COSTA.....	Pag 28
4.	CÁLCULOS DE RUN-UP Y COTAS DE MÁXIMA INUNDACIÓN Y ALCANCE DE OLEAJES...	Pag 114
	4.1 CÁLCULO DE RUN-UP Y CI CON MODELO DE INUNDACIÓN SOBRE PLAYA	Pag 117
	4.2 CÁLCULO DEL ASCENSO POR LA ESTRUCTURA VERTICAL DEL OLEAJE INCIDENTE SOBRE EL MURO DEL FONDO DE PLAYA	Pag 205
5.	PLANOS DE LOS RESULTADOS.....	Pag 213

1. INTRODUCCIÓN: ZONA DE ESTUDIO Y ASPECTOS GENERALES DE LA METODOLOGÍA APLICADA

En el presente estudio se obtendrá el límite interior de la zona marítimo terrestre (en adelante Z.M.T.) con los criterios establecidos en los artículos 4.1.a y 4.1.b del Reglamento General de Costas RD 876/2014, en un tramo de costa correspondiente con la Playa de Palombina en la enesenada de Celorio, en el T.M. de Llanes, Asturias.



En los siguientes planos a escala 1/15.000 y 1/5.000 se sitúa el tramo de costa objeto de estudio sobre la hoja MTN 25 del I.G.N. y sobre ortofoto PNOA respectivamente.

SISTEMA ETRS89, PROYECCIÓN U.T.M., HUSO 30
SITUACIÓN DEL TRAMO DE ESTUDIO SOBRE HOJA MTN 25 I.G.N.
PLANO A ESCALA 1/15.000





SISTEMA ETRS89, PROYECCIÓN U.T.M., HUSO 30
SITUACIÓN TRAMO DE ESTUDIO SOBRE ORTOFOTO PNOA MA
PLANO A ESCALA 1/5.000

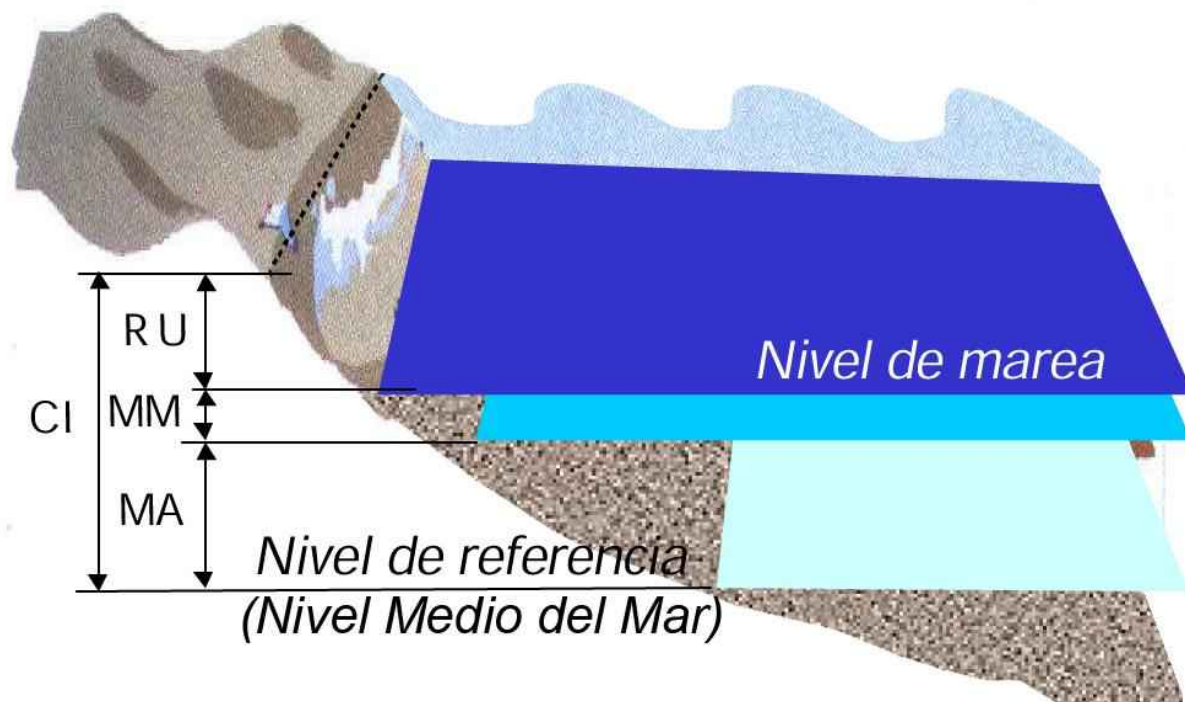


Con la anterior finalidad se abordará la obtención del límite interior de la máxima inundación en los episodios de temporales extraordinarios, sobre el citado tramo de costa, que se ha realizado sobre la base de un análisis histórico de los datos de oleajes y mareas de Puertos del Estado del período de estudio más amplio posible en función de la disponibilidad histórica de los datos sincronizables de mareas y oleajes, para la posterior selección del período de cinco años a partir del cual se determinará el quinto nivel del período seleccionado.

La determinación del nivel de alcance de oleajes en las distintas tipologías comunes de los frentes de costa, por acción de la dinámica marina y meteorológica, resulta un procedimiento complejo, tanto por el gran número de elementos que intervienen en el proceso de inundación, como por la interacción entre dichos elementos.

Sobre la base de los textos legales, Ley de Costas de 22/1988, de 28 de julio, modificada por la Ley 2/2013, de 29 de mayo, de protección y uso sostenible del litoral y de modificación de la Ley 22/1988, de 28 de julio, de Costas y del Reglamento General de Costas, y teniendo en cuenta aspectos metodológicos elaborados por el anterior Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente en colaboración con el G.I.O.C. (Universidad de Cantabria) para la estimación del oleaje a pie del frente costero, se ha confeccionado un procedimiento con el que se han realizado los estudios para la determinación de la cota de máxima inundación en la playa de Celorio, en el T.M. de Llanes, Asturias:

- Con carácter general, para el cálculo de cota de máxima inundación sobre el relieve costero ordinario, se considera que el frente de costa está caracterizado en un instante determinado por un nivel de marea (NM) compuesto por la marea astronómica y la marea meteorológica (MA+MM) y una batimetría. Sobre dicho nivel de marea se encuentra el oleaje que, en función de sus características y de la batimetría del frente del litoral, se propaga hacia la costa. Al alcanzar la costa, el oleaje rompe sobre la superficie morfológica del frente, produciéndose un movimiento de ascenso de la masa de agua a lo largo del perfil del elemento morfológico que encuentre en su avance tierra adentro por el perfil emergido que se denomina run-up (RU). Todos estos factores están relacionados entre sí, además de la interacción entre los elementos (oleaje-batimetría-nivel de marea-ascenso). El episodio de alcance de los oleajes y la determinación de dicho nivel en la superficie de las distintas variedades morfológicas de los frentes de costa, podría esquematizarse según el siguiente gráfico:

MA: Marea astronómica**MM:** Marea meteorológica**RU:** *Run-up***CI:** Cota de inundación

- La cota de máximo alcance o cota de inundación CI, se evaluará a partir de los datos procedentes de medidas reales proporcionados por los instrumentos de medición y fuentes de datos de Puertos del Estado, de los mareógrafos pertenecientes a la Red REDMAR, de las boyas de la Red REDEXT o de los datos de los Puntos Simar (en función de la posición relativa de la boya más cercana respecto del tramo de estudio). En el presente caso por la ubicación del tramo de costa en relación a la boya más cercana, se ha tomado como fuente de datos el punto Simar de mayor proximidad y posición para valorar los oleajes de mayor afectación según las direcciones de procedencia.



- Los datos de los mareógrafos proporcionarán los niveles de marea astronómica y marea meteorológica (residuo), y los datos de las boyas y puntos Simar proporcionarán los parámetros del suceso de oleaje a partir de los cuales se realizarán los cálculos para la estimación de la sobreelevación por oleaje debida al run-up.
- En cumplimiento de la legislación vigente, y en concreto de lo establecido en el Reglamento General de Costas (Real Decreto 876/2014), se deberá obtener el alcance del oleaje de un temporal, cuya magnitud haya sido alcanzada cinco veces en un período de cinco años, a cuyo efecto se realizará un análisis de las series históricas de datos reales de oleajes de las boyas de la Red REDEXT y de los Puntos Simar más próximos a la zona de estudio, a partir de los cuales se obtendrán los datos para determinar el temporal que cumpla con este precepto legal. Para la determinación del máximo alcance (cota máxima), se realizarán los cálculos y estimaciones del run-up con los parámetros de los mayores temporales, a los que se sumarán los niveles mareales reales registrados por los mareógrafos de la Red REDMAR, y con los niveles finales de los mayores temporales del período de cinco años, se podrá determinar el de aquél igualado o superado en cinco ocasiones.
- A efectos de cumplir con los anteriores criterios técnicos establecidos reglamentariamente, se deberán obtener los alcances de oleajes e inundaciones de los estados de mar de un período de cinco años establecido previamente a partir de los registros de la serie histórica disponible, que permitan la determinación del quinto nivel de inundación del período de cinco años establecido, a cuyo efecto se realizará un análisis de las series históricas de datos reales de oleajes de las boyas de la Red REDEXT y de los Puntos Simar más próximos a la zona de estudio, a partir de los cuales se obtendrán los datos para la selección previa de dichos estados de mar y del período de cinco años al que se circunscriben. Para la determinación del quinto máximo alcance (quinta cota máxima), se realizarán los cálculos y estimaciones del run-up con los parámetros de los mayores temporales, a los que se sumarán los niveles mareales reales registrados por los mareógrafos de la Red REDMAR, determinándose el nivel máximo del período de estudio de datos disponibles.



- A modo genérico, la propagación del oleaje medido por la boya o punto Simar hasta pie de frente de costa se realizará en una única fase: Una vez obtenido el régimen direccional en aguas profundas (boya REDEXT o Punto Simar), se realizarán las propagaciones considerándose las direcciones principales de procedencia del oleaje respecto a la batimetría de las zonas de estudio para obtener así la caracterización del oleaje a pie de costa (en el comienzo de la zona de rompientes), a partir de la selección de los datos proporcionados por Puertos del Estado (instrumentos de medición y Puntos Simar) de los estados de mar que por sus parámetros de oleaje, tendrán mayor incidencia en la zona de estudio. Dicha propagación se realizará con simuladores informáticos basados en modelos numéricos, con el módulo Oluca-SP del programa MOPLA, del paquete informático SMC 2.5 del I.H. de la Universidad de Cantabria, con los siguientes fundamentos y condiciones de ejecución.
 - ◇ el oleaje asociado a un estado de mar se define a partir de un espectro bidimensional, el cual se localiza en el contorno exterior del dominio (mar adentro), componiéndose dicho espectro de un espectro frecuencial y una función de dispersión de dirección.
 - ◇ Las ecuaciones utilizadas en este modelo numérico informático para modelar la propagación del oleaje, consideran los siguientes fenómenos:
 - Asomeramiento
 - Refracción por fondo
 - Difracción
 - Presencia de corrientes
 - Disipación de energía (capa límite laminar, capa límite turbulenta en fondo, fondo poroso y disipación por rotura)
 - Rotura
 - Dispersión por amplitud.



- ◊ Para la ejecución de este software de simulación computacional del oleaje en su propagación basado en modelos numéricos, se debe disponer de una batimetría de la zona de estudio en formato digital, con la máxima resolución fundamentalmente en profundidades reducidas y zona de rompientes.
- En el caso concreto del presente estudio del tramo de costa de la playa de Celorio del T.M. de Llanes, se tomarán los datos del Punto Simar 3108040, dada su idoneidad de posición en profundidades indefinidas para valorar el oleaje de la procedencia de mayor incidencia en esta playa, y la lejanía en este caso de las boyas de Puertos del estado. Asimismo, para la obtención de los datos de incrementos mareales, se han tomado los datos del mareógrafo 3108 de Gijón 2.
- Todos los trabajos han sido desarrollados sobre una base topobatimétrica-batimétrica de detalle, con un MDT de alta resolución obtenido a partir de un levantamiento fotogramétrico de alta densidad en la parte emergida obtenido a partir de vuelo DRON ejecutado en enero de 2024, así como a partir de una batimetría de detalle de equidistancia de isobatas de 0,25 m. realizada en marzo de 2024 m. con dispositivo USV (dron marino) con equipos topográficos de precisión (GPS de precisión centimétrica multiconstelación-multifrecuencia acoplado e ecosonda trifrecuencia a 675 Khz y 7º de apertura angular) en la zona de profundidades reducidas y playa emergida hasta la +10 NMMA (batimetría ejecutada en pleamar para solapamiento con franja fotogramétrica), ampliada en su caso con la batimetría del proveedor Navionics, Sonarchart (0,5 m. en profundidades reducidas e intermedias, 1-2 m. en intermedias e indefinidas) hasta la isobata -50, y finalmente ampliada hasta profundidades indefinidas con batimetría del proveedor Emodnet hasta la posición del Punto Simar 3108040, homogeneizados todos los datos altimétricos a la referencia del NMMA, a partir de la cual el software de modelado realiza sus ejecuciones informáticas de propagación de oleaje, y asimismo a partir de la cual se han obtenido los distintos parámetros de la morfología del frente de playa y zona de rompientes, necesarios para los cálculos posteriores a las propagaciones basados en formulaciones semiempíricas de run-up.



2. ANÁLISIS DE LOS DATOS DE LOS INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN PARA EL DISEÑO DEL TEMPORAL

Con el objetivo de cumplir con los preceptos legales establecidos en el Reglamento General de Costas (Real Decreto 876/2014), en relación a la definición del alcance de los mayores temporales conocidos en el tramo de estudio que comprende la playa de Palombina, en la ensenada de Celorio, en el T.M. de Llanes, Asturias, establecidos en su artículo 4 en cuanto a los criterios técnicos para la determinación de la zona marítimo-terrestre

“para fijar el límite hasta donde alcanzan las olas en los mayores temporales conocidos, se considerarán las variaciones del nivel del mar debidas a las mareas y el oleaje. Dicho límite será el alcanzado al menos en 5 ocasiones en un periodo de 5 años, salvo en aquellos casos excepcionales en que la mejor evidencia científica existente demuestre la necesidad de utilizar otro criterio. Para calcular el alcance de un temporal se utilizarán las máximas olas registradas con boyas o satélites o calculadas a través de datos oceanográficos o meteorológicos”

se han recopilado los datos históricos de la fuente de mayor proximidad a la zona de estudio, de niveles de marea astronómica y marea meteorológica (residuo), del mareógrafo 3108 de Gijón 2, así como de datos del Puntos Simar 3108040, para la obtención de los temporales que serán objeto de propagación y cálculo del nivel de inundación que cumplen con la condición reglamentaria del quinto máximo alcance.

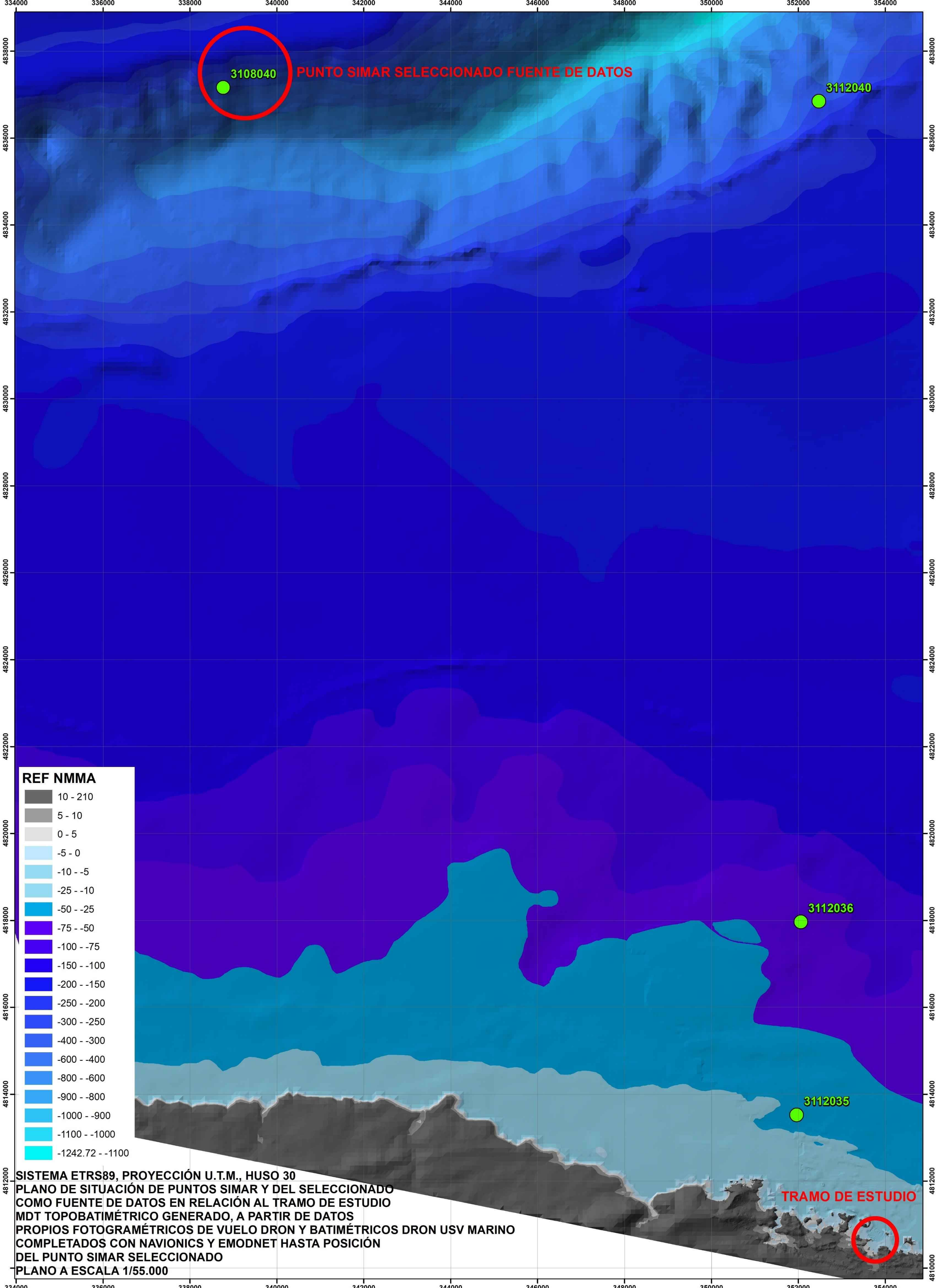


2.1. ANÁLISIS DE DATOS DEL OLEAJE Y CLIMA MARÍTIMO

Dadas las largas distancias de la Boyas más próximas de la red de Puertos del Estado a la zona de estudio y en consecuencia sus notables desviaciones tanto longitudinales como latitudinales, para la actualización de datos de los registros de oleajes y análisis de las series de estados horarios de la máxima amplitud temporal posible de los disponibles en función de los disponibles para esta zona de estudio que proporciona Puertos del Estado, se han tomado los datos del Punto Simar 3108040 situado a 30,6 km. aproximadamente de distancia del tramo, como fuente de los parámetros de los estados de mar que se estudiarán. Si bien este Punto Simar tiene una posición más alejada del tramo de estudio que los Puntos Simar 3112035 y 3112036 ambos en profundidades intermedias (lo que implica que sus datos pudieran estar afectados por el fondo), su posición en profundidades indefinidas de una parte y escorada hacia el NO respecto del tramo de estudio de otra, hacen que resulte más adecuada para valorar los estados de mar de procedencia del sector NO, en cuyo entorno se sitúan los temporales de mayor frecuencia y magnitud sobre el tramo de estudio, tal y como se deriva del análisis del clima marítimo.

Si bien la serie de datos horarios disponible de dicho punto Simar comprende un período histórico desde el año 1958, la serie histórica máxima disponible de datos de los estados horarios de mar vendrá determinada por los datos horarios de la máxima serie disponible según los registros del mareógrafo de Gijón 2 3108, que inició sus mediciones en el año 1995, por lo que desde entonces y sincronizando los datos de estados de mar del oleaje y de los niveles del mar, se ha dispuesto de un total de 253.397 registros horarios de oleajes y mareas sincronizados, para caracterizar el clima marítimo y los efectos de inundación en el tramo de costa objeto de estudio, durante el período histórico máximo posible de registros de entre los cuales se obtendrá el período de cinco años que se considerará para la determinación del quinto nivel de inundación, en cumplimiento de los criterios del Reglamento General de Costas.

En el siguiente plano a escala 1/55.000 se refleja la posición de los Puntos Simar en relación al tramo de estudio, y el Punto Simar seleccionado 3108040, sobre el MDT topobatimétrico generado a partir de datos fotogramétricos y batimétricos de alta densidad que comprenden la zona de estudio hasta la isobata -10, completados con batimetría de Navionics y Emodnet hasta profundidades indefinidas en la posición del Punto Simar 3108040.



3108040

PUNTO SIMAR SELECCIONADO FUENTE DE DATOS

3112040

3112036

3112035

TRAMO DE ESTUDIO



REF NMMA

- 10 - 210
- 5 - 10
- 0 - 5
- 5 - 0
- 10 - -5
- 25 - -10
- 50 - -25
- 75 - -50
- 100 - -75
- 150 - -100
- 200 - -150
- 250 - -200
- 300 - -250
- 400 - -300
- 600 - -400
- 800 - -600
- 900 - -800
- 1000 - -900
- 1100 - -1000
- 1242.72 - -1100

SISTEMA ETRS89, PROYECCIÓN U.T.M., HUSO 30
PLANO DE SITUACIÓN DE PUNTOS SIMAR Y DEL SELECCIONADO
COMO FUENTE DE DATOS EN RELACIÓN AL TRAMO DE ESTUDIO
MDT TOPOBATIMÉTRICO GENERADO, A PARTIR DE DATOS
PROPIOS FOTOGRAMÉTRICOS DE VUELO DRON Y BATIMÉTRICOS DRON USV MARINO
COMPLETADOS CON NAVIONICS Y EMODNET HASTA POSICIÓN
DEL PUNTO SIMAR SELECCIONADO
PLANO A ESCALA 1/55.000



Los datos de identificación del Puntos Simar son los siguientes:

PUNTO SIMAR 3108040	
Longitud	5.00° O
Latitud	43.67° N
Código modelo	3108040
Cadencia	60 min
Malla	AIB
Conjunto de datos	PUNTO SIMAR

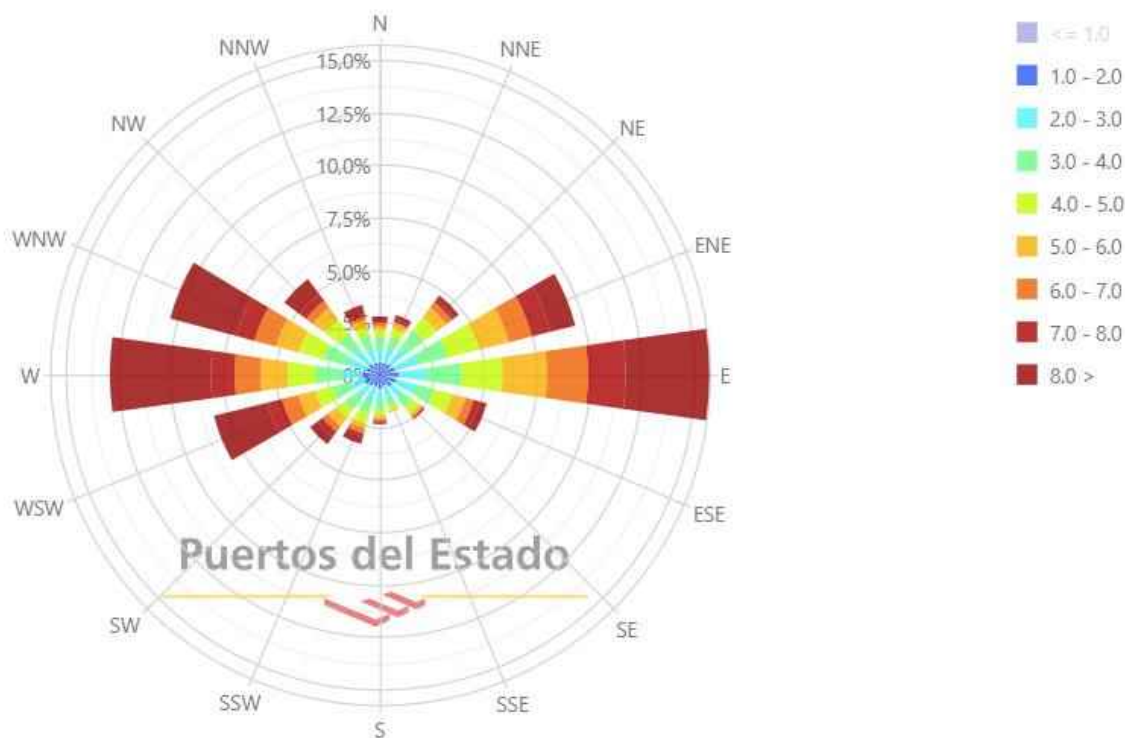
En función de la orientación de la Playa y de la batimetría, en la franja cercana y rompientes con una orientación hacia el sector NNE que en su avance hacia profundidades intermedias va adquiriendo orientación a N y en profundidades indefinidas hacia NNO, se ha realizado un primer análisis de las direcciones de procedencia del oleaje que incidirán en el punto de estudio, para en función de las mismas, proceder al análisis posterior de los datos de parámetros de temporales considerando los sectores direccionales con mayor incidencia en cuanto a su potencial de inundación.

Analizaremos a partir del Punto Simar 3108040 las principales direcciones del oleaje en esta zona de estudio, para establecer de las mismas, cuáles pueden tener incidencia en función de la orientación del tramo de costa teniendo en cuenta su orientación hacia N-NNE inicialmente y NNO-N en profundidades mayores y el fenómeno de refracción por el que los frentes de oleaje en su aproximación a la costa irán modificando su ángulo para irse adaptando a las batimétricas, habiéndose considerado todas aquéllas que durante la propagación desde profundidades indefinidas, pudieran por dicho fenómeno de la refracción tener incidencia en el tramo de costa, aunque en principio no se correspondan con las direcciones más aproximadas a la normal a la línea de costa. Dicho análisis se realizará sobre la serie de años desde el 1995 hasta la actualidad. En consecuencia, el sector direccional analizado comprende las direcciones de procedencia de mayor potencial que corresponden al entorno del sector direccional NO que en su aproximación a la costa irá virando la dirección de los frentes de onda para alinearse a la dirección principal N-NNE marcada por la morfología de las curvas batimétricas hasta la zona de rompientes, con la consecuente pérdida de energía que se traducirá en disminución de altura de ola que estimará el software de propagación MOPLA. Se considerará todo el período completo de datos disponibles, para el establecimiento del período de cinco años a partir del cual determinar el quinto nivel de inundación de dicho período seleccionado.

En primera instancia se realiza un primer análisis de las direcciones predominantes de viento y oleaje, para, dentro del sector predeterminado anteriormente, conocer cuáles serán las direcciones de procedencia principales en cuanto a frecuencia e intensidad de oleaje. En el siguiente gráfico se reflejan los regímenes de los vientos dominantes en la posición del punto Simar 3108040, durante el período temporal comprendido entre los años 1995 y 2024, recogiendo las frecuencias y las velocidades medias en m/seg. Las direcciones dominantes en frecuencia y velocidades medias, son las del entorno E y O, y con menor intensidad y frecuencia la dirección ONO, que sería la que tendría mayor incidencia en el oleaje predominante en el tramo de estudio.

Rosa de Velocidad Media (m/s) para Viento - Punto SIMAR 3108040

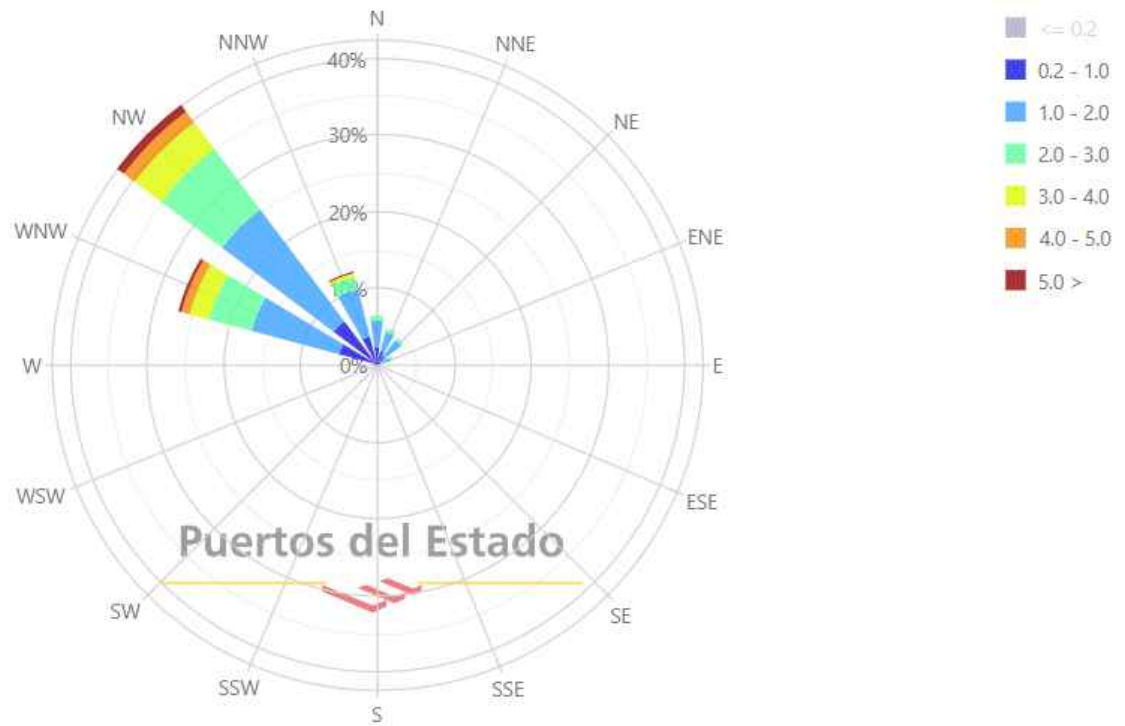
Periodo: 1995 - 2024 - Eficacia: 97.41%



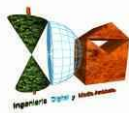
En el siguiente gráfico se reflejan los regímenes de oleaje dominantes en la posición del punto Simar 3108040, durante el período temporal comprendido entre los años 1995 y 2024, recogiendo las frecuencias y las alturas significantes del oleaje por componentes, destacando netamente los oleajes de procedencia en el entorno del sector NO sobre el resto de direcciones de procedencia, con magnitudes y frecuencias significativas también en la dirección ONO, la de mayor compatibilidad con el régimen de vientos en la posición del Punto Simar.

Rosa de Altura Significante (m) para Oleaje - Punto SIMAR 3108040

Periodo: 1995 - 2024 - Eficacia: 97.46%



Si bien en principio las direcciones de procedencia del sector NO no son las que tendrían por la disposición del tramo de costa y el ángulo que forma con la normal a la orientación principal promedio que lo caracteriza la mayor repercusión (N-NNE), ha de considerarse en todo el proceso de propagación desde profundidades indefinidas, dado que tal y como se ha especificado anteriormente, por el cambio de orientación en la refracción, el oleaje irá virando para adquirir orientaciones más francas respecto a la costa, en su aproximación a la franja de rompientes, resultando en este sentido, fundamental la realización de una simulación computacional de la propagación del oleaje con la topo-batimetría que caracteriza la zona, para considerar todos los fenómenos que junto con la refracción tendrán lugar sobre el oleaje (shoaling, disipaciones por fondo fricción y rotura, rotura del oleaje, etc....) y que son considerados por el software OLUCA espectral del MOPLA (SMC).



Por tanto, para tomar el sector direccional completo con mayor afectación al tramo de estudio, se considerarán, a la vista de las rosas de oleaje y por la orientación del tramo de costa de estudio, direcciones del entorno de NO, dado que son las de una dirección de procedencia que en principio no tendría la mayor incidencia teórica sobre el tramo por su orientación (que sería la de procedencias del sector N-NNE), pero dado que el oleaje del sector N-NE a la vista del análisis del clima marítimo es prácticamente inexistente y la predominancia del oleaje de procedencia del sector NO es muy marcada y dentro de la rosa de oleajes constituye la dirección de procedencia que tiene menor ángulo de incidencia respecto al tramo de estudio (la otra dirección significativa, la ONO, estaría más escorada respecto al tramo de estudio), se precisará de la propagación de estados de mar de dicha procedencia (NO) para poder evaluar realmente cuáles serán sus valores de oleaje propagados a pie de costa, por la pérdida de energía en la refracción por la que irán adoptando los frentes de oleaje direcciones de mayor paralelismo a la costa del tramo de estudio (normal al sector N-NNE), y por tanto estimar sus potenciales de inundación sobre el mismo.

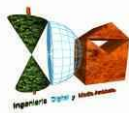
En consecuencia, se han analizado las series de datos del máximo período histórico disponible con datos horarios de estados de mar y niveles mareales, que se corresponde con el período comprendido entre 1995 y la actualidad, a partir de los datos del Punto Simar 3108040 con un total de 253.397 estados de mar analizados, del máximo período disponible con datos horarios sincronizables de oleajes y mareas, desde el año 1995 hasta la actualidad, de entre los cuales se han seleccionado aquéllos que por sus parámetros de oleaje podrían ser responsables de máximos alcances de niveles de mar en la zona específica de estudio, y tras realizar la propagación de los mismos, se fijará el período de cinco años que establece el período reglamentario y dentro del mismo se podrá determinar el quinto nivel de inundación, todo ello con las iteraciones previas con los modelos semiempíricos de run-up de Nielsen-Hanslow y Stockdon, mediante las cuales se ha valorado el potencial de inundación en la playa de Palombina en la ensenada de Celorio con dichos modelos que se han aplicado a cada estado de mar antes de la propagación, para la selección justificada de los estados de mar sincronizados con los niveles mareales horarios correspondientes que serán los responsables de los mayores niveles de alcances de inundación y oleajes.



En una primera fase, fue realizada la sincronización horaria de los 253.397 estados de mar horarios de oleaje, con sus respectivos niveles mareales, mediante la hora U.T.C. de ambos conjuntos de registros. Sobre la serie de estados de mar horarios históricos completa del Punto Simar desde 1995 a 2024, fue realizado posteriormente un análisis mediante iteraciones previas con los modelos semiempíricos de run-up de Nielsen-Hanslow y Stockdon, habiéndose valorado el potencial de inundación con dichos modelos que se han aplicado a cada estado de mar antes de la propagación.

Al objeto de asegurar los alcances de forma significativa sobre el tramo de estudio de orientación principal a la dirección normal N-NNE, de las direcciones de procedencia del sector direccional NO, también se realizaron comprobaciones previas con el simulador de propagación de oleaje Oluca-SP espectral, habiéndose constatado con el mismo los efectos del fenómeno de refracción y los cambios de las orientaciones de los frentes de oleaje desde profundidades indefinidas para irse alineando con isobatas de la batimetría de las orientaciones batimétricas principales del tramo de estudio, modificando el ángulo de procedencia original mayoritariamente del NO para incidir a pie de playa con una componente tendente a N en intermedias y NNE en rompientes y reducidas, y en consecuencia posibilitando su afectación sobre el tramo de estudio. En función de las anteriores comprobaciones, se ha realizado un filtrado en torno a los oleajes con incidencia en el tramo de estudio, dentro del rango de sector de procedencia de máxima incidencia, frecuencia y magnitud según la rosa de oleaje, a un sector de estudio de 290°-330°.

Una vez aplicados los modelos semiempíricos de run-up antes de propagación de Nielsen-Hanslow y Stockdon y seleccionado el sector direccional máximo con afectación sobre el tramo de costa (290°-330°), se ha dispuesto de una estimación previa de cota de inundación antes de propagación y realizada con una pendiente promediada para todo el tramo de $m=0.02$ (que sólo será considerada para la ordenación de los estados de mar), del potencial de inundación en una playa genérica de cada estado de mar determinado por una cota de inundación previa obtenida a partir de los parámetros del oleaje en profundidades indefinidas.



De esta forma, fueron realizados sobre los 253.397 registros de datos horarios (estados de mar sincronizados con sus correspondientes niveles mareales) una fase de tratamiento de las bases de datos con filtros de selección compuestos (teniendo en cuenta los parámetros direccionales y las combinaciones de las mayores magnitudes de estados de mar del resto de parámetros), y de valoración previa del potencial de inundación de cada estado de mar, con iteraciones previas de inundación para estimar las combinaciones paramétricas del oleaje (Hs-Tp-DIR) que tendrán mayores efectos de inundación en el tramo de estudio, realizadas con las formulaciones semiempíricas de Nielsen-Hanslow y Stockdon.

Las tablas adjuntas a continuación incluyen los 100 primeros estados de mar según distintos parámetros de caracterización del oleaje y su valoración previa con los modelos de Run-up de Stockdon et al (2006) y Nielsen y Hanslow (1991), ordenados en función de la estimación de la potencia de inundación antes de propagación del oleaje con base en el mareógrafo de para la zona de estudio mediante las cotas de inundación valoradas con los parámetros del oleaje en profundidades indefinidas, filtrados al entorno de la dirección de procedencia en el entorno del sector 290°-330°. Por tanto en dichas tablas se han recogido los estados de mar y sus niveles mareales sincronizados en el orden de los 100 primeros niveles de inundación (un margen de selección que permite asegurar que el estado de mar responsable de la quinta máxima inundación se encuentra en dicha selección) y alcance de oleajes absoluto, filtrados en primera instancia al máximo estado de mar diario y ordenados de mayor a menor por su potencia de inundación previa estimada antes de propagación, al objeto de seleccionar justificada y razonadamente cuáles serán los estados de mar que se propagarán hasta pie de playa porque puedan generar los mayores niveles de inundación en el tramo de estudio, para, a partir de los mismos, fijar el período de cinco años a considerar y poder de este modo determinar el quinto nivel del mismo, dentro del período de registros horarios analizado disponible completo con posibilidad de sincronización de datos horarios de oleajes y mareas de 1995 a 2024 antes de propagación.

Las primeras tablas corresponden a la ordenación de potencial de inundación según el modelo de inundación de Run-up Nielsen-Hanslow y la segunda a la de Stockdon. En dichas tablas se ha consignado los datos paramétricos del oleaje (punto Simar 3108040), el nivel mareal sincronizado, y distintos parámetros calculados con la teoría de onda lineal, y los citados modelos de run-up.



FECHA/HORA	Marea (m. NMMA)	dmd (^e sex.)	H0 (m.)	Tp (seg.)	L0 (m.)	lr	db (m.)	Ls (m.)	Orden modelo Nielsen-H
2014-03-03 17:00:00	2.49	303	10.25	17.99	504.79	0.1895	15.82	216.61	1º
2010-11-09 05:00:00	2.57	307	8.19	17.26	464.65	0.2034	12.94	188.68	2º
2014-02-02 05:00:00	2.68	312	6.60	18.21	517.21	0.2390	11.00	184.88	3º
2014-03-04 05:00:00	2.50	309	7.09	17.71	489.20	0.2243	11.57	183.92	4º
2016-02-09 04:00:00	2.62	310	6.25	18.18	515.51	0.2452	10.51	180.56	5º
2008-03-11 05:00:00	2.34	312	7.10	17.90	499.75	0.2265	11.63	186.41	6º
2018-01-17 16:00:00	1.67	323	7.48	19.51	593.69	0.2405	12.50	211.15	7º
2020-12-28 14:00:00	1.89	320	8.00	17.74	490.86	0.2115	12.81	193.29	8º
2023-11-02 06:00:00	2.29	311	6.68	17.74	490.86	0.2314	11.02	180.00	9º
2007-12-10 03:00:00	1.79	314	7.87	17.48	476.57	0.2101	12.57	188.63	10º
2007-03-20 04:00:00	2.72	330	6.45	15.49	374.24	0.2057	10.23	150.64	11º
2018-03-24 09:00:00	1.70	305	9.30	16.12	405.30	0.1782	14.06	182.33	12º
2008-03-10 18:00:00	2.24	307	7.56	15.89	393.82	0.1949	11.78	165.34	13º
2006-02-17 06:00:00	2.08	305	6.55	17.61	483.69	0.2320	10.81	177.03	14º
2022-02-21 19:00:00	1.65	330	5.23	21.46	718.30	0.3164	9.57	204.97	15º
2016-02-08 16:00:00	2.12	310	6.37	17.48	476.57	0.2335	10.54	173.52	16º
2020-02-11 17:00:00	2.30	325	4.59	19.51	593.69	0.3071	8.32	173.57	17º
2007-03-19 16:00:00	2.41	322	7.88	14.48	327.03	0.1739	11.82	149.91	18º
2019-01-23 04:00:00	2.55	315	5.85	16.12	405.30	0.2247	9.56	152.13	19º
2014-02-05 07:00:00	2.20	297	5.97	17.38	471.14	0.2399	9.97	167.94	20º
2007-12-09 16:00:00	1.66	310	8.35	16.47	423.09	0.1922	12.95	179.55	21º
2018-01-04 05:00:00	2.48	309	5.34	16.89	444.94	0.2465	8.99	155.21	22º
2017-02-28 05:00:00	2.56	306	6.00	15.50	374.72	0.2134	9.63	146.53	23º
2022-01-09 09:00:00	1.66	319	5.75	19.51	593.69	0.2744	10.04	190.07	24º
2018-01-03 17:00:00	2.26	309	5.49	17.15	458.75	0.2468	9.25	159.85	25º
2020-10-28 14:00:00	1.85	319	4.22	21.46	718.30	0.3523	8.01	187.88	26º
2009-01-26 04:00:00	2.07	302	6.36	16.54	426.69	0.2212	10.33	162.21	27º
2021-01-30 17:00:00	2.26	307	6.10	16.12	405.30	0.2201	9.89	154.67	28º
2015-01-21 04:00:00	2.45	309	4.47	17.80	494.18	0.2839	7.89	153.92	29º
2000-09-29 16:00:00	2.57	306	5.93	14.93	347.67	0.2067	9.42	139.37	30º
2014-02-01 17:00:00	2.43	300	6.16	15.15	357.99	0.2058	9.77	144.00	31º
2015-02-24 07:00:00	1.88	311	6.59	16.81	440.74	0.2208	10.70	167.76	32º
2024-02-24 16:00:00	1.95	320	5.70	17.74	490.86	0.2506	9.65	168.99	33º
2024-02-11 04:00:00	2.84	315	5.02	14.66	335.21	0.2206	8.15	127.67	34º
2018-02-15 16:00:00	1.79	308	4.94	19.51	593.69	0.2960	8.84	178.80	35º
2015-01-22 04:00:00	2.57	319	5.24	15.47	373.27	0.2279	8.60	138.58	36º
2019-12-09 12:00:00	1.26	328	6.21	19.51	593.69	0.2640	10.70	196.03	37º
2009-11-05 05:00:00	2.30	306	6.84	14.52	328.84	0.1872	10.51	142.43	38º
2009-11-08 07:00:00	1.79	310	7.48	15.76	387.40	0.1943	11.64	163.01	39º
2014-02-08 23:00:00	1.36	302	6.97	17.98	504.23	0.2296	11.47	186.05	40º
2018-02-16 04:00:00	2.06	311	5.12	17.74	490.86	0.2644	8.83	161.89	41º



FECHA/HORA	Marea (m. NMMA)	dmd (º sex.)	H0 (m.)	Tp (seg.)	L0 (m.)	Ir	db (m.)	Ls (m.)	Orden modelo Nielsen-H
2019-12-22 00:00:00	2.03	305	7.61	14.66	335.21	0.1792	11.53	150.18	42º
2014-01-06 19:00:00	1.87	301	4.94	18.88	555.97	0.2864	8.75	171.93	43º
2014-02-28 15:00:00	2.26	308	6.72	14.58	331.56	0.1897	10.37	142.17	44º
2011-02-16 02:00:00	2.02	304	4.89	18.08	509.85	0.2757	8.55	162.59	45º
2014-02-09 00:00:00	1.30	302	6.90	17.94	501.99	0.2303	11.36	184.81	46º
2015-10-27 15:00:00	2.77	304	3.88	16.35	416.95	0.2799	6.82	131.36	47º
2023-10-20 06:00:00	2.18	303	6.77	14.66	335.21	0.1900	10.46	143.54	48º
2020-12-29 03:00:00	2.01	327	6.11	16.12	405.30	0.2199	9.91	154.77	49º
2019-12-21 23:00:00	1.91	304	7.75	14.66	335.21	0.1776	11.70	151.24	50º
2008-12-15 05:00:00	2.36	319	5.33	15.61	380.06	0.2280	8.75	141.04	51º
1999-01-18 04:00:00	2.03	308	5.95	16.13	405.80	0.2230	9.69	153.27	52º
2018-03-31 03:00:00	2.53	301	5.42	14.66	335.21	0.2123	8.69	131.58	53º
2021-12-08 05:00:00	2.12	311	5.64	16.12	405.30	0.2289	9.27	149.95	54º
2014-01-02 04:00:00	2.68	297	4.68	15.09	355.16	0.2352	7.76	128.59	55º
2020-10-29 02:00:00	1.70	322	4.74	19.51	593.69	0.3022	8.55	175.84	56º
2022-11-24 03:00:00	2.41	315	3.95	17.74	490.86	0.3010	7.11	145.85	57º
2001-01-26 04:00:00	2.18	304	5.76	15.63	381.03	0.2196	9.34	145.66	58º
2021-03-11 15:00:00	1.74	314	4.61	19.51	593.69	0.3064	8.35	173.88	59º
1999-03-04 05:00:00	2.32	309	6.89	13.70	292.74	0.1760	10.37	132.99	60º
2009-01-24 04:00:00	1.64	296	9.32	14.04	307.45	0.1551	13.45	153.79	61º
2019-11-12 14:00:00	1.84	323	4.36	19.51	593.69	0.3151	7.97	170.00	62º
2024-02-10 16:00:00	2.56	302	5.17	14.66	335.21	0.2174	8.35	129.16	63º
2003-01-21 18:00:00	2.22	296	6.05	14.93	347.67	0.2047	9.58	140.47	64º
2020-02-10 16:00:00	2.30	317	4.97	16.12	405.30	0.2438	8.34	142.60	65º
2014-01-04 05:00:00	2.70	301	3.99	15.88	393.32	0.2681	6.91	128.29	66º
2012-03-09 04:00:00	2.18	318	4.20	18.05	508.16	0.2970	7.53	152.63	67º
2011-12-12 04:00:00	1.99	308	4.10	19.18	573.78	0.3194	7.53	162.49	68º
2008-12-14 17:00:00	2.27	313	5.28	15.65	382.01	0.2297	8.69	140.95	69º
2016-02-13 19:00:00	2.24	311	5.57	15.35	367.50	0.2193	9.02	140.63	70º
2014-01-07 08:00:00	2.00	301	4.54	18.12	512.11	0.2868	8.04	158.22	71º
1999-10-23 14:00:00	2.55	294	4.72	15.15	357.99	0.2351	7.83	129.64	72º
2014-01-28 01:00:00	1.84	309	6.32	15.98	398.29	0.2143	10.16	155.19	73º
2016-02-10 04:00:00	2.68	298	5.53	13.35	277.98	0.1914	8.56	118.33	74º
2006-02-16 18:00:00	1.84	303	6.03	16.25	411.86	0.2231	9.83	155.47	75º
2017-10-21 16:00:00	2.10	300	5.39	16.02	400.29	0.2327	8.91	146.17	76º
2002-11-22 05:00:00	2.16	298	5.85	15.15	357.99	0.2112	9.36	141.11	77º
2023-11-10 02:00:00	1.69	318	5.39	17.74	490.86	0.2577	9.21	165.26	78º
2010-11-10 05:00:00	2.12	313	5.91	15.15	357.99	0.2101	9.44	141.68	79º
2014-12-11 06:00:00	1.64	317	4.93	18.75	548.34	0.2848	8.71	170.38	80º
2019-11-03 07:00:00	1.79	317	7.50	14.66	335.21	0.1805	11.39	149.34	81º
2012-12-17 06:00:00	2.35	301	4.59	16.06	402.29	0.2528	7.80	137.53	82º
2018-11-09 04:00:00	2.30	310	3.87	17.74	490.86	0.3041	6.99	144.65	83º

**INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)**

C/ Cañadilla 6, local 68, C. Comercial Coronado, Las Rozas de Madrid 28231, Madrid

Pza. de la Montañeta 4, entresuelo, 03001 Alicante

Tfno.: 918961731; Fax: 918903410; e-mail: idyma@idyma.es

FECHA/HORA	Marea (m. NMMA)	dmd (º sex.)	H0 (m.)	Tp (seg.)	L0 (m.)	Ir	db (m.)	Ls (m.)	Orden modelo Nielsen-H
2018-01-01 15:00:00	2.24	297	6.48	13.88	300.49	0.1839	9.90	131.98	84º
2024-02-25 04:00:00	2.30	318	4.65	16.12	405.30	0.2521	7.89	138.87	85º
2006-01-01 04:00:00	2.29	310	5.68	14.62	333.38	0.2069	9.02	133.58	86º
2020-02-12 05:00:00	2.50	326	4.12	16.12	405.30	0.2678	7.13	132.30	87º
2017-02-02 20:00:00	1.83	294	4.95	17.72	489.75	0.2686	8.58	159.50	88º
2012-04-18 14:00:00	1.79	308	6.46	15.66	382.50	0.2078	10.28	152.74	89º
2014-03-01 03:00:00	2.65	312	4.71	14.25	316.72	0.2214	7.66	120.29	90º
2019-11-14 17:00:00	2.21	319	4.81	16.12	405.30	0.2478	8.12	140.75	91º
2024-02-23 15:00:00	1.93	312	5.59	16.12	405.30	0.2299	9.20	149.42	92º
2016-04-10 18:00:00	2.50	307	3.67	16.89	444.94	0.2973	6.58	133.53	93º
2018-01-18 16:00:00	1.74	316	5.10	17.74	490.86	0.2649	8.80	161.64	94º
2009-12-03 03:00:00	2.32	303	4.93	15.37	368.46	0.2334	8.16	134.21	95º
2012-12-16 05:00:00	2.53	299	4.06	15.86	392.33	0.2654	7.01	128.99	96º
2007-02-23 07:00:00	1.99	295	4.27	18.10	510.98	0.2954	7.64	154.16	97º
2023-01-09 05:00:00	2.07	311	5.15	16.12	405.30	0.2395	8.59	144.63	98º
2020-12-04 05:00:00	2.21	316	5.76	14.66	335.21	0.2060	9.14	134.77	99º
2022-02-24 22:00:00	1.19	327	4.48	21.47	718.97	0.3420	8.42	192.60	100º

FECHA/HORA	Marea (m. NMMA)	dmd (º sex.)	H0 (m.)	Tp (seg.)	L0 (m.)	Ir	db (m.)	Ls (m.)	Orden modelo Stockdon
TEMP_2014_03_03_17	2.49	303	10.25	17.99	504.79	0.1895	15.82	216.61	1º
TEMP_2010_11_09_05	2.57	307	8.19	17.26	464.65	0.2034	12.94	188.68	2º
TEMP_2014_02_02_05	2.68	312	6.60	18.21	517.21	0.2390	11.00	184.88	3º
TEMP_2016_02_09_04	2.62	310	6.25	18.18	515.51	0.2452	10.51	180.56	4º
TEMP_2014_03_04_05	2.50	309	7.09	17.71	489.20	0.2243	11.57	183.92	5º
TEMP_2008_03_11_06	2.38	312	6.96	17.88	498.63	0.2285	11.43	184.70	6º
TEMP_2007_03_20_04	2.72	330	6.45	15.49	374.24	0.2057	10.23	150.64	7º
TEMP_2023_11_02_06	2.29	311	6.68	17.74	490.86	0.2314	11.02	180.00	8º
TEMP_2019_01_23_04	2.55	315	5.85	16.12	405.30	0.2247	9.56	152.13	9º
TEMP_2020_12_28_14	1.89	320	8.00	17.74	490.86	0.2115	12.81	193.29	10º
TEMP_2018_01_17_16	1.67	323	7.48	19.51	593.69	0.2405	12.50	211.15	11º
TEMP_2008_03_10_18	2.24	307	7.56	15.89	393.82	0.1949	11.78	165.34	12º
TEMP_2007_03_19_16	2.41	322	7.88	14.48	327.03	0.1739	11.82	149.91	13º
TEMP_2017_02_28_05	2.56	306	6.00	15.50	374.72	0.2134	9.63	146.53	14º
TEMP_2018_01_04_05	2.48	309	5.34	16.89	444.94	0.2465	8.99	155.21	15º
TEMP_2024_02_11_04	2.84	315	5.02	14.66	335.21	0.2206	8.15	127.67	16º
TEMP_2020_02_11_17	2.30	325	4.59	19.51	593.69	0.3071	8.32	173.57	17º
TEMP_2006_02_17_06	2.08	305	6.55	17.61	483.69	0.2320	10.81	177.03	18º
TEMP_2016_02_08_16	2.12	310	6.37	17.48	476.57	0.2335	10.54	173.52	19º
TEMP_2000_09_29_16	2.57	306	5.93	14.93	347.67	0.2067	9.42	139.37	20º



FECHA/HORA	Marea (m. NMMA)	dmd (º sex.)	H0 (m.)	Tp (seg.)	L0 (m.)	Ir	db (m.)	Ls (m.)	Orden modelo Stockdon
TEMP_2014_02_05_07	2.20	297	5.97	17.38	471.14	0.2399	9.97	167.94	21º
TEMP_2007_12_10_03	1.79	314	7.87	17.48	476.57	0.2101	12.57	188.63	22º
TEMP_2015_10_27_15	2.77	304	3.88	16.35	416.95	0.2799	6.82	131.36	23º
TEMP_2015_01_21_04	2.45	309	4.47	17.80	494.18	0.2839	7.89	153.92	24º
TEMP_2015_01_22_04	2.57	319	5.24	15.47	373.27	0.2279	8.60	138.58	25º
TEMP_2014_02_01_17	2.43	300	6.16	15.15	357.99	0.2058	9.77	144.00	26º
TEMP_2018_01_03_16	2.29	308	5.49	16.96	448.64	0.2441	9.22	157.72	27º
TEMP_2014_01_02_04	2.68	297	4.68	15.09	355.16	0.2352	7.76	128.59	28º
TEMP_2021_01_30_17	2.26	307	6.10	16.12	405.30	0.2201	9.89	154.67	29º
TEMP_2018_03_24_09	1.70	305	9.30	16.12	405.30	0.1782	14.06	182.33	30º
TEMP_2014_01_04_05	2.70	301	3.99	15.88	393.32	0.2681	6.91	128.29	31º
TEMP_2018_03_31_03	2.53	301	5.42	14.66	335.21	0.2123	8.69	131.58	32º
TEMP_2009_11_05_05	2.30	306	6.84	14.52	328.84	0.1872	10.51	142.43	33º
TEMP_2022_02_21_19	1.65	330	5.23	21.46	718.30	0.3164	9.57	204.97	34º
TEMP_2016_02_10_04	2.68	298	5.53	13.35	277.98	0.1914	8.56	118.33	35º
TEMP_2009_01_26_04	2.07	302	6.36	16.54	426.69	0.2212	10.33	162.21	36º
TEMP_2024_02_10_16	2.56	302	5.17	14.66	335.21	0.2174	8.35	129.16	37º
TEMP_2023_10_27_14	2.75	302	4.06	14.66	335.21	0.2453	6.83	117.36	38º
TEMP_1999_10_23_14	2.55	294	4.72	15.15	357.99	0.2351	7.83	129.64	39º
TEMP_2008_12_15_05	2.36	319	5.33	15.61	380.06	0.2280	8.75	141.04	40º
TEMP_2014_02_28_15	2.26	308	6.72	14.58	331.56	0.1897	10.37	142.17	41º
TEMP_2022_11_24_03	2.41	315	3.95	17.74	490.86	0.3010	7.11	145.85	42º
TEMP_2014_03_01_03	2.65	312	4.71	14.25	316.72	0.2214	7.66	120.29	43º
TEMP_2007_12_09_16	1.66	310	8.35	16.47	423.09	0.1922	12.95	179.55	44º
TEMP_2008_12_14_04	2.59	302	5.41	13.60	288.49	0.1972	8.46	120.02	45º
TEMP_2024_02_24_03	2.16	315	5.84	16.12	405.30	0.2249	9.54	152.03	46º
TEMP_2020_10_28_14	1.85	319	4.22	21.46	718.30	0.3523	8.01	187.88	47º
TEMP_1999_03_04_05	2.32	309	6.89	13.70	292.74	0.1760	10.37	132.99	48º
TEMP_2023_10_20_06	2.18	303	6.77	14.66	335.21	0.1900	10.46	143.54	49º
TEMP_2018_02_16_04	2.06	311	5.12	17.74	490.86	0.2644	8.83	161.89	50º
TEMP_2020_02_12_05	2.50	326	4.12	16.12	405.30	0.2678	7.13	132.30	51º
TEMP_2012_12_16_05	2.53	299	4.06	15.86	392.33	0.2654	7.01	128.99	52º
TEMP_2022_01_09_09	1.66	319	5.75	19.51	593.69	0.2744	10.04	190.07	53º
TEMP_2015_02_24_07	1.88	311	6.59	16.81	440.74	0.2208	10.70	167.76	54º
TEMP_2020_02_10_16	2.30	317	4.97	16.12	405.30	0.2438	8.34	142.60	55º
TEMP_2016_04_10_18	2.50	307	3.67	16.89	444.94	0.2973	6.58	133.53	56º
TEMP_2019_12_22_00	2.03	305	7.61	14.66	335.21	0.1792	11.53	150.18	57º
TEMP_2021_12_08_06	2.36	310	5.55	14.66	335.21	0.2098	8.86	132.82	58º
TEMP_2001_01_26_04	2.18	304	5.76	15.63	381.03	0.2196	9.34	145.66	59º
TEMP_2023_10_28_15	2.91	308	2.90	14.66	335.21	0.2903	5.16	102.55	60º
TEMP_2004_05_05_16	2.57	318	5.48	13.16	270.12	0.1896	8.46	115.87	61º
TEMP_2003_01_21_18	2.22	296	6.05	14.93	347.67	0.2047	9.58	140.47	62º



FECHA/HORA	Marea (m. NMMA)	dmd (º sex.)	H0 (m.)	Tp (seg.)	L0 (m.)	Ir	db (m.)	Ls (m.)	Orden modelo Stockdon
TEMP_2012_12_17_06	2.35	301	4.59	16.06	402.29	0.2528	7.80	137.53	63º
TEMP_2016_02_13_19	2.24	311	5.57	15.35	367.50	0.2193	9.02	140.63	64º
TEMP_2011_02_16_02	2.02	304	4.89	18.08	509.85	0.2757	8.55	162.59	65º
TEMP_2012_03_09_04	2.18	318	4.20	18.05	508.16	0.2970	7.53	152.63	66º
TEMP_2018_11_09_04	2.30	310	3.87	17.74	490.86	0.3041	6.99	144.65	67º
TEMP_2020_12_29_03	2.01	327	6.11	16.12	405.30	0.2199	9.91	154.77	68º
TEMP_2018_02_15_16	1.79	308	4.94	19.51	593.69	0.2960	8.84	178.80	69º
TEMP_2024_02_25_04	2.30	318	4.65	16.12	405.30	0.2521	7.89	138.87	70º
TEMP_1996_01_22_04	2.91	309	3.30	13.33	277.14	0.2474	5.57	96.37	71º
TEMP_1999_01_18_04	2.03	308	5.95	16.13	405.80	0.2230	9.69	153.27	72º
TEMP_2014_01_06_19	1.87	301	4.94	18.88	555.97	0.2864	8.75	171.93	73º
TEMP_2006_01_01_04	2.29	310	5.68	14.62	333.38	0.2069	9.02	133.58	74º
TEMP_2013_11_04_16	2.49	301	5.76	13.06	266.03	0.1835	8.79	117.03	75º
TEMP_2009_12_03_03	2.32	303	4.93	15.37	368.46	0.2334	8.16	134.21	76º
TEMP_2009_11_08_07	1.79	310	7.48	15.76	387.40	0.1943	11.64	163.01	77º
TEMP_2014_01_03_17	2.38	301	4.52	15.52	375.69	0.2462	7.61	131.18	78º
TEMP_2018_01_01_15	2.24	297	6.48	13.88	300.49	0.1839	9.90	131.98	79º
TEMP_2016_12_16_05	2.53	297	3.07	17.34	468.97	0.3337	5.72	128.17	80º
TEMP_2002_11_22_04	2.20	298	5.79	14.93	347.67	0.2092	9.23	138.07	81º
TEMP_2019_12_21_23	1.91	304	7.75	14.66	335.21	0.1776	11.70	151.24	82º
TEMP_2024_03_10_04	2.71	294	3.41	14.66	335.21	0.2677	5.90	109.45	83º
TEMP_2001_04_08_03	2.41	307	5.81	13.33	277.14	0.1865	8.92	120.40	84º
TEMP_2001_04_07_15	2.39	305	6.10	13.16	270.12	0.1797	9.25	120.77	85º
TEMP_2003_01_20_05	2.37	298	4.67	15.15	357.99	0.2364	7.76	129.09	86º
TEMP_2019_11_12_15	2.13	324	4.31	17.74	490.86	0.2881	7.65	151.07	87º
TEMP_1998_09_07_16	2.65	297	4.16	13.70	292.74	0.2265	6.81	109.21	88º
TEMP_2020_03_13_06	2.38	322	3.34	17.74	490.86	0.3273	6.18	136.28	89º
TEMP_2010_02_28_03	2.75	287	7.05	9.88	152.25	0.1255	9.48	89.00	90º
TEMP_2023_03_10_05	2.27	309	4.55	16.12	405.30	0.2548	7.75	137.66	91º
TEMP_2017_10_21_16	2.10	300	5.39	16.02	400.29	0.2327	8.91	146.17	92º
TEMP_2019_11_14_17	2.21	319	4.81	16.12	405.30	0.2478	8.12	140.75	93º
TEMP_2021_01_31_05	2.45	307	4.53	14.66	335.21	0.2323	7.48	122.58	94º
TEMP_2010_11_10_05	2.12	313	5.91	15.15	357.99	0.2101	9.44	141.68	95º
TEMP_2014_01_29_02	2.31	304	5.33	14.50	327.93	0.2118	8.54	128.99	96º
TEMP_2019_12_13_04	2.30	305	6.40	13.32	276.73	0.1775	9.66	124.87	97º
TEMP_2022_11_25_04	2.43	308	3.80	16.12	405.30	0.2788	6.67	128.08	98º
TEMP_2011_12_12_04	1.99	308	4.10	19.18	573.78	0.3194	7.53	162.49	99º
TEMP_2020_12_04_05	2.21	316	5.76	14.66	335.21	0.2060	9.14	134.77	100º



A la vista de los resultados anteriores, los modelos de los autores de Nielsen-Hanslow y Stockdon coinciden en la determinación de los máximos registros de estados de mar presuntos responsables (antes de propagación) de los máximos niveles de inundación, correspondiéndose todos ellos con el entorno del sector de oleajes de procedencia de NO, resultando íntegramente coincidentes en los 5 primeros estados de mar (cambiando el orden del 3 al 5), por lo que se puede considerar que ambos modelos coinciden sustancialmente en el orden del potencial de máxima inundación de los estados de mar analizados desde 1995 a la actualidad.

En función del análisis anterior sobre todos los estados de mar horarios desde 1995 a 2024, se ha determinado el período de cinco años de estudio, como el comprendido entre los años 2014 y 2018. No obstante, además de los cinco primeros estados de mar en potencia de inundación previa antes de propagación estimados mediante iteraciones con modelos de inundación de dos autores distintos comprendidos en un período temporal de 2014 a 2018, se realizarán las propagaciones de dos estados de mar adicionales fuera de dicho período de cinco años, de los años 2023 y 2024 al objeto de valorar con el máximo rigor si el período temporal de cinco años podría quedar desplazado hacia años posteriores, de forma que al calcular los valores definitivos de CI a partir de datos ya propagados y con los cálculos detallados de inundación sobre la playa, se comprobará si los dos temporales de 2023 y 2024 interfieren sobre el quinto nivel de inundación final.

De esta forma los estados de mar de seleccionados por la incidencia del potencial de inundación sobre el tramo de costa en el período de estudio de estados de mar horarios desde el año 1995 a la actualidad, considerando las iteraciones previas a la propagación realizadas, tomados como los posibles causantes de los mayores alcances de inundación del sector de procedencia del oleaje sector NO con incidencia en el tramo de estudio comprendidos en el período de cinco años seleccionado entre 2014 y 2018 a los que se ha añadido a modo de comprobación dos estados de mar de los años 2023 y 2024, y filtrados al máximo estado de mar diario (un estado de mar por día), que serán objeto de propagación del oleaje, serán los siguientes:

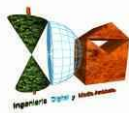


ESTADOS DE MAR SELECCIONADOS POR SU POTENCIAL DE INUNDACIÓN ESTIMADO ANTES DE PROPAGACIÓN EN EL TRAMO DE COSTA OBJETO DE ESTUDIO, GENERADORES DE LOS MÁXIMOS NIVELES ALCANZADOS EN EL PERÍODO DE ESTUDIO EN EL PERÍODO 2014-2018, COMPROBADO ADICIONALMENTE CON DOS ESTADOS DE MAR DE 2023 Y 2024

FUENTE DATOS PTOS SIMAR	FECHA/HORA	Hm0 (m.)	Tp (seg.)	DirM (°sex.)
3108040	2014-03-03 17:00:00	10.25	17.99	303
3108040	2014-02-02 05:00:00	6.6	18.21	312
3108040	2014-03-04 05:00:00	7.09	17.71	309
3108040	2016-02-09 04:00:00	6.25	18.18	310
3108040	2018-01-17 16:00:00	7.48	19.51	323
3108040	2023-10-28 15:00:00	2.9	14.66	308
3108040	2024-02-11 04:00:00	5.02	14.66	315

Una vez realizadas las propagaciones del oleaje, se ejecutarán los modelos de inundación a partir de los resultados del oleaje propagados a pie de costa antes de rotura sobre el MDT topo-batimétrico desde los perfiles/transectos de ejecución de los modelos de inundación con los que se caracterizará la morfología de las playas del tramo de estudio, con un multi-perfilado del terreno de alta densidad, determinándose cuál será el quinto nivel de inundación por perfil y en consecuencia la línea de inundación que cumplirá con los criterios del R.G.C. vigente.

Por ello se realizará la propagación de los 7 estados de mar seleccionados, los cinco del período 2014-2019 y dos adicionales para confirmar el período de estudio en función de los valores de las CI finales, para conocerse los valores del oleaje a pie de playa para cada uno de los estados de mar seleccionados, antes del inicio del fenómeno de rotura, y de esta forma aplicarse los modelos de inundación por perfil con dichos valores del oleaje reales que causarán los niveles de inundación sobre las playas objeto de estudio.



2.2. ANÁLISIS DE DATOS DE LOS MAREÓGRAFOS

Para considerar la superposición completa de factores que pueden llegar a incidir en el nivel del mar en los episodios de los temporales considerados, se deberán sumar los incrementos debidos al remonte del oleaje (run-up) con los debidos a los efectos mareales, para la obtención de los máximos niveles alcanzados, habiéndose tomado a tal efecto los registros reales del mareógrafo 3108 de Gijón 2, situado en pantalán dársenas interiores, lado opuesto del Muelle Rendiello, de la Red REDMAR, que considera tanto los componentes astronómicos, como los meteorológicos o residuales en sus mediciones.

Además de los niveles mareales con su componente astronómico y su componente residual o meteorológico, también los mareógrafos determinan el nivel medio del mar (NMM), que fija el plano altimétrico de comparación ($z=0$) de referencia para la cota de máxima inundación que se calcule finalmente, habiendo sido así mismo referenciado a dicho plano, la cartografía y batimetría, a partir de las cuales se han realizado los cálculos y estimaciones, al objeto de elaborarse y proyectarse todos los resultados en una base altimétrica coherente y homogénea.

El origen de altitudes que el Instituto Geográfico Nacional utiliza en la provincia de Asturias corresponde al Nivel Medio del Mar en Alicante (NMMA). Este organismo realizó la nivelación de todos los mareógrafos en el momento de su instalación. El IGN durante 1.998 llevó a cabo una compensación general de toda la red de nivelación nacional (Proyecto RNAP98), obteniendo para todas y cada una de las señales una nueva altitud homogénea con el resto de la red, y en 1999 proporcionó estas nuevas cotas. Así mismo el IGN efectuó nuevos recálculos del NMM en el año 2.008.

De este modo, se han podido relacionar todos los datos de los niveles mareales de los registros de los mareógrafos analizados y en origen referidos al cero del Puerto así como los datos batimétricos de Navionics y Emodnet utilizados complementariamente para completar hasta profundidades indefinidas los datos batimétricos de alta resolución y precisión tomados en la ensenada de Celorio con dron marino USV, con el plano $z=0$ correspondiente a la Red Geodésica ETRS89, para la vinculación y referenciación altimétrica con la base cartográfica, así como con los datos de alturas de oleaje, referidos igualmente a los niveles medios del mar.



Por tanto, para el caso del presente estudio y de los resultados que se aportan de cotas de alcance de cota de máxima inundación marina en el tramo de costa de la ensenada de Celorio del término municipal de Llanes, Asturias, según lo establecido en el nuevo Reglamento General de Costas RD 876/2014, la referencia altimétrica será el nivel medio del mar en Alicante (NMMA), obtenido con mareógrafos y enlazado en procesos de nivelación y recálculos posteriores por el I.G.N. con los mareógrafos de la red REDMAR, los últimos de los cuales han sido llevados a cabo en el año 2.008, para la obtención del valor $z=0$ que establece la coordenada z ortométrica de su red geodésica ETRS89.

Información del mareógrafo 3108 de Gijón 2, situado en pantalán dársenas interiores, lado opuesto del Muelle Rendiello del Puerto de Gijón, de la Red REDMAR de Puertos del Estado:

MAREÓGRAFO 3108 GIJÓN 2	
Longitud	5.70° O
Latitud	43.56° N
Cadencia	1 Min
Código	3108
Inicio de medidas	29-6-1995
Tipo de sensor	Radar
Modelo	Miros
Comentarios	Hasta 2009 sensor acústico en misma posición. Datos de viento desde 24-06-2015
Conjunto de	REDMAR



Analizados los datos del mareógrafo en los horarios (día-hora) correspondientes a los episodios preseleccionados de sucesos temporales de mayor nivel en el período de registros máximo disponible (desde el 29 de junio de 1995 hasta la actualidad), para asociar a cada uno de los mismos el incremento mareal con el que tuvo lugar, se han capturado los valores de dichos registros de niveles mareales sincronizados al momento en que el suceso del oleaje alcanzó la orilla.

Si bien los estados de mar de las bases de datos Simar analizadas se corresponden con el oleaje espectral de una hora, se considerará para estimar su marea la asignación de los parámetros del estado de mar a la hora UTC relacionada en cada estado. De esta forma, el tiempo estimado que tarda un oleaje promedio de los seleccionados en recorrer las distancias desde la ubicación de las coordenadas del Punto Simar 3108040 hasta pie de costa del tramo de estudio de la ensenada de Celorio (aproximadamente 30,6 km. de distancia), con una celeridad promedio (estimada a su vez con un período promedio de los estados de mar seleccionados) de onda de 26 m/seg. estimados con la teoría lineal (onda progresiva) del módulo de ondas del paquete informático SMC, en la aplicación TIC (software creado por Universidad de Cantabria-anterior Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente), es inferior a 30 minutos y en consecuencia inferior a una hora (estimación despreciando efectos del fondo), por lo que, como los datos de los oleajes están dados de hora en hora, se tomará el dato del mareógrafo del promedio horario UTC del nivel asociado a la misma hora del oleaje.

Los datos de los incrementos mareales en el horario en el que cada uno de los sucesos anteriores alcanzó la costa, referidos al cero del Puerto de Gijón, fueron los siguientes:

ESTADOS DE MAR SELECCIONADOS	
FECHA/HORA	NIVEL (m.) O PUERTO
2014-03-03 17:00:00	4.85
2014-02-02 05:00:00	5.04
2014-03-04 05:00:00	4.86
2016-02-09 04:00:00	4.98
2018-01-17 16:00:00	4.03
2023-10-28 15:00:00	5.27
2024-02-11 04:00:00	5.20

A partir de los parámetros de nivelación del mareógrafo que proporciona Puertos del Estado, se transforman los niveles anteriores en niveles referidos al NMMA.

Clavo de referencia: NGU-83. Sobre la esquina noroeste de la peana del faro situado junto al mareógrafo

Cero REDMAR: Cero del Puerto

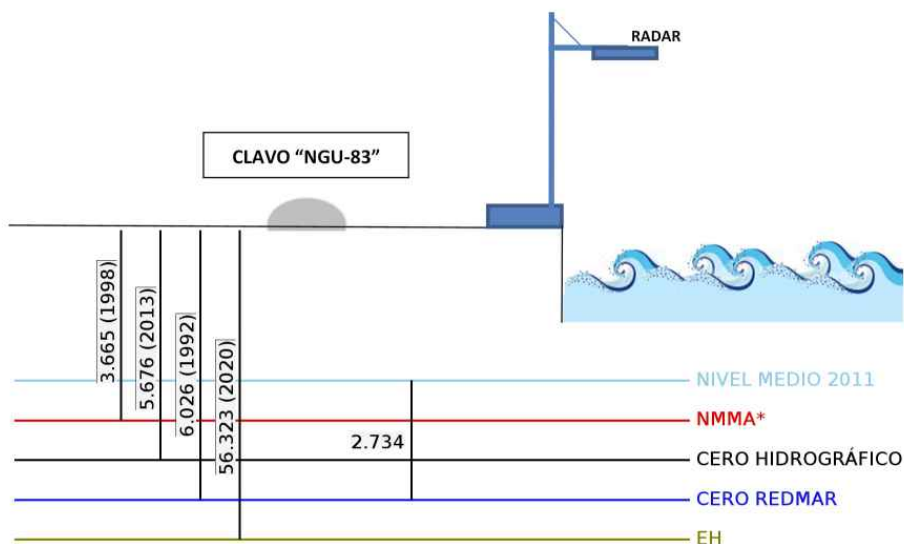
Cota: 6.03 m. bajo clavo de referenci



ESQUEMA DATUM MAREÓGRAFO REDMAR GIJÓN2 (cotas en metros)



CLAVO "NGU-83"



Clavo NGU 83: Propiedad del Puerto de Gijón. Situado a la derecha del mareógrafo detrás de la barandilla de seguridad.

*NMMA: Nivel Medio del Mar en Alicante. Cero IGN

Nota: La posición relativa de Clavo y Mareógrafo está simplificada.

**INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)**

C/ Cañadilla 6, local 68, C. Comercial Coronado, Las Rozas de Madrid 28231, Madrid

Pza. de la Montañeta 4, entresuelo, 03001 Alicante

Tfno.: 918961731; Fax: 918903410; e-mail: idyma@idyma.es

Los niveles referidos al N.M.M.A. sincronizados con sus respectivos estados de mar son los siguientes:

ESTADOS DE MAR SELECCIONADOS	
FECHA/HORA	NIVEL (m.) AL N.M.M.A.
2014-03-03 17:00:00	2.49
2014-02-02 05:00:00	2.68
2014-03-04 05:00:00	2.50
2016-02-09 04:00:00	2.62
2018-01-17 16:00:00	1.67
2023-10-28 15:00:00	2.91
2024-02-11 04:00:00	2.84



3. PROPAGACIÓN DEL OLEAJE

3.1. PRIMERA FASE: DESDE LA BOYA O PUNTO GEOGRÁFICO FUENTE DE DATOS DE MODELOS NUMÉRICOS, HASTA PROFUNDIDADES INDEFINIDAS, SEGÚN LOS SECTORES PRINCIPALES DE INCIDENCIA

No se procede a la realización de la primera propagación del oleaje, dado que el Punto Simar 3108040 se encuentra para los oleajes seleccionados en una ubicación que se corresponde con aguas profundas, por lo que los datos de los estados de mar de oleajes tomados del Punto Simar 3108040, han sido considerados como datos de oleajes en profundidades indefinidas, haciendo innecesaria la primera propagación, desde profundidades intermedias hasta profundidades indefinidas.

En consecuencia, los datos y parámetros de los sucesos temporales ya considerados en profundidades indefinidas y sus direcciones de procedencia, serán las siguientes:

ESTADOS DE MAR SELECCIONADOS POR SU POTENCIAL DE INUNDACIÓN ESTIMADO ANTES DE PROPAGACIÓN EN EL TRAMO DE COSTA OBJETO DE ESTUDIO, GENERADORES DE LOS MÁXIMOS NIVELES ALCANZADOS EN EL PERÍODO DE ESTUDIO EN EL PERÍODO 2014-2018, COMPROBADO ADICIONALMENTE CON DOS ESTADOS DE MAR DE 2023 Y 2024				
FUENTE DATOS PTOS SIMAR	FECHA/HORA	Hm0 (m.)	 Tp (seg.)	DirM (°sex.)
3108040	2014-03-03 17:00:00	10.25	17.99	303
3108040	2014-02-02 05:00:00	6.6	18.21	312
3108040	2014-03-04 05:00:00	7.09	17.71	309
3108040	2016-02-09 04:00:00	6.25	18.18	310
3108040	2018-01-17 16:00:00	7.48	19.51	323
3108040	2023-10-28 15:00:00	2.9	14.66	308
3108040	2024-02-11 04:00:00	5.02	14.66	315



3.2. SEGUNDA FASE: DESDE PROFUNDIDADES INDEFINIDAS HASTA PIE DE COSTA

3.2.1. Propagación con el modelo Oluca SP (espectral) del módulo MOPLA, software SMC 2.5

Se realizará la propagación de los estados de mar seleccionados del Punto Simar 3108040 teniendo en cuenta sus ubicaciones respecto al tramo de estudio y el comienzo de profundidades indefinidas para los estados de mar seleccionados, realizándose dicha propagación mediante el modelo numérico Oluca-SP basado en un modelo espectral de propagación de oleaje, que forma parte del Modelo Integral de Propagación de Oleaje, Corrientes y Morfodinámica en Playas, MOPLA, integrado en el software SMC 2.5 desarrollado por el I.H. de la Universidad de Cantabria.

Al propagarse el oleaje hasta zonas costeras de menor profundidad, se producen modificaciones importantes por la batimetría del fondo de forma que la refracción, el asomeramiento, la disipación de energía y la difracción entre otras, son manifestaciones de dichas interacciones, habiéndose profundizado los últimos años en el conocimiento de estos procesos físicos, lo cual ha permitido incorporar los conocimientos en modelos numéricos de propagación de oleaje.

El modelo Oluca-SP del módulo MOPLA del SMC 2.5, corresponde a un modelo de la categoría modelo espectral no dispersivo que resuelve la fase, MRF, que requiere como entrada en el contorno exterior (mar adentro), un estado de mar direccional, que está representado por un espectro bidimensional discretizado en componentes frecuenciales y direccionales, las cuales son propagadas de manera simultánea. Para la propagación de los componentes de energía, la aproximación parabólica incluye refracción-difracción con interacción oleaje-corriente (Kirby, 1986 a). El modelo predice las pérdidas de energía debido a la rotura del oleaje mediante la utilización de tres diferentes modelos estadísticos de disipación, dos de los cuales calculan la tasa media de disipación de energía asociada a un bore en movimiento (Battjes y Jansen, 1978; Thornton y Guza, 1983) y un tercero que asocia la tasa de disipación al gradiente entre el flujo de energía estable y local (Winyu y Tomoya, 1998).



Desde que se presentaron los primeros modelos de refracción y difracción combinadas, se sigue investigando el desarrollo de estos modelos originales, basados en teoría lineal, para que den respuesta a varios fenómenos físicos reales no cubiertos todavía por dicha teoría.

Entre los fenómenos que son de particular importancia destaca la no linealidad de las ondas, que provoca un aumento de la celeridad por efecto de la dispersión debida a la amplitud, y no sólo debida a la frecuencia, como ocurre en ondas lineales. Se ha demostrado, Kirby and Dalrymple (1983a), (1984) que la consideración de fenómenos no lineales puede provocar una clara distorsión de los resultados a partir de unas pocas longitudes de onda. Para representar la no linealidad en los modelos de propagación se utilizan dos aproximaciones.

La primera aproximación, sugerida inicialmente por Booij (1981), consiste en utilizar una relación de dispersión empírica que modele la dispersión por amplitud en aguas someras y que tienda a la relación de dispersión frecuencial en aguas profundas. Esta técnica tiene la ventaja de tener, al menos, una descripción empírica del comportamiento en aguas someras, pero tiene el inconveniente de linealizar los resultados en aguas profundas. La segunda consiste en modificar el modelo lineal de Kirby and Dalrymple (1983a), incluyendo un término proporcional al cubo de la amplitud de la ola que representa la distorsión del número de onda resultante de los efectos de tercer orden en la teoría de Stokes. Esta aproximación presenta la ventaja de tener una base analítica válida, pero tiene el claro inconveniente de no ser adecuada para aguas poco profundas.

3.2.2. Fundamentos del Oluca SP: modelos MRF por componentes espectrales para propagación de oleaje

Asumiendo que la superficie libre del agua es periódica en el tiempo y que la dependencia espacial se puede dividir en una fase que varía rápidamente y en una amplitud que varía lentamente, la elevación de la superficie libre del agua, h , puede ser representada como una suma de componentes frecuenciales y direccionales, así:

$$\eta = \sum_j \sum_l \eta_{jl} = R_e \left\{ \sum_{j=1}^{N_f} \sum_{l=1}^{N_\theta} A_{jl}(x, y) e^{i\psi_j} \right\} \quad (1)$$

$$\psi_j = i\bar{K}_j x - \sigma_j$$

$$\bar{K}_j = \frac{1}{B} \int_0^B K_j(x, y) dy$$

Donde:

x, y	=	Sistema de coordenadas, tal que el eje x va en la dirección principal de propagación y el eje y perpendicular a éste.
j, l	=	Índice que representan la frecuencia y dirección respectivamente.
$R_e(z)$	=	Parte real de un número complejo z.
$A_{jl}(x, y)$	=	Amplitud de onda compleja para una componente frecuencial, j y direccional, l. Definida en un punto (x, y) del dominio.
N_f, N_θ	=	Número de discretizaciones en frecuencia y dirección, respectivamente.
$K_j(x, y)$	=	Número de onda para una componente con frecuencia angular, j.
σ_j	=	Frecuencia angular para la componente j.
$\bar{K}_j(x)$	=	Valor representativo del número de onda asociado a una frecuencia angular j, en una coordenada x.
B	=	ancho del dominio (en el eje y).

Cuando el campo de oleaje consiste en ondas planas, $A_{jl}(x, y)$ puede ser representada en términos de una amplitud constante a_{jl} y una dirección θ_{jl} como:

$$A_{jl}(x, y) = a_{jl} e^{i[(K_j \cos \theta_{jl} - \bar{K}_j)x + K_j \sin \theta_{jl} y]} \quad (2)$$

se asume que la refracción, difracción y asomeramiento de componentes de oleaje discretas, está gobernada por la aproximación parabólica oleaje-corriente de las ecuaciones de pendiente suave (Kirby, 1984 a). La ecuación que gobierna la amplitud compleja $A_{jl}(x, y)$ en el Oluca-SP, es dada por (Kirby, 1986 a).

3.2.3. Ecuación de la pendiente suave

Asumiendo que la superficie libre del agua es periódica en el tiempo y que la dependencia espacial se puede dividir en una fase que varía rápidamente y en una amplitud que varía lentamente, la elevación de la superficie libre del agua, h , puede ser representada como una suma de componentes frecuenciales y direccionales, así:

El problema de la propagación de ondas sobre batimetría irregular es tridimensional e involucra complicadas condiciones de contorno no lineales. Por este motivo, existen muy pocas soluciones al problema tridimensional y todas ellas lo son para fondo plano horizontal. En dos dimensiones, los sofisticados modelos de Chu and Mei (1970) y Djordjevic and Redekopp (1978) predicen el comportamiento de ondas de Stokes sobre batimetría con variación suave. Para la simplificación del problema tridimensional, Berkhoff (1972), entre otros, hizo notar que la mayor parte de las propiedades de las ondas progresivas lineales podrían ser predichas mediante un modelo ponderado integrado verticalmente. La ecuación a la que llegó Berkhoff (1972) se conoce con el nombre de "mild slope equation" es decir, ecuación de pendiente suave. La ecuación puede escribirse en función del desplazamiento de la superficie libre, $\eta(x, y)$, mediante la utilización de un operador de gradiente horizontal como:

$$\bar{\nabla} \left(c c_g \bar{\nabla} \eta \right) + \sigma^2 \frac{c_g}{c} \eta = 0 \quad (3)$$

Donde:

$$\bar{\nabla} = \frac{\partial}{\partial x_j} \quad j = 1, 2$$

$$c = \sqrt{\left(\frac{g}{k} \right) \tanh kh} \quad = \text{Celeridad de la onda}$$

$$c_g = c \frac{\left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right)}{2} \quad = \text{Celeridad de grupo}$$



Donde $h(x,y)$ es la profundidad local de agua, y g la aceleración de la gravedad. El número de onda local $k(x, y)$, está relacionado con la frecuencia angular, σ , y la profundidad, h , mediante la relación de dispersión lineal:

$$\sigma^2 = g k \tanh kh \quad (4)$$

El perfil de la onda viene dado por:

$$\eta = A(x, y) e^{i\sigma t}$$

Donde, $A(x, y)$ es la amplitud compleja con información sobre la fase y la amplitud real de la onda. Berkhoff (1972) fue el primero en obtener una ecuación de propagación para ondas de pequeña amplitud en zonas con profundidad suavemente variable. Posteriormente, dicha ecuación se amplió para incluir también los efectos de corrientes por Booij (1981) y Kirby (1983). Se han utilizado diferentes métodos matemáticos para obtener las ecuaciones para pendientes suaves. Mientras que Luke (1967), Booij (1981) y Kirby (1983) utilizaron un principio variacional, otros autores han aplicado métodos basados en perturbaciones.

Numerosos autores han aplicado la ecuación de la pendiente suave a diversos casos, principalmente utilizando técnicas de diferencias finitas, ver como ejemplos Jonsson and Skovgaard (1979), Bettes and Zienkiewicz (1977) y Houston (1981). Radder (1979) desarrolló para la ecuación de la pendiente suave una aproximación parabólica que tiene varias ventajas sobre la forma elíptica presentada por Berkhoff (1972). Primero, no son necesarias las condiciones de contorno en el extremo inferior del recinto de integración y, segundo, permite técnicas de resolución muy eficientes por medio de un modelo en diferencias finitas. Radder (1979) utilizó una técnica de partición de matrices, que implica la separación del campo de ondas en una onda propagándose hacia adelante y otra hacia atrás, despreciándose posteriormente esta segunda (lo que se justifica porque en la mayoría de las aplicaciones sólo tiene interés la onda que se propaga hacia adelante).

La aproximación de Radder (1979) para las derivadas transversales en la dirección normal a la de propagación, impone una restricción a su modelo parabólico: las ondas deben propagarse dentro de los $\pm 45^\circ$ alrededor de la dirección principal de propagación. Booij (1981) desarrolló también un método para la partición de la matriz de la ecuación elíptica, pero su procedimiento incluye más términos en la aproximación de las derivadas transversales y, por

lo tanto, su método permite al modelo parabólico manejar ondas dentro del rango de $\pm 50^\circ$ alrededor de la dirección supuesta.

Este procedimiento de Booij es el que se utiliza en el modelo de ondas monocromáticas Oluca-MC y el modelo espectral Oluca-SP. La aproximación parabólica débilmente no lineal a la ecuación de pendiente suave viene dada por:

$$c_g \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial y} + i(\bar{k} - k) c_g A + \frac{\sigma}{2} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{c_g}{\sigma} \right) A - \frac{i}{2\sigma} \frac{\partial}{\partial y} \left[p \frac{\partial A}{\partial y} \right] - i\sigma k^2 D \left| A \right|^2 \frac{A}{2} = 0 \quad (6)$$

Donde

$$p = C c_g$$

$\bar{k}$ = Número de onda de referencia, tomado como la media a lo largo del eje y.

D = Forma parte del término no lineal, y se define como:

$$D = \frac{(\cos h 4 kh + 8 - 2 \tanh^2 kh)}{8 \sinh^4 (kh)} \quad (7)$$

3.2.4. Modelos combinados de refracción/difracción

Los predecesores del Oluca-MC y el Oluca-SP fueron desarrollados por Kirby (1983) y Kirby and Dalrymple (1983a), el primero mediante una aproximación Lagrangiana y los segundos mediante una técnica de escalas múltiples. Estos modelos rellenaron el hueco entre los modelos no lineales de difracción y la ecuación lineal de la pendiente suave. Este modelo se puede escribir de diferentes maneras dependiendo de la aplicación.

Para aplicaciones dependientes del tiempo se utiliza la forma hiperbólica y para problemas estacionarios, la forma elíptica. Ambas requieren del uso de condiciones de contorno en todos los laterales del dominio del modelo. Estas condiciones son difíciles de establecer, puesto que la reflexión no es conocida a priori. Estos modelos tienen, sin embargo, la ventaja de que no presentan restricciones para la dirección del oleaje. Kirby and Dalrymple



(1984a) muestran una comparación entre su modelo débilmente no lineal de (1983a) y datos de laboratorio. Los ensayos de laboratorio, realizados en el Delft Hydraulics Laboratory por Berkhoff, Booij and Radder (1982), consistieron en la determinación de la amplitud de las ondas sobre un bajo en un fondo con pendiente.

Mientras los resultados predichos por Berkhoff, Booij and Radder (1982) mediante el trazado de los rayos resultaron ser una muy pobre aproximación a los ensayos, la predicción obtenida con el modelo de Kirby and Dalrymple (1984) fue excelente. Las comparaciones entre los modelos parabólicos lineales y no lineales demostraron la importancia de los términos no lineales dispersivos en las ecuaciones.

3.2.5. Modelos de interacción oleaje/corrientes

Utilizando una aproximación Lagrangiana, Booij (1981) desarrolló una versión de la ecuación de la pendiente suave que incluye los efectos de una corriente. En este modelo las corrientes se suponían débiles y cualquier producto entre velocidades de corriente era despreciado. Kirby (1984a) presentó la forma corregida de su modelo de la ecuación de pendiente suave para incluir corrientes.

El término no lineal fue añadido por Kirby and Dalrymple (1983b) y en este artículo presentaron los resultados de modificación de las ondas al atravesar un chorro de corriente. La ecuación de pendiente suave modificada para una corriente débil que presentaron es:

$$\begin{aligned} (c_g + U) A_x + V A_y + i(\bar{k} - k)(c_g + U) A + \frac{\sigma}{2} \left[\left(\frac{c_g + U}{\sigma} \right)_x + \left(\frac{V}{\sigma} \right)_y \right] A \\ - \frac{i}{2\sigma} (p - V^2) A_y - i\sigma \frac{k^2}{2} D |A|^2 A = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

Donde $p = c_g$ y $\bar{k}$ = número de onda de referencia, tomando como el promedio del número de onda a lo largo del eje y, U es la velocidad media de corriente en la dirección de la coordenada x y V en la dirección y. El término no lineal incluye D , que es:

$$D = \frac{(\cosh 4kh + 8 - 2 \tanh^2 kh)}{8 \sinh^4(kh)}$$

Por último, Kirby and Dalrymple (1985) han desarrollado una versión no lineal del modelo parabólico que incluye corrientes fuertes, con base en una formulación Lagrangiana (principio variacional) descrita por Luke (1967), para un fluido no viscoso e irrotacional con una superficie libre:

$$\delta \int_t^{\eta} \int_{\vec{x}} L d\vec{x} dt = 0; \quad L = \int_{-h}^{\eta} \left[\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} (\nabla \Phi)^2 + g z \right] dz \quad (9)$$

donde h es la profundidad local y $\delta = \frac{\Delta h}{kh}$ es un parámetro adimensional relativo a la variación de la profundidad en una longitud de onda. Utilizando el peralte de la onda $\varepsilon = k |A|$, se puede expresar el potencial de velocidades Φ y la superficie libre η mediante un desarrollo en serie como:

$$\Phi = \delta^{-1} \Phi_0(\delta x, \delta y, \delta t) + \varepsilon \Phi_1(x, y, z, t) + O(\varepsilon^2) \quad (10)$$

$$\eta = \eta_0(\delta x, \delta y, \delta t) + \varepsilon \eta_1(x, y, t) + O(\varepsilon^2) \quad (11)$$

asumiendo la existencia de corrientes $U = O(1)$ y con $\varepsilon \ll 1$, $\delta \ll 1$ y $\delta = O(\varepsilon)$

Aquí Φ_0 es el potencial para la corriente:

$$U = \nabla \Phi_0 \quad (12)$$

y Φ_1 viene dado por:

$$\Phi_1 = -\frac{ig}{2\sigma} A f(z) e^{i\theta} + \text{complejo conjugado} \quad (13)$$

Operando del modo descrito en Kirby & Dalrymple (1983b), se llega a la ecuación:

$$\begin{aligned} & \frac{D^2 \phi}{Dt^2} + (\vec{\nabla} \cdot \vec{U}) \frac{D\phi}{Dt} - \vec{\nabla} (c c_g \vec{\nabla} \phi) + (\sigma^2 - k^2 c c_g) \phi \\ & + 2\sigma \left[\bar{k} \vec{\nabla} \phi_2 - \frac{k^2}{2\sigma \cos h^2 kh} \right] \phi + \sigma^2 k^2 D |A|^2 \phi + i\sigma \frac{\gamma}{2} \phi = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

donde ϕ es el potencial en la superficie libre ($\Phi(x, y, z, t) = \phi(x, y, t) f(z)$), el término no lineal $\sigma^2 k^2 D |A|^2 \phi$ representa en cierto modo, la dispersión por amplitud. El término de disipación $i\sigma \frac{\gamma}{2} \phi$, se utiliza para modelar la disipación de energía por fricción y por rotura del oleaje, y ϕ_2 es el potencial para una onda larga, que se rige por la ecuación:

$$\begin{aligned} & \frac{D^2 \phi_2}{Dt^2} + (\vec{\nabla} \cdot \vec{U}) \frac{D\phi_2}{Dt} - g \vec{\nabla} (h \vec{\nabla} \phi_2 + \vec{U}) = \\ & - \frac{gk}{2 \sin h 2kh} \frac{D}{Dt} |A|^2 + \frac{g^2}{2} \vec{\nabla} \left[\bar{k} \frac{|A|^2}{\sigma} \right] \end{aligned} \quad (15)$$

De acuerdo con Kirby and Dalrymple (1983a), para obtener la ecuación de la onda incidente, se debe despreciar el acoplamiento que produce la onda larga en el potencial ϕ .

Por otro lado, para obtener la aproximación parabólica debe asumirse que el oleaje se propaga principalmente en dirección x , es decir:

$$\bar{k} \cong (k, 0)$$

y así, la relación de dispersión resulta:

$$\omega = \sigma + \bar{k} \bar{U} \cong \sigma + k \cdot U \quad (16)$$

Donde, ω , es la frecuencia absoluta y, σ , la frecuencia intrínseca. La ecuación de la dispersión (4) que relaciona la frecuencia angular de la onda, la profundidad y el número de onda, es modificado para tener en cuenta el efecto Doppler debido a la corriente:

$$(\omega - kU)^2 = gk \tan h kh \quad (17)$$

Dado que los procesos de refracción y difracción pueden desviar la dirección de propagación de la dirección principal x , la amplitud de la onda A , debe ser una función compleja para que absorba las diferencias entre la fase real y la asumida. Si se toma el valor de $\bar{k}$ y se sustituye en (13), la nueva expresión para el potencial en la superficie libre es:

$$\phi = -i \frac{g}{2\sigma} A(x, y) e^{i \int \bar{k} dx} + \text{complejo conjugado} \quad (18)$$

despreciando la influencia de la onda larga y la dependencia de A respecto del tiempo en la ecuación (14), se llega a la siguiente ecuación parabólica para la amplitud compleja:

$$\begin{aligned} & (c_g + U) \frac{\partial A}{\partial x} + V \frac{\partial A}{\partial y} + i(\bar{k} - k)(c_g + U)A + \frac{\sigma}{2} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{c_g + U}{\sigma} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{V}{\sigma} \right) \right] A \\ & - \frac{i}{2} \frac{\partial}{\partial y} \left[(c_g - V^2) \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{A}{\sigma} \right) \right] + \frac{i}{2} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[UV \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{A}{\sigma} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[UV \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{A}{\sigma} \right) \right] \right\} \\ & + \frac{1}{4k} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial}{\partial y} \left[(c_g - V^2) \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{A}{\sigma} \right) \right] + 2i \frac{\partial}{\partial x} \left[\sigma V \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{A}{\sigma} \right) \right] \right\} \\ & - \frac{\beta}{4} \left\{ 2i\omega U \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{A}{\sigma} \right) + 2i\sigma V \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{A}{\sigma} \right) - 2UV \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{A}{\sigma} \right) \right\} \\ & - \frac{\beta}{4} \frac{\partial}{\partial y} \left[(c_g - V^2) \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{A}{\sigma} \right) \right] + \frac{i}{4k} \left[\frac{\partial}{\partial y} (\omega V) + 3 \frac{\partial}{\partial x} (\omega U) \right] \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{A}{\sigma} \right) \\ & + \frac{\gamma A}{2} + \frac{i\sigma}{2} G(|A|, kh)A = 0 \end{aligned} \quad (19)$$

siendo:

$$\beta = \frac{I}{k^2} \frac{\partial k}{\partial x} + \frac{I}{2k^2(c c_g - U^2)} \frac{\partial}{\partial x} [k(c c_g - U^2)]$$

y donde $A = A(x, y)$ es la función compleja de la amplitud de la onda, $G(|A|, kh)$ es una función no lineal con la amplitud, $U_r = (U, V)$ es el vector velocidad de la corriente, ω es la frecuencia angular absoluta, σ es la frecuencia angular intrínseca, c es la celeridad de fase o de la onda, c_g es la celeridad de grupo, k es el número de onda y $\bar{k}$ es el número de onda de referencia medio a lo largo del eje y . Esta ecuación es la discretizada en el modelo monocromático Oluca-MC. El desarrollo y las operaciones que se requieren para llegar hasta ella son muy extensos y no se ha creído apropiado describirlos detalladamente. Dicho desarrollo puede encontrarse en las referencias: Kirby and Dalrymple (1985), y Kirby (1986a).

Aplicando el principio “Minimax”, la ecuación (19) ha sido extendida por Kirby (1986c), permitiendo ángulos de propagación mayores con respecto al eje x . La ecuación extendida que gobierna la refracción, difracción y asomeramiento de una componente discreta con frecuencia j y dirección l , es la siguiente:

$$\begin{aligned} & (C_{gj} + U) \left(\frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right)_x - 2\Delta_1 V \left(\frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right)_y + i(\bar{k}_j - a_0 k_j) (C_{gj} + U) \frac{A_{jl}}{\sigma_j} \\ & + \left\{ \frac{\sigma_j}{2} \left(\frac{C_{gj} + U}{\sigma_j} \right)_x - \Delta_1 \sigma_j \left(\frac{V}{\sigma_j} \right)_y \right\} \frac{A_{jl}}{\sigma_j} + i\Delta_j \left[\left((CC_g)_j - V^2 \right) \left(\frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right)_y \right]_y \\ & - i\Delta_1 \left\{ \left[UV \left(\frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right)_y \right]_x + \left[UV \left(\frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right)_x \right]_y \right\} \\ & + \frac{-b_i}{k_j} \left\{ \left[\left((CC_g)_j - V^2 \right) \left(\frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right)_y \right]_{yx} + 2i \left(\sigma_j V \left(\frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right)_y \right)_x \right\} \\ & + b_1 \beta_j \left\{ 2i\omega_j U \left(\frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right)_x + 2i\sigma_j V \left(\frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right)_y - 2UV \left(\frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right)_{xy} + \left[\left((CC_g)_j - V^2 \right) \left(\frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right)_y \right]_y \right\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -\frac{i}{k_j} b_1 \left\{ (\omega_j V)_y + 3(\omega_j U_x) \right\} \left(\frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right)_x - \Delta_2 \left\{ \omega_j U \left(\frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right)_x + \frac{1}{2} \omega_j U_x \left(\frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right) \right\} \\
& + i k_j \omega_j U (a_0 - 1) \left(\frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right) + \alpha A_{jl} + \frac{\gamma i}{2} A_{jl} + \frac{i \sigma_j}{2} k_j^2 D_j |A_{jl}|^2 A_{jl} = 0 \quad (20)
\end{aligned}$$

donde α y γ son los coeficientes de disipación de energía por rotura del oleaje y fricción por el fondo respectivamente.

$$\sigma_j = \omega_j - k_j U; \quad \beta_j = \frac{(k_j)_x}{k_j^2} + \frac{(k_j ((CC_{\xi})_j - U^2))_x}{2k_j^2 ((CC_{\xi})_j - U^2)} \quad (21)$$

$$\Delta_1 = a_1 - b_1; \quad \Delta_2 = 1 + 2a_1 - 2b_1; \quad \Delta_j = a_1 - b_1 \frac{\bar{k}_j}{k_j} \quad (22 \text{ a})$$

$$D_j = \frac{\cosh(4k_j h) + 8 - 2 \tanh^2(k_j h)}{8 \sinh^4(k_j h)} \quad (22 \text{ b})$$

Los coeficientes a_0 , a_1 y b_1 se escogen con base en el criterio de mínimo error aplicando el principio “Minimax”. Siguiendo Greene (1984), Kirby (1986c) describe la aplicación del principio de “Minimax” en problemas de superficie de ondas, las tablas con resultados de los coeficientes pueden ser consultados en dicha referencia. Los coeficientes dependen de un ancho de apertura permitido dependiendo de la dirección de las olas. Algunos de estos coeficientes se definen como:

Tabla 1. Rango de coeficientes a_0 , a_1 y b_1 de acuerdo con aproximaciones parabólicas.

Aproximaciones parabólicas	a_0	a_1	b_1
Simple: Radder (1979)	1	-0.50	0.00
Padde (1,1): Booij (1981), Kirby (1986c)	1	-0.75	-0.25
Minimax 70: Kirby (1986c)	0.994733030	-0.890064831	-0.451640568



Kirby (1986c) encontró que para rangos máximos (Minimax 70°) se obtienen resultados razonables dentro de los ángulos que típicamente se utilizan, pero mantiene reservas en cuanto a su aplicación en modelos numéricos, dado que todavía esta aproximación no ha sido suficientemente comprobada. Kirby (1994), recomienda el uso de Padde (1,1) el cual se ha implementado en el modelo espectral Oluca-SP, obteniéndose resultados razonables dentro de los $\pm 55^\circ$ con el eje x.

3.2.6. Dispersión del oleaje debida a la altura de ola significativa

Desde que se presentaron los primeros modelos de refracción y difracción combinadas, se sigue investigando el desarrollo de estos modelos originales, basados en teoría lineal, para que den respuesta a varios fenómenos físicos reales no cubiertos todavía por dicha teoría. Entre los fenómenos que son de particular importancia destaca la no linealidad de las ondas, que provoca un aumento de la celeridad por efecto de la dispersión debida a la amplitud, y no sólo debida a la frecuencia, como ocurre en ondas lineales. Se ha demostrado, Kirby and Dalrymple (1983a), (1984) que la consideración de fenómenos no lineales puede provocar una clara distorsión de los resultados a partir de unas pocas longitudes de onda.

Para representar la no linealidad en los modelos de propagación se utilizan dos aproximaciones. La primera aproximación, sugerida inicialmente por Booij (1981), consiste en utilizar una relación de dispersión empírica que modele la dispersión por amplitud en aguas someras y que tienda a la relación de dispersión frecuencial en aguas profundas. Esta técnica tiene la ventaja de tener, al menos, una descripción empírica del comportamiento en aguas someras, pero tiene el inconveniente de linealizar los resultados en aguas profundas.

La segunda consiste en modificar el modelo lineal de Kirby and Dalrymple (1983a), incluyendo un término proporcional al cubo de la amplitud de la ola que representa la distorsión del número de onda resultante de los efectos de tercer orden en la teoría de Stokes. Esta aproximación presenta la ventaja de tener una base analítica válida, pero tiene el claro inconveniente de no ser adecuada para aguas poco profundas.

3.2.6.1. Relación de dispersión empírica

La teoría de Stokes para aguas profundas e intermedias ofrece la siguiente relación de dispersión:

$$\sigma^2 = gk(1 + \varepsilon^2 D) \tanh(kh) \quad (23)$$

donde:

$$\varepsilon = k|A| \quad \text{y} \quad D = \frac{\cosh(4kh) + 8 - 2 \tanh^2(kh)}{8 \sinh^4(kh)} \quad (24)$$

Esta formulación es válida para números de Ursell $Ur < O(1)$ con Ur definido como:

$$Ur \equiv \frac{|A|}{h} \frac{1}{(kh)^2} \quad (25)$$

Dicha restricción no se cumple en aguas someras, donde $kh \rightarrow 0$ con $\frac{|A|}{h}$ pequeño pero finito. Además, la singularidad en D es muy grande e invalida los resultados en aguas poco profundas:

$$kh \rightarrow 0 \quad D \approx \frac{9}{8} \frac{1}{(kh)^4} \quad (26)$$

En aguas poco profundas, Hedges (1976) propuso una modificación de la relación de dispersión lineal para modelar la dispersión por amplitud:

$$\sigma^2 = gk \tanh[k(h + |A|)] \quad (27a)$$

que en aguas poco profundas y para $\frac{|A|}{h}$ pequeño, tiende a:

$$\sigma^2 = g k^2 (h + |A|) \quad (27b)$$

o, lo que es equivalente, a:

$$c = \sqrt{g(h + |A|)} \quad (27c)$$

que representa la velocidad de propagación de una onda solitaria de altura $H = |A|$.

En aguas profundas, la relación de Hedges (1976) tiende a la relación lineal (4), ya que $\frac{|A|}{h} \rightarrow 0$ debido al aumento de la profundidad.

La no adecuación de una relación de dispersión empírica en aguas someras para modelar efectos no lineales en aguas intermedias, unida a la invalidez de la teoría de Stokes en aguas poco profundas, condujo a Kirby & Dalrymple (1986b) a buscar una relación de dispersión que fuera capaz de predecir la celeridad de la onda desde aguas profundas a aguas someras. Con el fin de incorporarla en modelos de propagación de ondas, propusieron la siguiente relación de dispersión:

$$\sigma^2 = gk (1 + f_1 \varepsilon^2 D) \tanh h (kh + f_2 \varepsilon) \quad (28)$$

donde $f_1 = f_1(kh)$ y $f_2 = f_2(kh)$ son dos funciones arbitrarias, y ε y D están definidos como en (24). El modelo presentado se construye escogiendo expresiones adecuadas para las funciones f_1 y f_2 . En particular se requiere que:

$$f_1(kh) \rightarrow 1 \text{ y } f_2(kh) \rightarrow 0 \text{ cuando } kh \rightarrow \infty \quad (29 a)$$

para recuperar la expresión del modelo de Stokes en aguas profundas e intermedias, mientras que en aguas someras se requiere que:

$$f_1(kh) = O[(kh)^5] \text{ y } f_2(kh) \rightarrow 1 \text{ cuando } kh \rightarrow 0 \quad (29 \text{ b})$$

para evitar la singularidad en D , de orden $O[(kh)^{-4}]$.

Por otro lado, la expresión de Hedges (1976) se obtiene haciendo $f_1 = 0$ y $f_2 = 1$ para cualquier valor de kh .

Con base en las exigencias anteriores, Kirby & Dalrymple (1986b) escogieron los valores de f_1 y f_2 como:

$$f_1(kh) = \tan h^5(kh) \quad (30)$$

$$f_2(kh) = \left[\frac{kh}{\sin h(kh)} \right]^4 \quad (31)$$

La relación propuesta concuerda adecuadamente con ambas relaciones; la de Stokes en aguas profundas y la de Hedges, (1976) en aguas someras. La variación de la relación de dispersión $\frac{\sigma^2}{gk}$:

$$\frac{\sigma^2}{gk} = \frac{\frac{\sigma}{k}}{\frac{g}{\sigma}} = \frac{c}{c_0} \quad (32)$$

En función de kh para diferentes valores de ε , siendo c la celeridad de la ola y c_0 la celeridad en aguas profundas.



Con el fin de incluir efectos no lineales en la propagación de componentes de energía de un estado de mar, Kirby et al. (1994) propone modificar las relaciones de dispersión aplicadas en ondas monocromáticas (Hedges, ecuación (27a) y modelo híbrido, ecuación (28)). Esta modificación se fundamenta en que los efectos no lineales incrementan su importancia cuando la rotura del oleaje es fuerte.

Dado que la altura de ola significativa H_s , es importante dentro de los modelos de rotura como se verá más adelante, ésta ha sido incluida en las modificaciones en las relaciones de dispersión.

El modelo Oluca-SP permite las siguientes opciones de ecuaciones de dispersión, para una frecuencia dada j :

$$\sigma_j^2 = gk_j(1 + \varepsilon_j^2 D_j) \tanh(k_j h) \quad \text{Stokes sin modificar} \quad (33)$$

$$\sigma_j^2 = gk_j \tanh(k_j h + \varepsilon_s) \quad \text{Hedges modificado} \quad (34)$$

$$\sigma_j^2 = gk_j(1 + f_{1j}\varepsilon_j^2 D_j) \tanh(k_j h + f_{2j}\varepsilon_s) \quad \text{Modelo híbrido modificado, Kirby} \quad (35)$$

donde:

$$\begin{aligned} \varepsilon_j &= k_j |A|_{jI} \\ \varepsilon_s &= k_j H_s / 2 \end{aligned} \quad (36)$$

siendo h la profundidad en un punto dado del dominio, y D_j , f_{1j} y f_{2j} los mismos definidos anteriormente, para una frecuencia j . De estas opciones la (35) cubre un mayor rango de profundidades de agua.

3.2.6.2. Modificación del modelo lineal, incluyendo un término en $|A|^2 A$

Las ecuaciones parabólicas de Booij (1981) y Radder (1979) son ecuaciones basadas en la ecuación lineal de Berkhoff (1972) y, como tales, no son capaces de reproducir efectos no lineales dependientes de la amplitud de la ola. Los modelos lineales tienden, en general, a calcular por exceso las amplitudes de ola en las proximidades de zonas de concentración de olas y formación de cústicos, donde el peralte aumenta rápidamente y los efectos no lineales llegan a ser importantes. Esta tendencia puede observarse en la verificación realizada por Berkhoff, Booij & Radder (1982).

Por esta razón, Kirby & Dalrymple (1983a) derivaron una ecuación parabólica para la propagación de ondas ligeramente no lineales "weakly-nonlinear waves" empleando un método de perturbación multiescalar. El desarrollo formal, que puede encontrarse en Kirby & Dalrymple (1983a), utiliza un desarrollo del tipo WKB (Wentzel-Kramers-Brillouin) para el potencial de onda en el contexto de la teoría de Stokes, muy similar al utilizado por Yue & Mei (1980) para el caso de profundidad constante.

La aproximación parabólica que obtuvieron para la amplitud fue:

$$2ikc_g \frac{\partial A}{\partial x} + 2k(k - \bar{k})c_g A + i \frac{\partial(kc_g)}{\partial x} A + \frac{\partial}{\partial y} c_g \frac{\partial A}{\partial y} - kc_g K' |A|^2 A = 0 \quad (37)$$

con $k' = k^3 \frac{c}{c_g} D$, D definido como en (24) y A una función compleja de la amplitud.

Esta ecuación es igual que la de Radder (1979) (sustituyendo $\phi = i \frac{g}{\sigma} A e^{i\bar{k}x}$) excepto por el término no lineal:

$$- kc_g k' |A|^2 A$$

La aproximación realizada para incluir la no linealidad, utilizada en los modelos monocromático Oluca-RD y espectral Oluca-SP, fue objeto de una posterior verificación y sus resultados fueron ampliamente satisfactorios, Kirby & Dalrymple (1984). Un inconveniente que debe considerarse es que en aguas poco profundas la aproximación de Stokes de orden superior a uno no es utilizable ya que el término D no converge, independientemente de su falta de validez desde un punto de vista físico. Sin embargo, esta limitación se soluciona parcialmente con la relación de dispersión empírica (35).

3.2.7. Clima de Oleaje

El proceso de discretización del espectro bidimensional, permite definir componentes de energía a las cuales se les asocia una amplitud compleja A_{jl} , con una frecuencia f_j y un ángulo de incidencia θ_l . Para determinar las pérdidas de energía asociadas a la rotura del oleaje (ver detalles en la siguiente sección), es necesario definir en cada punto del dominio una altura de ola estadística (altura de ola significativa, H_s o altura media cuadrática H_{rms}). Asumiendo una distribución de alturas de ola de Rayleigh y utilizando la información de las componentes espectrales en cada punto (x, y) del dominio, la altura de ola significativa se puede estimar como:

$$H_s(x, y) = \left(8 \sum_{j=1}^{N_f} \sum_{l=1}^{N_\theta} |A_{jl}(x, y)|^2 \right)^{1/2} \quad (38)$$

y la altura de ola media cuadrática H_{rms} , como:

$$\sqrt{2} H_{rms}(x, y) = H_s(x, y) \quad (39)$$

También en cada punto (x, y) del dominio se puede definir el espectro frecuencial $E(f)$, como:

$$E(f_j) = \frac{\sum_{l=1}^{N_\theta} |A_{jl}(x, y)|^2}{2(\Delta f_j)} \quad (40)$$

Donde $j = 1, \dots, N_f$ y Df_j = ancho de incremento frecuencial para f_j .

Al objeto de definir el espectro bidimensional en un punto (x, y) del dominio, el espectro direccional se define dividiendo en 37 rangos de 5° entre $[\theta = -92.5^\circ$ y $\theta = 92.5^\circ]$. Para cada frecuencia, las componentes propagadas poseen un ángulo el cual se ubica en alguno de los 37 rangos direccionales. Posteriormente, la energía es sumada para cada uno de los rangos. El espectro direccional se obtiene como:

$$S(f_j, \theta_k) = \frac{\sum_{l=1}^{z_{jk}} |A_{jl}(x, y)|^2}{2\Delta f_j \Delta \theta} \quad (41)$$

Donde $k = 1, \dots, 37$; $D\theta = 5^\circ$; z_{jk} = número de componentes en la frecuencia j que se encuentran en el rango k de dirección.

La superficie libre $\eta(x, y)$, se puede obtener a partir del método de las fases aleatorias, tal como se muestra a continuación:

$$\eta(x, y) = \sum_{j=1}^{N_f} \sum_{l=1}^{N_\theta} \eta_{jl}(x, y) \quad (41 \text{ a})$$

$$\eta(x, y) = \sum_{j=1}^{N_f} \sum_{l=1}^{N_\theta} |A_{jl}(x, y)| \sin(k_j x \cos \theta_{jl} + k_j y \sin \theta_{jl} + \varepsilon_{jl}) \quad (41 \text{ b})$$

donde ε_{jl} es una fase aleatoria.

3.2.8. Modelado de la disipación de energía

En muchos casos, la simulación realista de la propagación de oleaje requiere la inclusión de efectos de disipación de energía, que introducen una ligera no linealidad. La presencia localizada de disipación de energía en el fondo o en algún punto de la columna de agua provoca la difracción del oleaje, así como su atenuación.



La inclusión de un término de disipación de energía en una ecuación de propagación fue estudiada por Skovgaard, Jonsson & Bertelsen (1975), quienes presentaron un modelo de disipación por fricción de fondo. Siguiendo esta idea, Booij (1981) y posteriormente Dalrymple, Kirby & Hwang (1984) desarrollaron modelos parabólicos incluyendo dicho término de disipación.

Dalrymple, Kirby & Hwang (1984), siguiendo el método empleado por Booij (1981), introdujeron un factor de disipación g en la ecuación de Berkhoff (1972):

$$\bar{\nabla} (c c_g \bar{\nabla} \phi) + (k^2 c c_g + i\sigma\gamma) \phi = 0 \quad (42)$$

Siguiendo el razonamiento para la obtención de la ecuación parabólica de Radder (1979), separando las componentes incidente y reflejada, se llega a una ecuación parabólica con el término de disipación semejante al de (20):

$$+\frac{\gamma_j}{2} A_{jI} \quad (43)$$

donde γ , es la disipación de la energía para la componente j , dividida por la energía (sus unidades son tiempo-1). Adopta diferentes expresiones dependiendo del origen de la disipación de energía. A continuación, se muestran algunos modelos de disipación por superficie, fondo y rotura del oleaje:

3.2.8.1. Capa límite laminar en superficie y fondo

En la superficie libre del agua y en el fondo, se forman sendas capas límite debidas a la acción de la viscosidad. En las superficies contaminadas (con origen natural o no), en las que se forma una película superficial, se produce un importante amortiguamiento del oleaje. Este amortiguamiento depende del valor de la viscosidad del fluido y su valor es, según Phillips (1966):

$$\begin{aligned}\gamma_j &= \gamma_{sj} + \gamma_{fj} = \frac{\sigma_j k_j \sqrt{\frac{\nu}{2\sigma_j}} (1-i)}{\tanh(k_j h)} + \frac{2\sigma_j k_j \sqrt{\frac{\nu}{2\sigma_j}} (1-i)}{\sinh(k_j h)} = \\ &= \frac{2\sigma_j k_j \sqrt{\frac{\nu}{2\sigma_j}} (1 + \cosh^2(k_j h))}{\sinh(2k_j h)} (1-i)\end{aligned}\quad (44)$$

Donde $\nu = 1.3 \cdot 10^{-6} \cdot \text{m}^2/\text{s}$ es la viscosidad cinemática y $\nu/2\sigma_j$ representa el espesor de la capa límite.

3.2.8.2. Capa límite turbulenta en el fondo

En el campo, las condiciones de oleaje son tales que la capa límite en el fondo es siempre turbulenta. En este caso, la disipación de energía se puede obtener utilizando el coeficiente de fricción de Darcy-Weisbach, f . Dean and Dalrymple (1984) demostraron que la disipación de energía para esta capa límite, viene dada por la expresión:

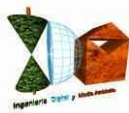
$$\gamma_j = \frac{2\sigma_j f k_j |A_j| (1-i)}{3\pi \sinh(2k_j h) \sinh(k_j h)} \quad (45)$$

con $f = 4 f_\omega$, donde $f_\omega = 0.01$ (f_ω es el coeficiente de Darcy-Weisbach para olas).

3.2.8.3. Fondos porosos de arena

La mayoría de los fondos son porosos y el oleaje induce un flujo en el interior del lecho. El resultado es un amortiguamiento debido al flujo de Darcy en la arena. Para lechos caracterizados por un coeficiente de permeabilidad dado, C_p , se puede demostrar que el amortiguamiento viene dado por:

$$\gamma_j = \frac{g k_j C_p (1-i)}{\cosh^2(k_j h)} \quad (46)$$



El coeficiente de permeabilidad, C_p , tiene unidades de (m^2) y es del orden de $4.5 \cdot 10^{-11} m^2$. Liu and Dalrymple (1984), demostraron que para arenas muy permeables, la amortiguación está en relación inversa con C_p y que, por lo tanto, debe utilizarse una expresión diferente para γ . Sin embargo, este caso no se suele dar en la naturaleza.

3.2.8.4. Rotura del oleaje

Sin duda, la rotura del oleaje es uno de los fenómenos más significativos de la hidrodinámica costera ya que afecta a diferentes procesos costeros naturales tales como las corrientes litorales y el transporte de sedimentos. La rotura del oleaje, que principalmente se produce en la zona de "surf" al disminuir el calado; también puede producirse en aguas más profundas por peraltamiento de la ola, siendo un fenómeno altamente no lineal y disipativo.

El análisis de la rotura del oleaje es fundamental para un modelo de propagación en zonas costeras y debe servir para determinar la pérdida de energía sufrida. En general, los modelos de disipación del oleaje en rotura pueden clasificarse en dos categorías:

- modelos de disipación asociado a la propagación de bores;
- modelos que determinan la variación espacial de la energía de las olas o de la "acción de onda".

El modelo Oluca-SP permite seleccionar entre tres modelos, dos de la primera categoría (Battjes y Janssen, 1978 y Thornton y Guza, 1983) y otro de la segunda categoría (Winyu y Tomoya, 1998).

Cuando el oleaje se aproxima a profundidades reducidas cercanas a la zona de rotura, domina fundamentalmente el asomeramiento y la refracción debido al contorno del fondo. Se incrementan las velocidades y se genera disipación debido principalmente a la fricción del fondo y percolación.

Dadas las características aleatorias del oleaje en un estado de mar (diferentes amplitudes, períodos y fases), no existe un punto de rotura, sino una zona de rotura donde en cada punto existen olas rotas y no rotas, siendo la turbulencia el principal mecanismo de disipación. Con lo cual, el proceso de disipación de energía del oleaje asociado a un porcentaje de olas rompiendo en una profundidad dada, se encuentra ligado a las propiedades estadísticas del estado de mar en dicho punto (altura de ola significativa, H_s o altura de ola cuadrática media H_{rms}).

El Oluca-SP resuelve numéricamente el sistema mediante avances espaciales en el dominio, en cada paso, propaga todas las componentes de energía, las cuales recompone linealmente para obtener H_s o H_{rms} (asociadas a un estado de mar). Siendo esta información estadística, la que se emplea como entrada al modelo de disipación de energía debido a la rotura. El Oluca-SP aplica una aproximación espectral al proceso de rotura del oleaje sin considerar la rotura individual de las componentes propagadas.

Si consideramos un modelo lineal de asomeramiento para una componente de ola de frecuencia j y dirección l (Chawla et al., 1998), tenemos:

$$C_{gj} \frac{\partial A_{jl}}{\partial x} + \frac{1}{2} \frac{\partial C_{gj}}{\partial x} A_{jl} = 0 \quad (47)$$

Si incluimos un término de amortiguamiento con el fin de simular la rotura de dicha ola, se obtiene la siguiente ecuación de evolución:

$$C_{gj} \frac{\partial A_{jl}}{\partial x} + \frac{1}{2} \frac{\partial C_{gj}}{\partial x} A_{jl} = -\alpha A_{jl} \quad (48)$$

obteniéndose la siguiente ecuación de energía:

$$\frac{\partial \left(C_{gj} |A_{jl}|^2 \right)}{\partial x} = -2\alpha |A_{jl}|^2 \quad (49)$$

Sumando componentes a lo largo de las frecuencias y direcciones, obtenemos:

$$\frac{\partial \left(\sum_{j=1}^{N_f} C_{gj} \sum_{l=1}^{N_\theta} |A_{jl}|^2 \right)}{\partial x} = -2\alpha \sum_{j=1}^{N_f} \sum_{l=1}^{N_\theta} |A_{jl}|^2 \quad (50)$$

Definiendo a partir de una distribución de altura de olas de Rayleigh, la altura de ola media cuadrática H_{rms} :

$$H_{rms}^2 = 4 \sum_{j=1}^{N_f} \sum_{l=1}^{N_\theta} |A_{jl}|^2 \quad (51)$$

Sustituyendo (51) en (50), obtenemos:

$$\frac{\partial \left(\sum_{j=1}^{N_f} C_{gj} \sum_{l=1}^{N_\theta} |A_{jl}|^2 \right)}{\partial x} = -\frac{1}{2} \alpha H_{rms}^2 \quad (52)$$

Por otro lado, como se verá más adelante, tanto los modelos de disipación de energía para ondas monocromáticas, como los modelos de oleaje, plantean un balance de flujo de energía de la siguiente forma:

$$\frac{\partial EC_g}{\partial x} = -\overline{D} \quad (53)$$

Donde D es la tasa media temporal de disipación de energía por unidad de área, debido a la rotura del oleaje, y EC_g el flujo de energía expresado como:

$$EC_g = \frac{1}{2} \rho g \sum_{j=1}^{N_f} C_{gj} \sum_{l=1}^{N_\theta} |A_{jl}|^2 \quad (54)$$

Sustituyendo (54) en (53) y luego ésta en (52), se obtiene la siguiente relación:

$$\alpha = \frac{4\overline{D}}{\rho g H_{rms}^2} \quad (55)$$



Los modelos de disipación de energía del tipo (53), pueden ser incluidos dentro de las ecuaciones del modelo parabólico mediante el término αA_{jl} en (20), aplicando la expresión de α definida en (55).

3.2.8.5. Modelo de disipación de Battjes y Janssen, 1978 (MBJ)

Este modelo predice la transformación de la altura de ola media cuadrática H_{rms} debido a la disipación por rotura del oleaje. Se fundamenta en la hipótesis que la distribución de las alturas de ola, asociada a un H_{rms} , son del tipo Rayleigh. Dicha distribución de alturas de ola es truncada, a partir de una altura de ola máxima que permite una profundidad dada. Esta energía truncada permite calcular la tasa de energía media a ser disipada, $\bar{D}$.

Dentro de este modelo deben distinguirse dos aspectos: La tasa de disipación por rotura de una sola onda independiente, y la probabilidad de ocurrencia de olas rompiendo de un estado de mar, en una profundidad dada. En cuanto a la primera, tal como lo plantean muchos autores (por ejemplo, Stoker, 1957; Le Méhauté, 1962; Battjes et al., 1978), la energía disipada en el proceso de rotura de una onda se asocia a la energía disipada por un “bore” en flujo uniforme. Esto permite definir una relación del orden de magnitud de la tasa de disipación de energía por unidad de área D :

$$D \approx 1/4 f \rho g \frac{H_b^3}{h_b} \quad (56)$$

Donde f es la frecuencia de la onda, ρ la densidad de masa del agua, g la aceleración de la gravedad, H_b la altura de ola (cresta-seno) cuando rompe y h_b la profundidad donde rompe la onda.

En cuanto al segundo aspecto, dado que la anterior tasa de disipación se aplica para una onda monocromática, su extensión a un oleaje (escrito como D) debe tener en cuenta la aleatoriedad de las olas y el hecho de que no todas las olas que pasan por un punto rompen.



Por lo tanto, el modelo MBJ asume como hipótesis que:

1. La frecuencia de pico asociada al espectro de energía de entrada f_p , se usa como frecuencia f en (56). Lo que presupone que la disipación es independiente de la frecuencia.
2. H_b es la máxima altura de onda monocromática que pasa sin romper, en un punto con profundidad, h_b . El MBJ aplica una expresión del tipo Miche (1954) para definir (H_b/h_b) , como se verá más adelante.
3. $H_b/h_b \sim 0$ (1) en la zona de rompientes.
4. La distribución de alturas de ola en la zona de rotura, se asume del tipo Rayleigh. Ésta al ser truncada para $H > H_b$ permite definir una expresión para la fracción de olas rotas Q_b , en una determinada profundidad.
5. Todas las olas rotas tienen una altura de ola igual a H_b .
6. Solo se considera el balance de flujo de energía en la dirección x (53).
7. No tiene en cuenta la recomposición de olas en perfiles con barras.

Con lo cual, la tasa de disipación media de un oleaje D se plantea como:

$$\bar{D} = \frac{a_1}{4} Q_b f_p \rho g H_b^2 \quad (57)$$

Donde a_1 es una constante de orden uno. Si no tenemos en cuenta en (57) Q_b , ésta sería la disipación de una onda de altura H_b . Cuando se incluye Q_b (Q_b = número de olas rotas en un punto / número de olas totales), estamos obteniendo la disipación total dividida entre todas las componentes, con lo cual, $\bar{D}$ es una disipación media asociada a cada una de las componentes del oleaje.

3.2.8.6. Altura de ola de rotura, H_b

El MBJ aplica el modelo de Miche (1954), con una ligera modificación al incluir el parámetro de rotura γ :

$$H_b = 0.88 k_p^{-1} \tanh \left(\frac{\gamma k_p h}{0.88} \right) \quad (58)$$



Donde k_p es el número de onda definido a partir de la relación de dispersión lineal, con la frecuencia pico inicial (f_p), h es la profundidad local del agua y g la relación de altura de ola y profundidad del agua ($\gamma = H_b/h$). Obsérvese en (58) que para profundidades muy reducidas (h pequeño, $H_b \sim \gamma h$).

Battjes y Stive (1985) utilizando datos de campo y ensayos de laboratorio de pequeña y gran escala, calibraron el parámetro g en (58) que mejor ajustaba D , para esto fijaron $\alpha_1 = 1$ en (57). La expresión que obtuvieron fue la siguiente:

$$\gamma = aa1 + bb1 \tanh(33S_o) \quad (59)$$

Nairn (1990) incluye una serie de datos de bajo peralte de ola, medidos en Leadbetter beach, California, obteniendo el siguiente ajuste:

$$\gamma = 0.39 + 0.56 \tanh(33S_o) \quad (60)$$

En el capítulo 5 de validación del Oluca-SP, se prueban estas dos expresiones, obteniéndose resultados muy similares. A partir de estas pruebas, se ha dejado (60) como fija dentro del modelo.

3.2.8.7. Fracción local de olas rotas, Q_b

Tal y como se ha indicado dijo anteriormente, el MBJ asume que la función de probabilidad de distribución de altura de olas (rotas o no rotas) en un punto dado, es del tipo Rayleigh. En aguas reducidas, la distribución de Rayleigh se trunca para $H > H_b$, siendo necesario asumir una distribución de probabilidad de la energía de olas rotas. Battjes y Janssen asumen como hipótesis que todas las olas rotas tienen una altura de ola igual a H_b , pero con una función delta en H_b que representa las olas rotas. Con esta hipótesis puede ser demostrado que la probabilidad de ocurrencia de olas rotas, Q_b , está relacionada con H_{rms} y H_b (ver detalles en Battjes y Janssen, 1978), obteniéndose la siguiente expresión:

$$\frac{1 - Q_b}{-\ln Q_b} = \left(\frac{H_{rms}}{H_b} \right)^2 \quad (61)$$



Q_b puede ser resuelta en esta relación aplicando el método Newton-Raphson. En (61) cuando el oleaje representado por H_{rms} es muy pequeño con respecto a la altura de ola máxima local H_b , entonces $Q_b \sim 0$ lo que indica que no hay olas rompiendo, caso que ocurre en grandes profundidades. Si por el contrario nos acercamos a profundidades muy reducidas, H_b es pequeño frente a H_{rms} , y entonces $Q_b \sim 1$, lo que significa que todas las olas rompen.

A efectos prácticos, sustituyendo (61) en (57), es posible sustituir H_b por H_{rms} , obteniéndose la siguiente expresión:

$$\bar{D} = \frac{\alpha_1}{4} f_p \rho g H_{rms}^2 \left(\frac{-\ln Q_b}{1 - Q_b} \right) Q_b \quad (62)$$

De nuevo si sustituimos esta expresión en (55), obtenemos el coeficiente α de fricción que aplica el modelo parabólico, para cada una de las componentes de energía propagadas con (20), donde la expresión α es:

$$\alpha = \alpha_1 f_p \left[\frac{-\ln Q_b}{1 - Q_b} \right] Q_b \quad (63)$$

Al ser $\alpha_1 \neq f(f)$, implica que todas las componentes disipan por igual, hipótesis que se hace dado que el modelo no incluye interacción onda-onda. Algunos autores como (Kaihatu et al., 1995 y Kirby et al., 1996), han propuesto relaciones de α como una función de la frecuencia al cuadrado, con el fin de incluir la interacción onda-onda. Dado que estas relaciones no han sido debidamente contrastadas, no han sido incluidas dentro del modelo.

El proceso de cálculo de la disipación es el siguiente:

1. Dada la frecuencia pico f_p , y una profundidad local, se determina H_b de (58).
2. Con H_{rms} recompuesta a partir de las componentes de energía aplicando (38) y (39) y H_b , se obtiene la fracción de olas rotas Q_b en (61).



3. Se calcula a de (63) y se reincorpora dentro del modelo parabólico (20), con el cual se propagan cada una de las componentes del espectro.

Junto a las hipótesis planteadas anteriormente, es necesario incluir algunas hipótesis que se asumieron al incorporar este modelo en el OLUCA.-SP:

1. El Oluca-SP asume que el coeficiente α en (63) es constante para todas las frecuencias de las componentes de energía, debido a que el modelo Oluca-SP es lineal y no incluye la interacción onda-onda.
2. El Oluca-SP está orientado a la propagación de oleajes “swell”, dado que no se ha modificado el MBJ para tener en cuenta efectos direccionales, únicamente se considera el cambio de flujo de energía en la dirección principal de propagación x .
3. El MBJ no tiene en cuenta la recomposición de las olas en zonas posteriores a barras, sin embargo, en la práctica, un incremento en la profundidad del agua causa que la disipación decrezca.

3.2.8.8. Modelo de disipación Thornton y Guza (1983) (MTG)

Este modelo es similar al MBJ, se fundamenta en la similitud de la disipación de energía debido a la rotura del oleaje con la disipación de un “bore”, y en que la distribución de alturas de ola en un punto es del tipo Rayleigh.

El MTG aplica una relación de D similar a la (56), la cual aplicada a una onda monocromática, aparece como:

$$D \approx \frac{1}{4} f \rho g \frac{(BH)^3}{h} \quad (64)$$

donde B es un parámetro del 0(1) asociado al tipo de rotura ($B \sim 1$ la rotura es similar a la disipación del “Bore”, $B < 1$ rotura en Spilling, y $B > 1$ rotura en voluta).



La extensión de esta relación de una onda monocromática a la disipación media por rotura en un oleaje aleatorio ($\bar{D}$), supone las siguientes hipótesis:

1. La frecuencia en (64) es la asociada a f_p , asumiendo de nuevo que la disipación media de todas las componentes en un punto dado, es constante.
2. La distribución de alturas de ola en la zona de rotura es del tipo Rayleigh.
3. A diferencia del MBJ, este modelo propone una función empírica de distribución de alturas de olas rotas $P_b(H)$, la cual depende de H_{rms} , h y $\gamma=0.42$ (ver detalles en Thornton y Guza, 1983). Esta función permite definir una rotura y disipación diferente para cada componente (no todas las olas grandes están rompiendo como ocurría con el MBJ para $H > H_b$) y por otro lado, no es necesario definir una altura de ola máxima de rotura H_b .
4. Solo considera balance de flujo de energía en la dirección x (53).
5. No tiene en cuenta la recomposición de olas cuando aumenta la profundidad en la dirección de la propagación.

La expresión para ($\bar{D}$) del MTG es:

$$\bar{D} = \frac{B^3}{4h} \rho g f_p \int_0^\infty H^3 P_b(H) dH \quad (65)$$

Desarrollando matemáticamente esta expresión, se obtiene:

$$\bar{D} = \frac{3\sqrt{\pi}}{16} \rho g \frac{B^3 f_p}{\gamma^4 h^5} H_{rms}^7 \quad (66)$$

Stive (1984) afirma que la disipación similar al bore subestima la disipación por rotura entre un 30% y 50%, y recomienda para ensayos de laboratorio $B=0.8$ y campo $B=1.5$. Posteriormente, Mase y Kirby (1992), recomiendan para las constantes B y γ valores de 1 y 0.6 respectivamente. A partir de las pruebas del modelo en el capítulo 5, se concluyó que $B = 1.0$ y $\gamma = 0.6$ representan bastante bien la propagación en laboratorio y campo. Sustituyendo (66) en (55), se obtiene el parámetro de disipación α aplicado en (20):

$$\alpha = \frac{3\sqrt{\pi}}{4} \frac{f_p B^3}{\gamma^4 h^5} H_{rms}^5 \quad (67)$$

Al igual que la implementación del MBJ en el Oluca-SP, el MTG asume las mismas tres hipótesis anteriormente expuestas.

3.2.8.9. Modelo de disipación de Winyu y Tomoya (1998) (MWT)

Este modelo a diferencia de los anteriores, no asume disipación de energía por rotura similar a la del “bore”. El MWT asume un modelo de disipación similar al de Dally (1992), donde D es proporcional a la diferencia entre el flujo de energía local de una ola rompiendo y el flujo de energía estable. La diferencia es que el MWT no aplica la disipación propagando ola a ola, dado que computacionalmente es inviable, en este modelo incorporan la fracción de olas rotas Qb (la misma de Battjes et al., 1978).

La expresión para la disipación media de energía debido a la rotura del oleaje D se expresa como:

$$\bar{D} = \frac{K_5 Q_b C_p}{h} [E_m - E_s] \quad (68)$$

donde:

$$E_m = \frac{1}{8} \rho g H_{rms}^2 \quad (69)$$

$$E_s = \frac{1}{8} \rho g H_e^2 = \frac{1}{8} \rho g (\Gamma_e h)^2 \quad (70)$$

K_5 es una constante proporcional, C_p es la velocidad de fase asociada a la frecuencia pico f_p del espectro, h es la profundidad local del agua, E_m es el flujo medio de energía local, E_s es el flujo medio de energía estable, H_e es la altura de ola estable y Γ_e es el factor de estabilidad de ola para oleaje irregular.

Reemplazando (69) y (70) en (68), se obtiene la siguiente expresión:

$$\bar{D} = \frac{K_5 Q_b C_p \rho g}{8h} \left[H_{rms}^2 - (\Gamma_e h)^2 \right] \quad (71)$$

Donde el factor Γ_e es definido de forma empírica, como:

$$\Gamma_e = \exp \left[K_6 \left(-0.36 - 1.25 \frac{h}{\sqrt{L_p H_{rms}}} \right) \right] \quad (72)$$

K_6 es un coeficiente de ajuste, L_p es la longitud de onda asociada a la frecuencia pico f_p . Los límites para Γ_e se definen como: ($\Gamma_e = 0.02$ para $\frac{h}{\sqrt{L_p H_{rms}}} > 1,6$ y $\Gamma_e = 0,52$ para $\frac{h}{\sqrt{L_p H_{rms}}} < 0,04$).

La fracción de olas rotas Q_b se define como en (61), pero la altura de ola de rotura H_b es calculada aplicando el criterio de rotura de Goda (1970):

$$H_b = K_7 L_o \left\{ 1 - \exp \left[-1.5 \frac{\pi h}{L_o} (1 + 15m^{4/3}) \right] \right\} \quad (73)$$

Donde K_7 es un coeficiente de ajuste, L_o es la longitud de onda en profundidades indefinidas y asociada a f_p , y m la pendiente del fondo.

Winyu y Tomoya (1998) calibraron el modelo para determinar los valores óptimos K_5 , K_6 y K_7 . La calibración fue llevada a cabo con datos de 128 experimentos de gran escala del SUPERTANK (Kraus y Smith, 1994). Las pruebas indicaron que $K_5 = 0.10$, $K_6 = 1.60$ y $K_7 = 0.10$ dan un buen ajuste entre las alturas de ola media cuadráticas medidas y calculadas. El modelo se verificó con éxito en modelos de pequeña escala (Smith y Kraus, 1990), datos de campo del proyecto DELILAH (Smith et al., 1993), datos de campo de Thornton y Guza (1986) y las pruebas realizadas que se detallarán más adelante en el apartado de comprobaciones sobre el modelo Oluca SP.

En cuanto a su implementación dentro del Oluca-SP, se asumieron las mismas hipótesis de los modelos previos. Reemplazando (71) en (55) se obtiene la expresión de α en (20), como:

$$\alpha = \frac{K_5 C_p Q_b}{2h} \left[1 - \left\{ \frac{\Gamma_\epsilon h}{H_{rms}} \right\}^2 \right] \quad (74)$$

3.2.8.10. Zonas de tierra

Las grandes islas que cortan la superficie libre y las costas que puedan tener zonas de rotura se tratan mediante la técnica de la “película delgada” de Dalrymple, Kirby y Mann (1984). Este procedimiento permite el cálculo sencillo de las alturas de ola alrededor de islas de forma arbitraria, reemplazando las islas por bajos extremadamente someros (1 mm). La rutina de disipación reduce las alturas de ola sobre el bajo a menos de un milímetro, de manera que la energía que pasa por encima del bajo para las distintas componentes de energía resulta despreciable. De esta manera, el Oluca-SP no distingue desde el punto de vista computacional las islas de las áreas de mayor profundidad, obteniéndose sin embargo como resultado la influencia de la isla sobre el oleaje.

3.2.9. Tensores de radiación debido al oleaje irregular

Los tensores de radiación debida a un oleaje irregular se calculan con base en los tensores que generan cada una de las componentes de energía. Dichas componentes se propagan a un ángulo θ con el eje x y la suma lineal de todas éstas en un punto del dominio, determinaron las siguientes expresiones de tensores de radiación:

$$S_{xx}(x, y) = \frac{1}{2} \rho g \sum_{j=1}^{N_f} \sum_{l=1}^{N_\theta} |A_{jl}|^2 \left[n_j (1 + \cos^2 \theta_{jl}) - \frac{1}{2} \right] \quad (75)$$

$$S_{yy}(x, y) = \frac{1}{2} \rho g \sum_{j=1}^{N_f} \sum_{l=1}^{N_\theta} |A_{jl}|^2 \left[n_j (1 + \sin^2 \theta_{jl}) - \frac{1}{2} \right] \quad (76)$$

$$S_{xy}(x, y) = \frac{1}{4} \rho g \sum_{j=1}^{N_f} \sum_{l=1}^{N_\theta} |A_{jl}|^2 n_j \sin(2\theta_{jl}) \quad (77)$$

Donde S_{xx} es el tensor de radiación actuando en el plano x a lo largo del eje x ; S_{yy} es el tensor de radiación actuando en el plano y a lo largo del eje y ; S_{xy} es el tensor de radiación actuando sobre el plano y a lo largo del eje x (por simetría $S_{xy} = S_{yx}$); n_j es la relación de la velocidad de grupo C_{gj} con respecto a la velocidad de fase C_j de la componente frecuencial j ; n_j es dada en términos del número de onda K_j y la profundidad local de agua h , como:

$$n_j = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2K_j h}{\sinh(2K_j h)} \right) \quad (78)$$

Con el fin de definir un ángulo medio q del espectro en cada punto (x, y) del dominio, el Oluca-SP estima q con base en la dirección media del tensor S_{xy} calculado con (77), la frecuencia pico y la altura de ola significativa en el punto. El ángulo θ se define como:

$$\bar{\theta} = \frac{1}{2} \arcsen \left(\frac{2S_{xy}}{E n_p} \right) \quad (79)$$

Donde n_p está asociada a la frecuencia pico f_p . Asumiendo una distribución de alturas de ola de Rayleigh, la altura de ola significativa H_s y la energía del oleaje se definen como:

$$H_s^2 = 8 \sum_{j=1}^{N_f} \sum_{l=1}^{N_\theta} |A_{jl}|^2 = 2H_{rms}^2 \quad (80)$$

$$E = \frac{1}{2} \rho g \sum_{j=1}^{N_f} \sum_{l=1}^{N_\theta} |A_{jl}|^2 \quad (81)$$

Reemplazando (80) en (81) se encuentra que:

$$E = \frac{1}{16} \rho g H_s^2 = \frac{1}{8} \rho g H_{rms}^2 \quad (82)$$

Que al sustituir esta expresión en (79), se obtiene la relación θ que calcula el Oluca-SP:

$$\bar{\theta}(x, y) = \frac{1}{2} \arcsen \left[\frac{32S_{xy}}{\rho g H_s^2 n_p} \right] \quad (83)$$

3.2.10. Espectro bidimensional de entrada

El oleaje asociado a un estado de mar se define a partir de un espectro bidimensional (S), el cual se localiza en el contorno exterior del dominio (mar adentro), dicho espectro se compone de un espectro frecuencial (E) y una función de dispersión dirección (D), tal como se muestra a continuación:

$$S(f, \theta) = E(f, h) \cdot D(\theta) \quad (84)$$

3.2.10.1. Espectro frecuencial TMA (Bouws et al., 1985)

El modelo Oluca-SP permite dos maneras de definir el espectro frecuencial, una mediante la lectura de un archivo externo, y otra a partir de un espectro TMA (Texel Marsen Arsloe). El espectro TMA (E_{TMA}) se aplica en zonas cercanas a la costa donde las profundidades son relativamente poco profundas y las olas son afectadas por el fondo, se define a partir de un espectro JONSWAP (E_{JON}), el cual es modificado por una función adimensional de la profundidad F_k (Hughes, 1984), siendo su expresión como se muestra a continuación:

$$E_{TMA}(f, h) = E_{JON}(f) \cdot \Phi_k(\omega_h) \quad (85)$$

con:

$$E_{JON}(f) = E_p(f) \phi_{pm} \left(\frac{f}{f_p} \right) \phi_j(f, f_p, \gamma, \sigma) \quad (86)$$

$$E_p = \alpha g^2 (2\pi)^{-4} f^{-5}$$

$$\phi_{pm} = \exp \left[\frac{-5}{4} \left(\frac{f}{f_p} \right)^{-4} \right]$$

$$\phi_j = \exp \left[\ln(\gamma) \exp \left(-\frac{(f - f_p)^2}{2\sigma^2 f_p^2} \right) \right]$$

$$\sigma = \begin{cases} 0.07 & f \leq f_p \\ 0.09 & f > f_p \end{cases}$$

$$\Phi_k = \begin{cases} 0.5\omega_h^2 & \omega_h \leq 1 \\ 1.0 & \omega_h \geq 2 \\ 1 - 0.5(2 - \omega_h)^2 & 1 < \omega_h < 2 \end{cases} \quad (87)$$

donde f es la frecuencia (Hz), f_p la frecuencia pico, g es la aceleración de la gravedad, α la constante de Phillips, que se escala para obtener la altura de ola media cuadrática, γ es un factor que define la anchura del espectro ($\gamma \sim 10$ para oleajes Swell; $\gamma = 2 \sim 4$ oleajes sea), y ω_h es la frecuencia angular normalizada por la profundidad de agua h , y definida como:

$$\omega_h = 2\pi f \left(\frac{h}{g} \right)^{1/2} \quad (88)$$

La condición $\omega_h \geq 2$ en (87), convierte el espectro TMA en un espectro JONSWAP, condición que se presenta en profundidades indefinidas.



3.2.10.2. Función de dispersión direccional normalizada (Borgman, 1984)

La distribución angular de ondas individuales de un espectro en el OlucaSP, se describe a partir de la siguiente función:

$$G(\theta) = \frac{1}{2\pi} + \frac{1}{\pi} \sum_{j=1}^J \left\{ \exp \left[-\frac{(j\sigma_m)^2}{2} \right] \cos j(\theta - \theta_m) \right\} \quad (89)$$

Donde θ_m es la dirección media del oleaje, J un número arbitrario de armónicos para representar la serie de Fourier (valor seleccionado en el Oluca-SP $J = 100$) y σ_m el parámetro que determina el ancho de la dispersión direccional. Esta expresión que ha sido aplicada con buenos resultados por diferentes actores (Vicent et al., 1989; Panchang et al., 1990, Pae et al., 1992; Chawla et al., 1998).

3.2.10.3. Parámetros de entrada al espectro bidimensional

Espectro TMA:

h = profundidad (m)

H_s = altura de ola significativa (m)

f_p = frecuencia pico (Hz)

γ = factor de ensanchamiento del pico.

Función de dispersión direccional:

θ_m = dirección media del oleaje (grados),

σ_m = ancho del espectro (grados).



3.2.11. Hipótesis del modelo de propagación

1. Fluido

- No viscoso
- Incompresible
- Densidad constante

2. Flujo

- Irrotacional
- Estacionario

3. Dinámicas

- Presión constante en la superficie libre
- No se considera la acción del viento
- No se considera la acción de Coriolis

4. Contornos

- Fondo de pendiente suave:

El desarrollo matemático de las ecuaciones del modelo, se plantean con la hipótesis de que las variaciones del fondo con las coordenadas horizontales, son pequeñas en comparación con la longitud de onda. Para el modelo lineal, Berkhoff (1982) realizó una comparación entre un modelo numérico exacto y el de la ecuación de pendiente suave para ondas propagándose sobre una playa. Encontró que hasta pendientes del fondo de 1:3 el modelo de la pendiente suave es exacto y que para pendientes mayores predice adecuadamente las tendencias.

5. Propagación

- No linealidad débil:

Dependencia débil de la ecuación de dispersión con la altura de ola significativa (35); modelo no lineal Stokes-Hedges.



· Aproximación parabólica: Las componentes se propagan principalmente en una dirección (x). Con lo cual se desprecian términos $\left(\frac{\partial^2(\cdot)}{\partial x^2}\right)$. La solución es tanto más aproximada cuanto menor variación haya en la dirección x .

Esta aproximación parabólica implica varias ventajas y desventajas:

Ventajas: (1) se ha mostrado como una ecuación de gobierno correcta para la propagación de componentes lineales sobre fondos de pendientes suaves, en presencia de corrientes; (2) es una ecuación de tipo parabólico y, como tal, no necesita condiciones en todo el contorno, sino que basta con una condición inicial en el contorno desde el que se va a propagar y condiciones en los contornos laterales. Además, es una herramienta muy útil para reducir el esfuerzo y el tiempo de computación, pues pueden utilizarse esquemas implícitos de seis puntos como el de Crank-Nicholson y obtener soluciones rápidas y estables.

Desventajas: (1) limitación del ángulo de propagación del oleaje a 55° con respecto al eje principal, (x); (2) se desprecia el efecto de las ondas reflejadas; y (3) las soluciones son tanto más aproximadas cuanto menor variación haya respecto a esa dirección principal. El segundo inconveniente no es tan importante en la práctica, pues en la propagación del oleaje hacia la costa interesan sobre todo los efectos de la refracción y difracción.

Lee y Wang (1992), compararon cinco modelos de propagación, todos ellos basados en la ecuación para pendientes suaves: dos modelos son de tipo hiperbólico, dos de tipo elíptico y uno de tipo parabólico. Los parámetros que se evalúan en el citado trabajo son la exactitud de los resultados, el grado de dificultad computacional y su aplicabilidad práctica en función de la bondad para simular los diferentes fenómenos que tienen lugar durante la propagación del oleaje. Las ventajas del modelo parabólico son las ya comentadas: facilidad de programación, estabilidad numérica y ahorro de tiempo de computación; y sus inconvenientes son la imposibilidad de simular la reflexión del oleaje y una menor precisión de sus resultados.



Cabe destacar, como dato de referencia que no debe ser extrapolado a otros ensayos, que al analizar el experimento de Ito & Tanimoto (1972) en condiciones idénticas para los cinco modelos, el modelo parabólico, en la propagación de una onda invirtió aproximadamente 20 segundos de CPU, consumió 20 veces menos tiempo que uno de los modelos elípticos y alrededor de 50 veces menos tiempo de CPU que los modelos hiperbólicos, siendo los resultados del mismo grado de precisión para los cinco modelos.

6. Modelo de disipación por rotura

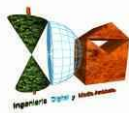
Tal y como se indicó anteriormente, cada uno de los tres modelos de disipación propuestos se sustentan sobre una serie de hipótesis, resumiéndose las más importantes desde el punto de vista de la implementación de estos modelos en el Oluca-SP, como:

- La distribución de alturas de ola dentro de la zona de rompientes es del tipo Rayleigh.
- El balance de flujo de energía se realiza en la dirección principal de la propagación, eje x.
- No existe una interacción onda-onda dado el carácter lineal del modelo, por lo tanto la disipación se asume igual para todas las componentes frecuenciales.
- El modelo está orientado a propagaciones de oleaje de espectros no muy anchos direccionalmente ($\pm 55^\circ$) (oleajes tipo del Swell). Esto es debido a las limitaciones de ángulo y también a que los modelos de disipación no presentan correcciones direccionales en los balances de flujo de energía.

3.2.12. Ecuaciones del modelo

En consecuencia de todo lo anterior, la ecuación utilizada en este modelo para modelar la propagación del oleaje considera los fenómenos de:

- (1) Asomeramiento,
- (2) refracción por fondo,
- (3) difracción,



- (4) presencia de corrientes,
- (5) disipación de energía,
- (6) rotura, y
- (7) dispersión por amplitud.

3.2.13. Comprobaciones sobre el modelo Oluca SP (MOPLA-SMC 2.5)

El modelo Oluca-SP fue comprobado aplicándolo en casos de ensayos de modelos físicos en laboratorio y casos reales en playa, para lo cual se tomaron los datos de tres diferentes ensayos realizados en laboratorio: (1) Mase y Kirby (1992), quienes llevaron a cabo la propagación de un oleaje unidireccional sobre una playa de pendiente recta; (2) los ensayos de Chawla (1995), quien propagó diferentes espectros bidimensionales (anchos y estrechos) sobre un fondo horizontal con un bajo circular; y (3) los ensayos de Vincent y Briggs (1989), quienes generaron oleaje direccional sobre una batimetría de fondo plano y un bajo elíptico. Con esta finalidad, el modelo fue comprobado con datos del experimento de campo denominado DELILAH (Duck Experiment on Low-frequency and Incident-band Longshore and Across-shore Hydrodynamics), llevados a cabo por el Coastal Engineering Research Center field Research Facility in Duck, NC, en Octubre de 1991 (ver detalles de los ensayos en Birkemeier, 1991).

De esta forma, las comprobaciones realizadas mediante la aplicación del modelo numérico Oluca-SP, fueron llevadas a cabo en:

- (1) Los ensayos de propagación de oleaje sobre una pendiente constante de Mase y Kirby (1992)
- (2) Los ensayos sobre un bajo elíptico de Vincent y Briggs (1989)
- (3) Los ensayos de Chawla (1995) sobre un bajo circular
- (4) Los ensayos en campo del experimento DELILAH, Duck, NC.

Tras dichas comprobaciones, las conclusiones que se extrajeron fueron las siguientes:

- El modelo numérico Oluca-SP simula la evolución de un espectro de oleaje sobre un fondo variable. Representa de forma aproximada los fenómenos de asomeramiento, refracción, refracción-difracción y rotura del oleaje, expresados en términos de la altura de ola significativa y la evolución espacial del espectro bidimensional.



- Los tres modelos de disipación por rotura del oleaje: (1) Thornton y Guza (1983); (2) Battjes y Janssen (1978) y (3) Winyu y Tomoya (1998), representan de manera muy similar la propagación del oleaje. De acuerdo con las diferentes pruebas de calibración de parámetros, se han definido para el modelo (1): $B = 1$ y $g = 0.6$ (parámetros propuestos por sus autores). Para el modelo (2) la variación entre parámetros es pequeña, se han definido como fijos dentro del modelo $aa1 = 0.39$, $bb1 = 0.56$ y $a1 = 1$. Finalmente, el modelo (3) aunque disipa más energía que los dos anteriores, también presenta bastante bien la evolución del oleaje, definiéndose como parámetros fijos los propuestos por sus autores ($K5 = 0.1$, $K6 = 1.6$ y $K7 = 0.1$).
- Se ha comprobado la hipótesis de asumir una distribución de alturas de ola del tipo Rayleigh, dado que la recomposición de la altura de ola significativa en cada punto del dominio, incluida la zona de rompiente, es bastante aproximada.
- Antes de un bajo sumergido donde predomina el asomeramiento, las variaciones de la altura de ola significativa dependen fundamentalmente de las características del espectro frecuencial de entrada, y muy poco de la función direccional.
- Sobre un bajo y la zona posterior a éste (donde predomina la refracción difracción), las variaciones de la altura de ola significativa dependen fundamentalmente de la función direccional inicial, más que el espectro frecuencial. Un oleaje del tipo “sea”, con una función direccional de entrada ancha, presenta una menor variación de H_s y mayor distribución de la energía en el dominio, en comparación con un oleaje del tipo “swell” o de banda direccional estrecha.
- Dado que el Oluca-SP es un modelo débilmente no lineal, no tiene en cuenta la transferencia de energía entre componentes, que unido a una disipación por rotura independiente de las frecuencias y direcciones, manifiesta pequeñas discrepancias en la altura de ola significativa en propagaciones con frentes cruzados o trenzados simultáneamente con rotura. Discrepancias no relevantes desde un punto de vista ingenieril, dada su pequeña magnitud.



3.2.14. Propagaciones hasta pie de playa de la zona de estudio

Con el software Oluca-SP (espectral), módulo integrado en MOPLA, en el paquete informático SMC 2.5, se han realizado las propagaciones, desde profundidades indefinidas hasta el pie de playa del tramo comprendido en la ensenada de Celorio, en la playa de Palombina, en el T.M. de Llanes, para cada uno de los distintos temporales preseleccionados, obteniéndose de este modo los parámetros que caracterizan los estados de mar con sus valores previos al fenómeno de rotura propagados a pie de playa; que notaremos con los subíndices H_{spp} , T_p (se mantiene el período de pico en la propagación hasta pie de costa).

Dicho software de modelado numérico aplica los fundamentos teóricos especificados en los apartados anteriores para la propagación hasta la costa, sobre la batimetría obtenida ensamblada en una base topobatimétrica-batimétrica de detalle, a partir de un MDT de alta resolución obtenido a partir de un levantamiento fotogramétrico de alta densidad en la parte emergida obtenido a partir de vuelo DRON ejecutado en enero de 2024, a partir de una batimetría de detalle de equidistancia de isobatas de 0,25 m. realizada en marzo de 2024 m. con dispositivo USV (dron marino) con equipos topográficos de precisión (GPS de precisión centimétrica multiconstelación-multifrecuencia acoplado e ecosonda trifrecuencia a 675 Khz y 7º de apertura angular) en la zona de profundidades reducidas y playa emergida hasta la +1 NMMA (batimetría ejecutada en pleamar para solapamiento con franja fotogramétrica), ampliada en su caso con la batimetría del proveedor Navionics, Sonarchart (0,5 m. en profundidades reducidas e intermedias, 1-2 m. en intermedias e indefinidas) hasta la isobata -50, y finalmente ampliada hasta profundidades indefinidas con batimetría del proveedor Emodnet hasta la posición del Punto Simar 3108040. Todos los datos altimétricos fueron tratados informáticamente para su ensamblaje con especial atención a las zonas de enlaces (cases) altimétricos y planimétricos de las distintas franjas, así como tratados (los que tenían como referencia altimétrica la BMVE) en el plano de comparación altimétrico a la referencia del NMMA y homogeneizados en un mismo formato de MDT digital y único fichero completo topo-batimétrico. Asimismo los procesos posteriores de cálculos de perfiles del frente de playa y propagación sobre costa emergida de la línea de inundación, fueron obtenidos con herramientas informáticas sobre este MDT topo-batimétrico con referencia al N.M.M.A. generado.



Para el proceso computacional de propagación del oleaje, se diseña mediante el software una concatenación de mallas de puntos que comprende hasta la zona de estudio y procede desde la conexión con el Punto Simar 3108040 fuente de datos cuya ubicación se corresponde con una zona de profundidades indefinidas, un sector batimétrico completo para recibir las propagaciones de los estados de mar seleccionados desde una dirección de procedencia en aguas profundas del entorno NO hasta la ensenada de Celorio, obteniéndose como resultado final los valores propagados del temporal para cada uno de los puntos de la última malla, que es la de mayor resolución y que comprende hasta pie de costa de la playa de Palombina en dicha ensenada, en el T.M. de Llanes, Asturias.

De esta forma las mallas se han diseñado en un conjunto direccional con una extensión y orientación, tal que la concatenación permitió ejecutar las propagaciones de los 7 estados de mar procedentes del sector de procedencia NO, analizados y seleccionados en función del clima marítimo del tramo de costa. La selección de los 7 estados de mar que según el análisis previo antes de propagación del oleaje sobre la serie completa de los estados de mar analizados, han proporcionado los mayores potenciales de inundación sobre el tramo de estudio en el período de 5 años 2014-2018 con comprobación adicional de dos estados de mar de 2023 y 2024, permitirá tras la propagación de los mismos y la ejecución de los modelos de inundación sobre la playa, la determinación final y confirmación del período de 5 años entre 2014 y 2018 y la obtención de un 5º nivel de dicho período por perfil, a partir de datos reales de cálculo.

Se tomarán como valores finales del oleaje propagado a pie de playa los resultantes en nodos de dicha malla final de detalle que se encuentran en posiciones a las que corresponden profundidades por encima de las de rotura, al objeto de obtener los valores de altura de ola propagados a pie de playa, antes de rotura, como valores de entrada o imput para su posterior introducción en las formulaciones semiempíricas que proporcionarán los valores de run-up.

A continuación se recogen las exportaciones que genera el citado software del modelo numérico Oluca-SP, MOPLA, SMC 2.5 tras ejecutar las propagaciones con los parámetros del oleaje que caracterizan los estados de mar de los estados de mar seleccionados en el período de estados de mar analizados (1995-actualidad) dentro de un período en el que se encuentran los cinco estados de mar de mayor potencial de inundación antes de propagación entre 2014 y 2018, así como dos estados de mar de 2023 y 2024 para comprobar que el período determinado contiene el quinto nivel.



Dichas exportaciones, además de la batimetría en cada una de las mallas desde profundidades indefinidas hasta la playa emergida de Palombina en la ensenada de Celorio (en seis fichas, dos por cada malla con la batimetría correspondiente incluida en cada una en 2D y 3D respectivamente), reflejan los resultados de las propagaciones desde las proximidades a profundidades indefinidas en la ubicación del Punto Simar 3108040 hasta la misma playa de Palombina en la ensenada de Celorio, en los nodos de las mallas concatenadas de propagación que comprenden en su dominio (extensión de filas x columnas) un sector direccional que integra las direcciones de procedencia desde aguas profundas hasta pie de playa, en forma de vectores direccionales cuya dirección es el resultado del ángulo propagado en el nodo, y la magnitud del módulo del vector se corresponde a una escala determinada en el gráfico con el valor de la Hs propagada en el mismo nodo. Las mallas generadas se denominan AA, BB (arrancan desde a profundas y avanzan por intermedias) y CC (malla del último tramo de propagación, que comprende profundidades intermedias y reducidas, y franja de rompientes), correspondiéndose los resultados propagados que se reflejan en los planos, a los datos propagados de los nodos de la malla de detalle (denominada CC).

Previamente se incluyen las exportaciones de la series de mallas según el diseño de propagación encadenado sobre el MDT topobatimétrico cargado en el módulo Oluca-SP espectral, integrado por 3 mallas, que van aumentando su resolución, desde las profundidades indefinidas hasta la zona de rompientes a pie de costa hasta la playa emergida de Palombina en la ensenada de Celorio, incluyendo en su extensión la interacción con el fondo y calculando los efectos de los distintos fenómenos que incidirán sobre el oleaje durante su propagación, incluyendo hasta las disipaciones de energía en la rotura.

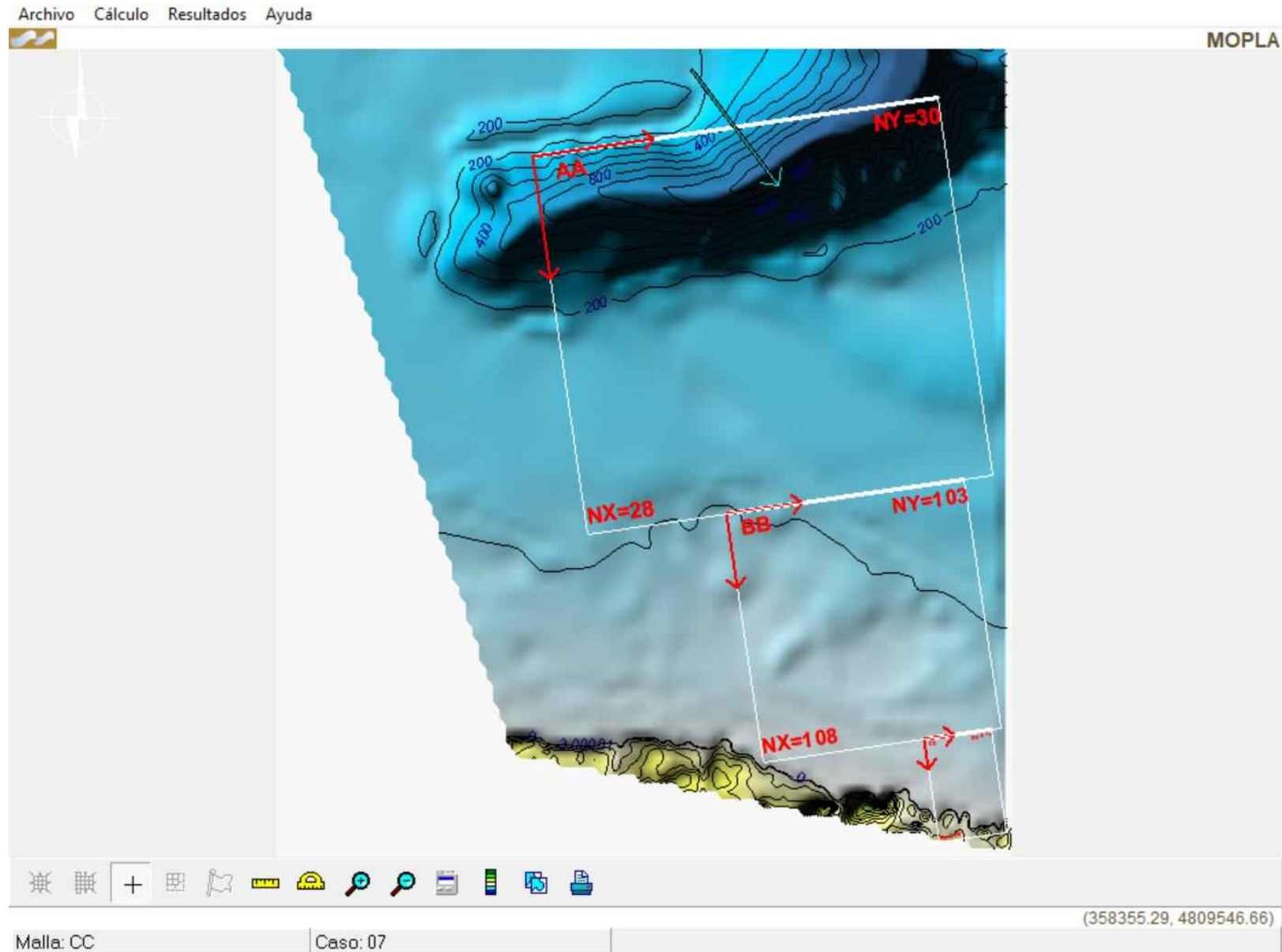


INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)

C/ Cañadilla 6, local 68, C. Comercial Coronado, Las Rozas de Madrid 28231, Madrid

Pza. de la Montañeta 4, entresuelo, 03001 Alicante

Tfno.: 918961731; Fax: 918903410; e-mail: idyma@idyma.es



Mallas de propagación (encadenado) desde profundidades indefinidas hasta la costa en playa de Palombina en la ensenada de Celorio, T.M. de Llanes Asturias.

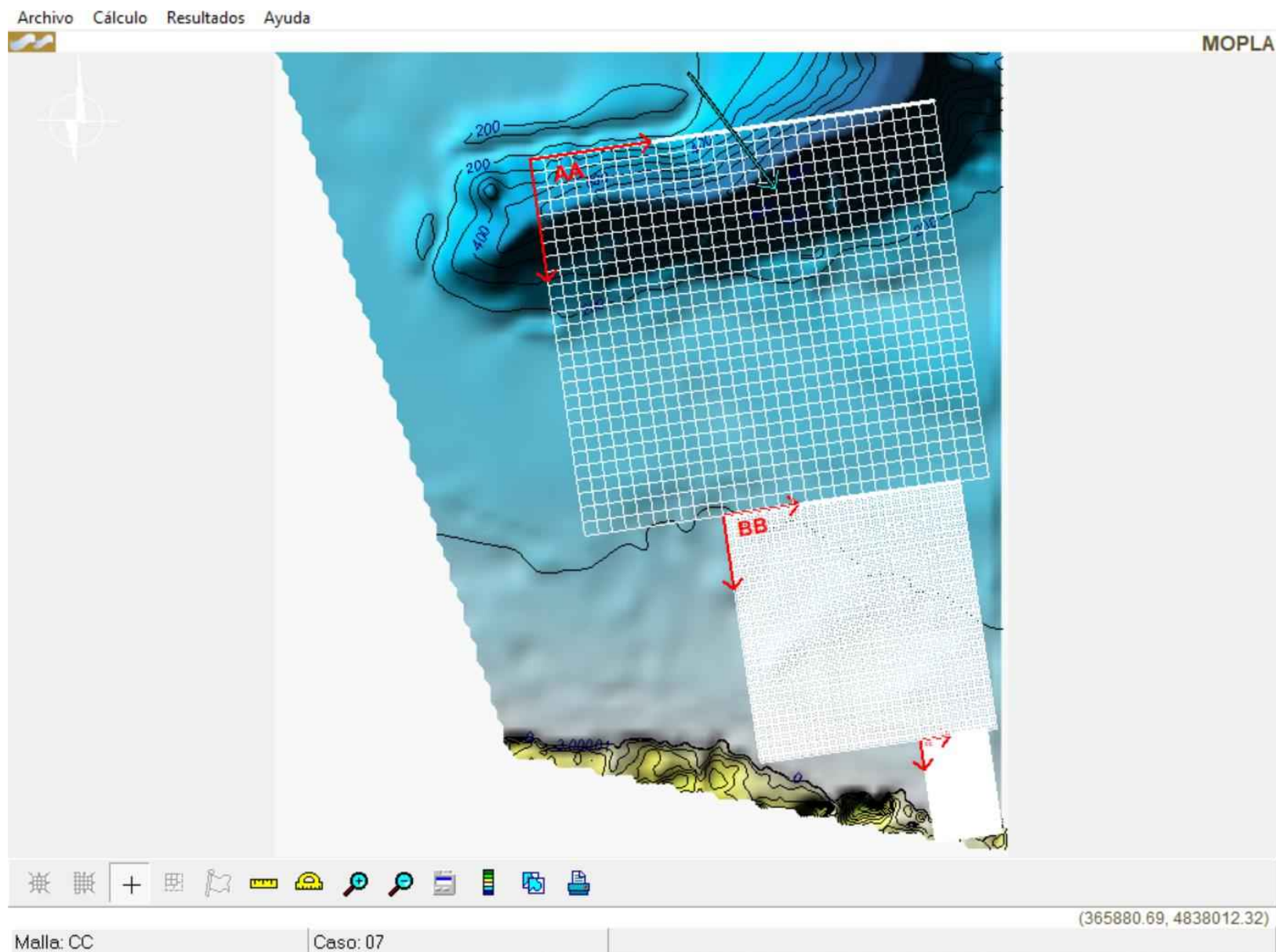


INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)

C/ Cañadilla 6, local 68, C. Comercial Coronado, Las Rozas de Madrid 28231, Madrid

Pza. de la Montañeta 4, entresuelo, 03001 Alicante

Tfno.: 918961731; Fax: 918903410; e-mail: idyma@idyma.es



Mallas de propagación (encadenado) desde profundidades indefinidas hasta la costa en playa de Palombina en la ensenada de Celorio, T.M. de Llanes Asturias, con nodos de propagación..

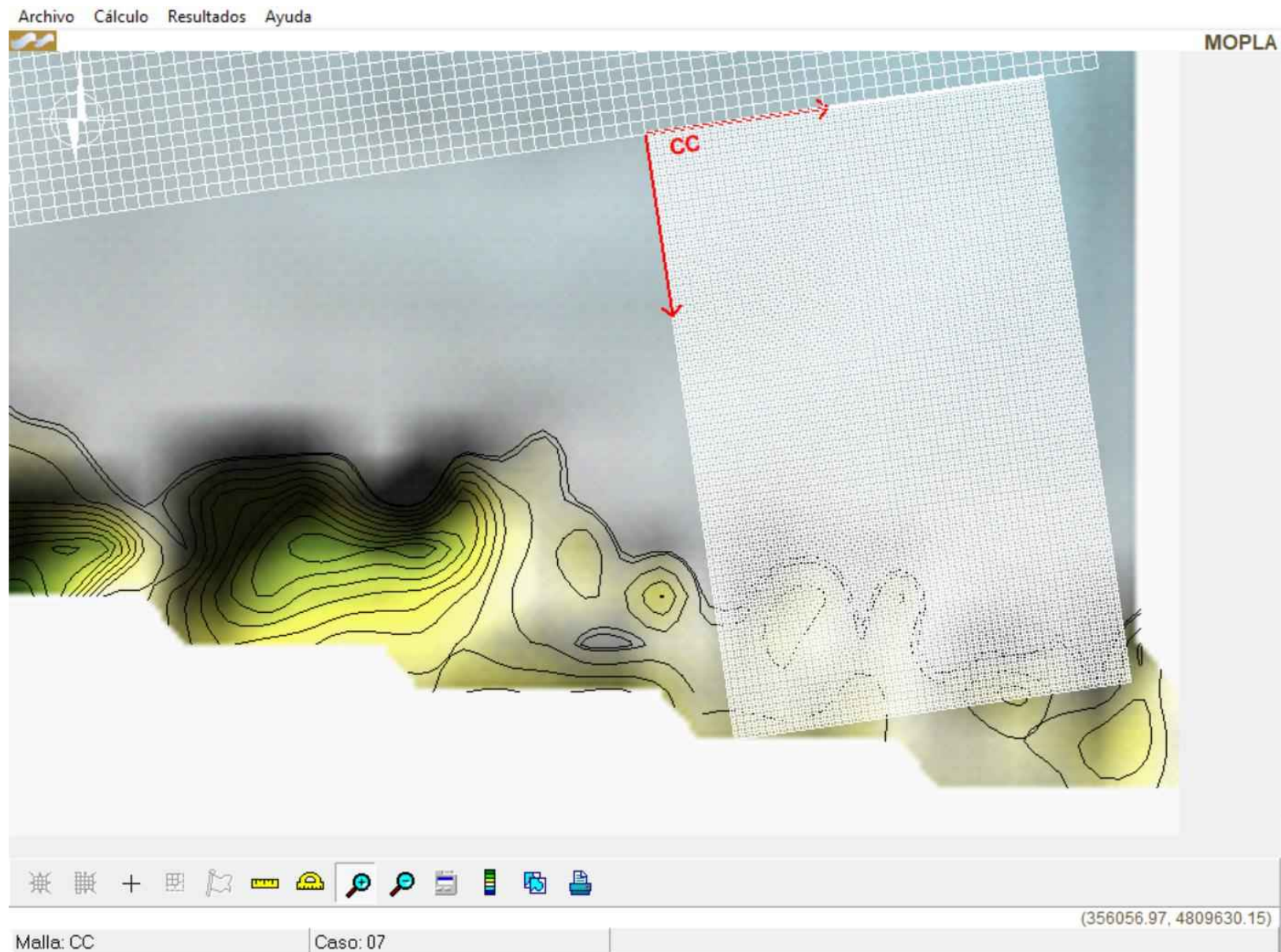


INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)

C/ Cañadilla 6, local 68, C. Comercial Coronado, Las Rozas de Madrid 28231, Madrid

Pza. de la Montañeta 4, entresuelo, 03001 Alicante

Tfno.: 918961731; Fax: 918903410; e-mail: idyma@idyma.es



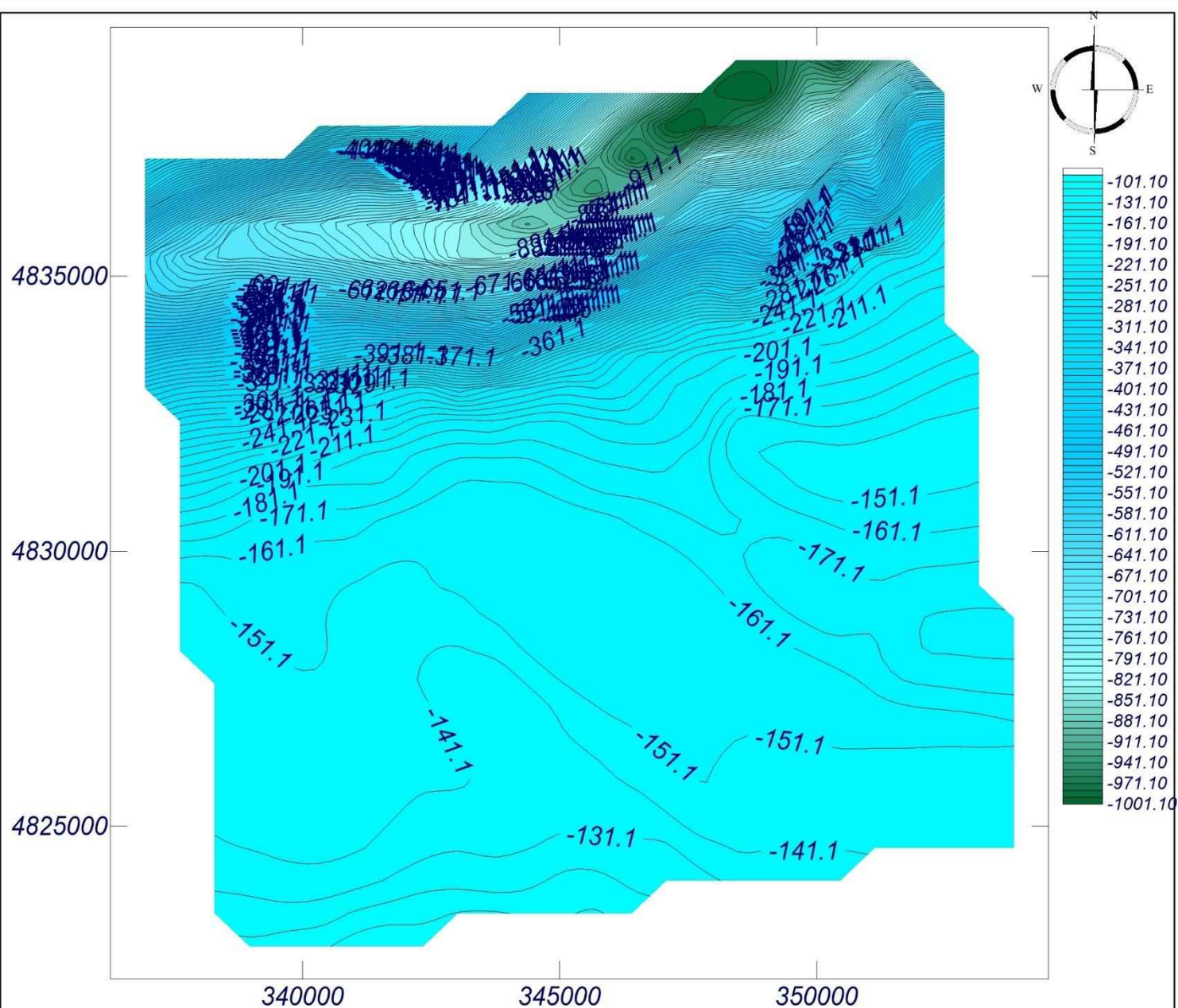
Detalle de la densidad de nodos en la última malla de propagación (A3 DETALLE) en la playa de Palombina en la ensenada de Celorio, T.M. de Llanes Asturias.

Proyecto:

Gráfico: Topografía 2D

AA:

Gráfico de topografía

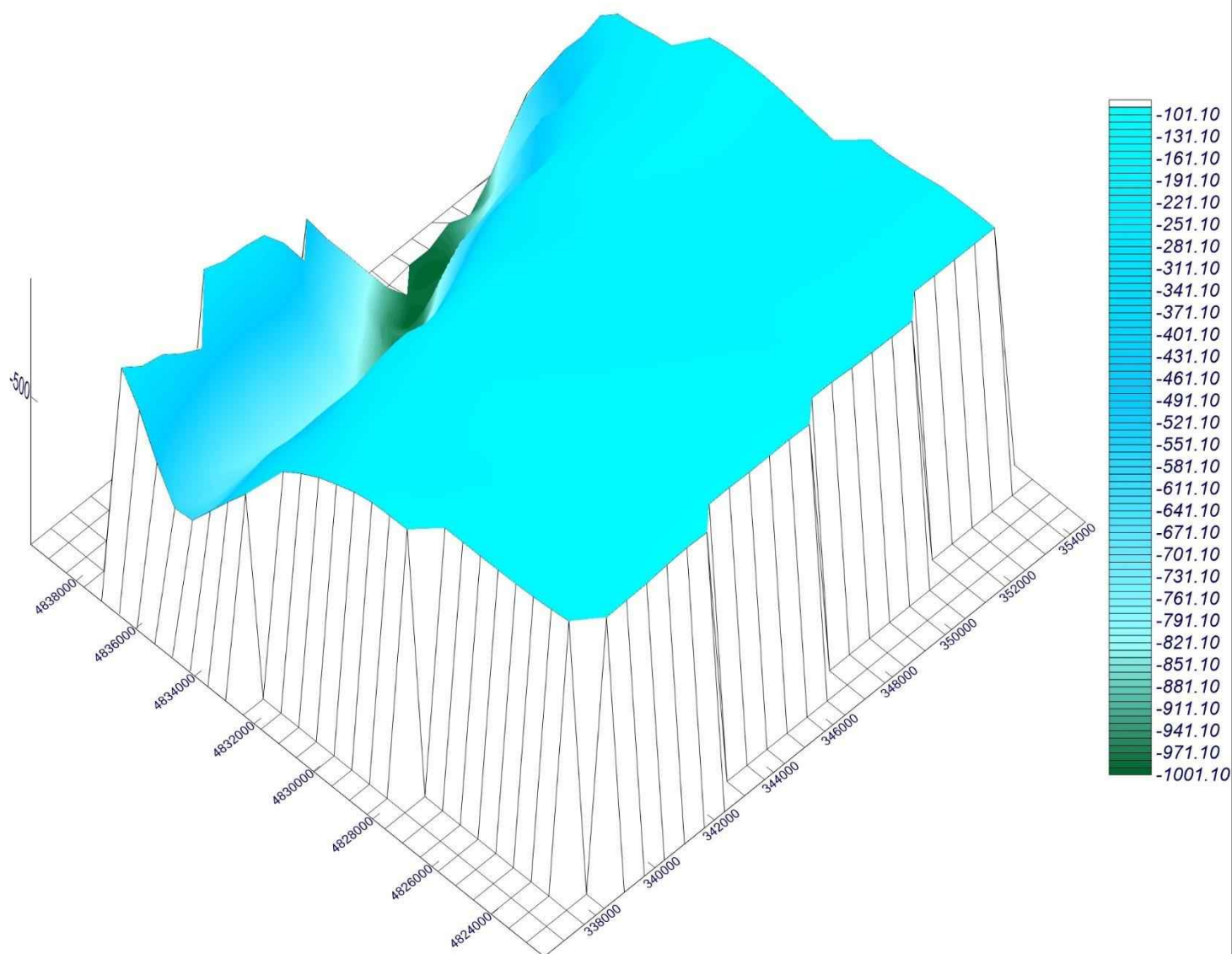


Proyecto:

Gráfico: Topografía 3D

AA:

Gráfico de topografía

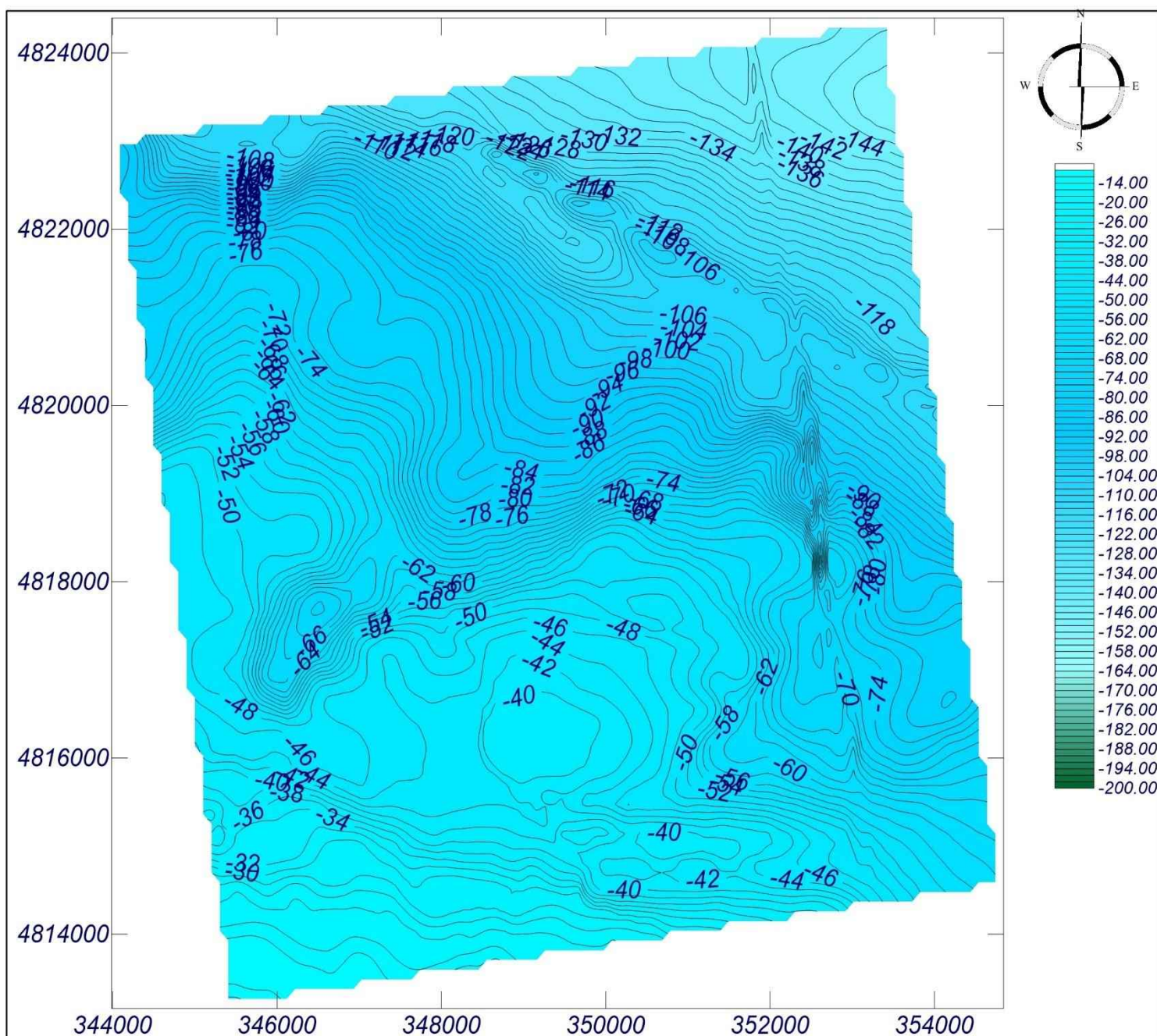


Proyecto:

Gráfico: Topografía 2D

BB:

Gráfico de topografía

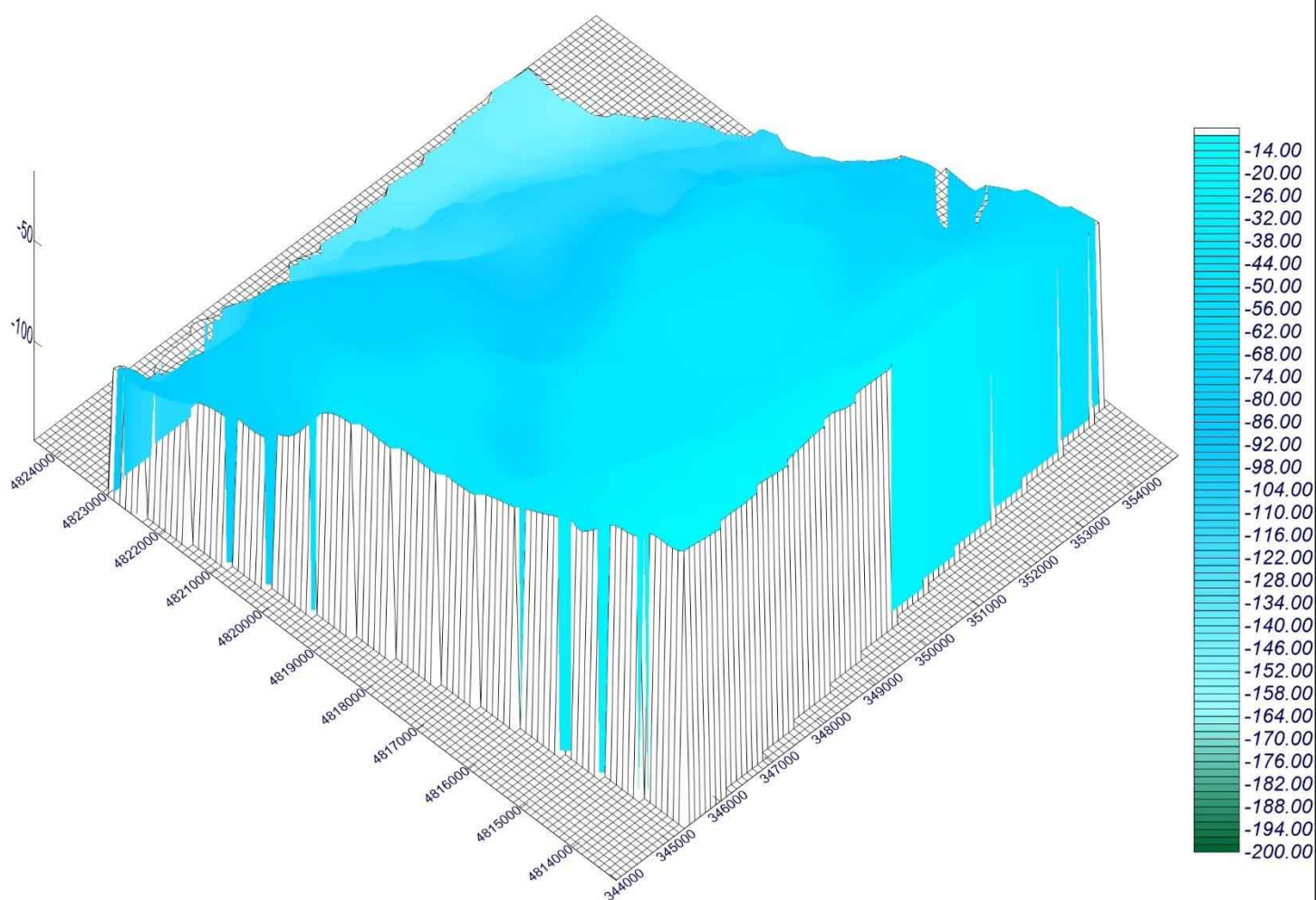


Proyecto:

Gráfico: Topografía 3D

BB:

Gráfico de topografía

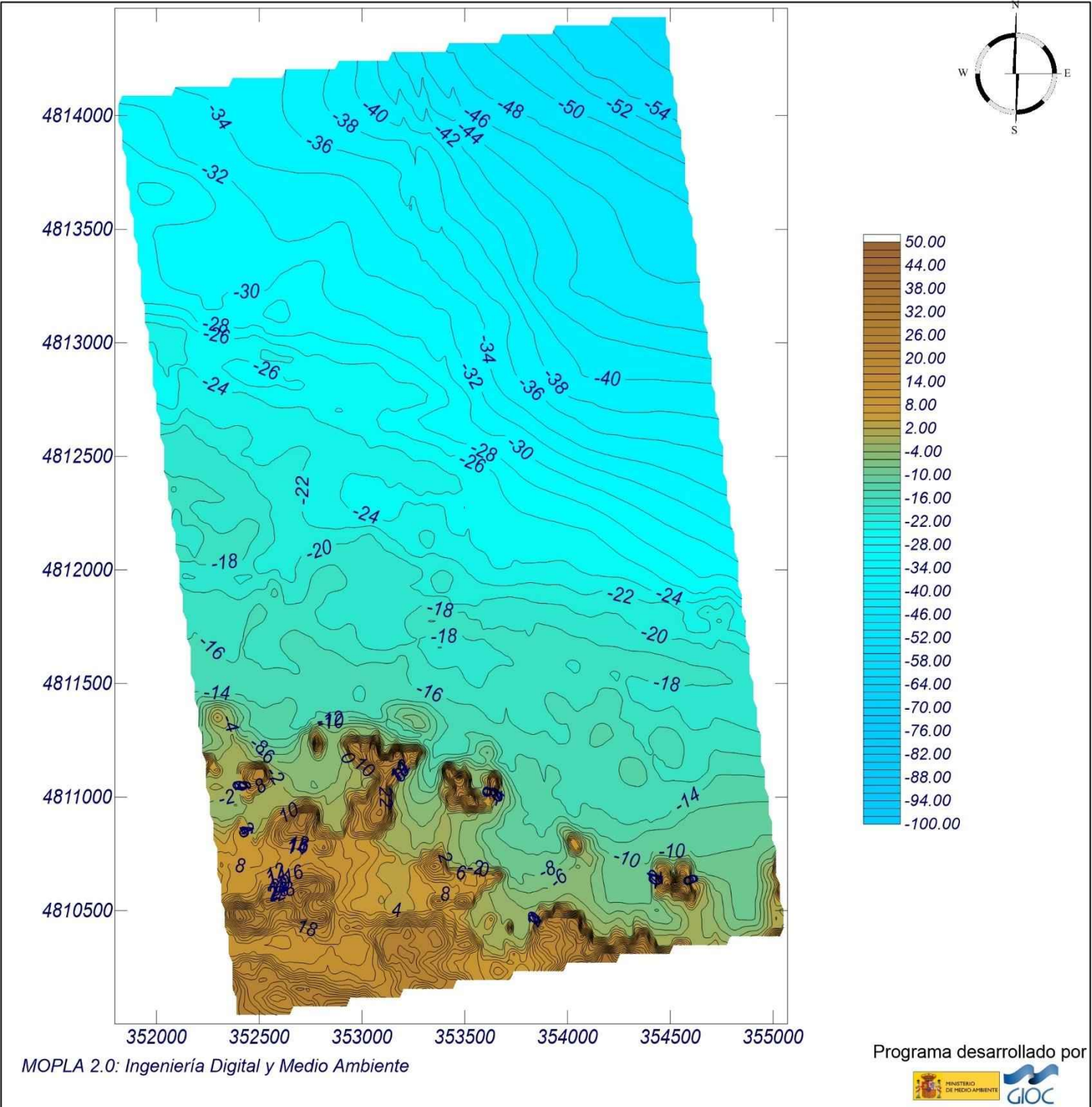


Proyecto:

Gráfico: Topografía 2D

CC:

Gráfico de topografía		

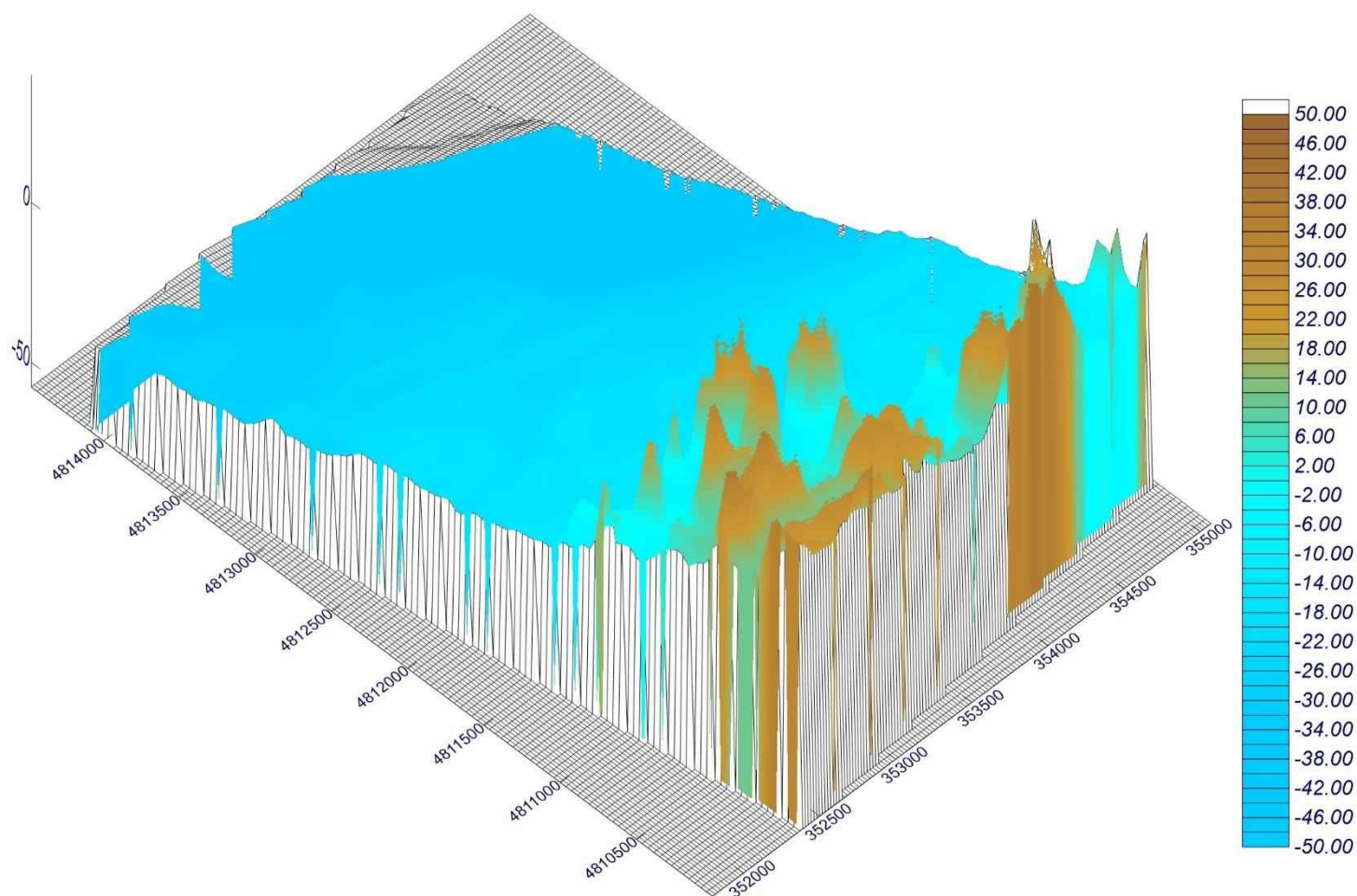


Proyecto:

Gráfico: Topografía 3D

CC:

Gráfico de topografía



Proyecto:

Gráfico: Altura de ola significativa

Caso espectral: CC04

CC:

04: 2014-02-02 05:00

Características de la simulación

OLUCA-SP

Espectro frecuencial (TMA)

Hs: 6.6 m

h: 330 m

fp: 0.0549149 Hz (Tp: 18.21 s)

γ : 10

Nº Comp.: 20

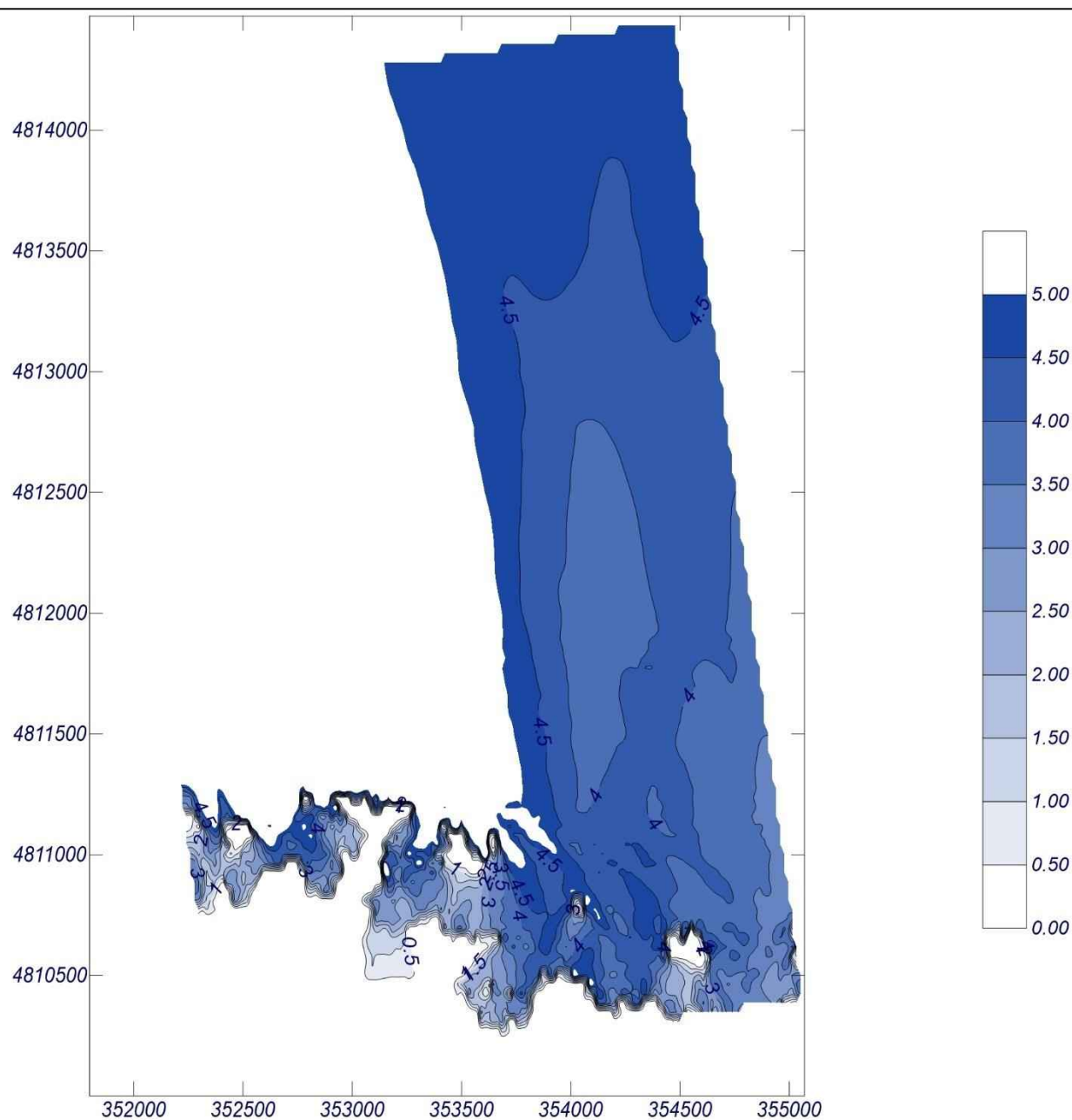
Espectro direccional

θ_m : 39.71° (N48.0W)

σ : 10° - Nº Comp.: 20

COPLA-SP

MOPLA-SP



Proyecto:

Gráfico: Altura de ola significativa

Caso espectral: CC01

CC:

01: 2014-03-03 17:00

Características de la simulación

OLUCA-SP

Espectro frecuencial (TMA)

Hs: 10.25 m

h: 330 m

fp: 0.0555864 Hz (Tp: 17.99 s)

γ : 10

Nº Comp.: 20

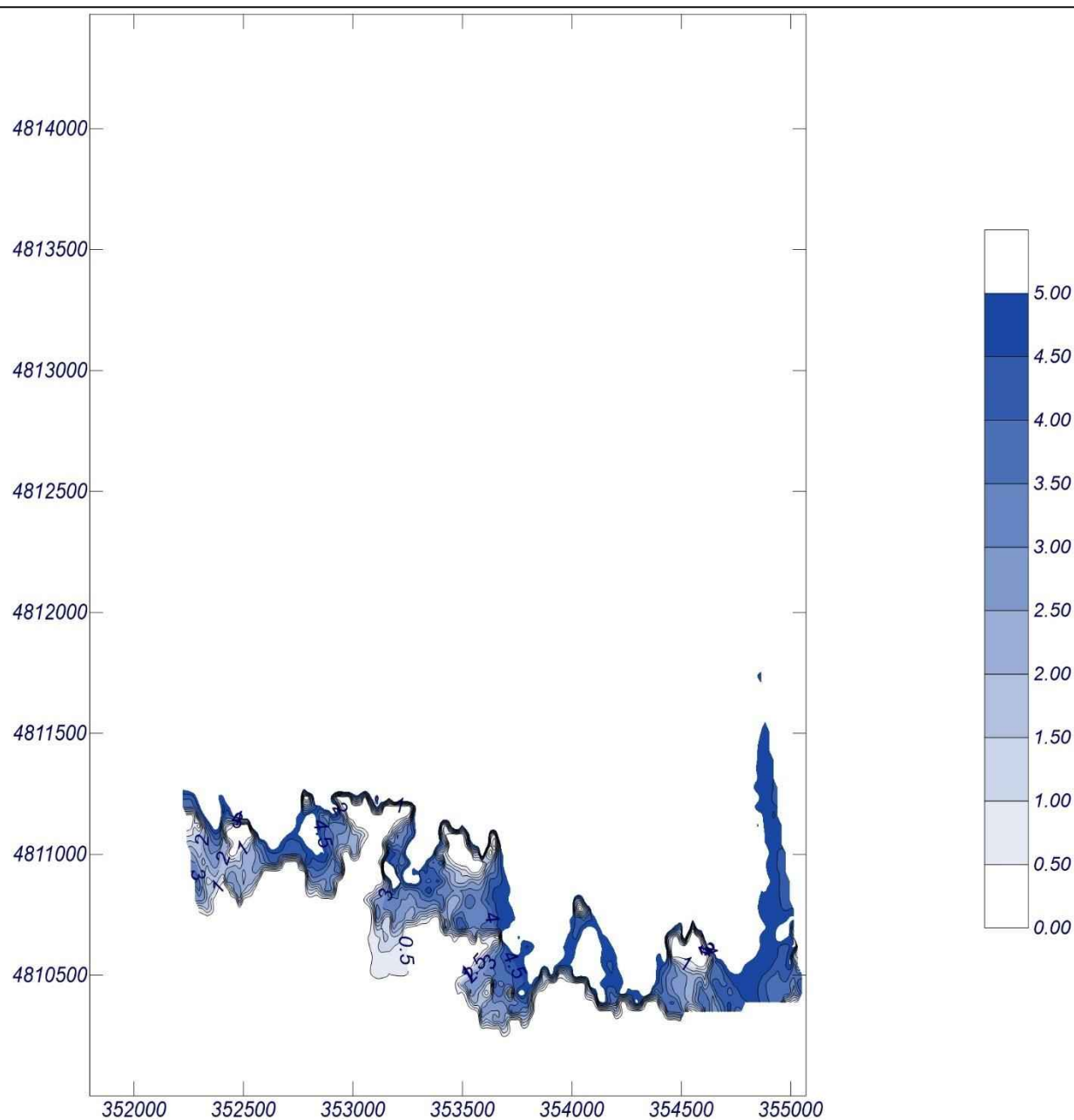
Espectro direccional

θ_m : 48.71° (N57.0W)

σ : 10° - Nº Comp.: 20

COPLA-SP

MOPLA-SP



Proyecto:

Gráfico: Altura de ola significativa

Caso espectral: CC05

CC:

05: 2014-03-04 05:00

Características de la simulación

OLUCA-SP

Espectro frecuencial (TMA)

Hs: 7.09 m

h: 330 m

f_p : 0.0564653 Hz (Tp: 17.71 s)

γ : 10

Nº Comp.: 20

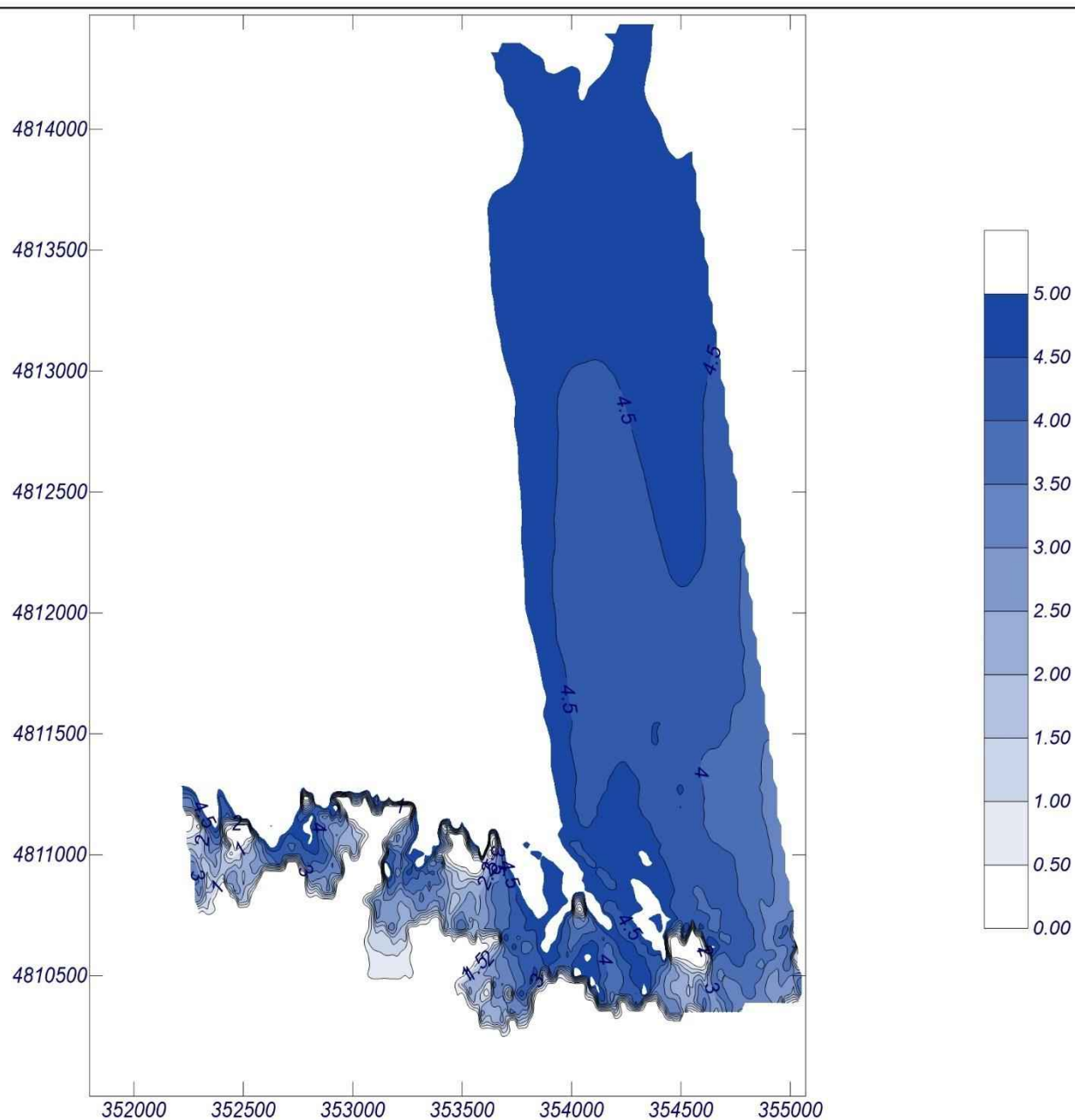
Espectro direccional

θ_m : 42.71° (N51.0W)

σ : 10° - Nº Comp.: 20

COPLA-SP

MOPLA-SP



Proyecto:

Gráfico: Altura de ola significativa

Caso espectral: CC06

CC:

06: 2016-02-09 04:00

Características de la simulación

OLUCA-SP

Espectro frecuencial (TMA)

Hs: 6.25 m

h: 330 m

f_p : 0.0550055 Hz (Tp: 18.18 s)

γ : 10

Nº Comp.: 20

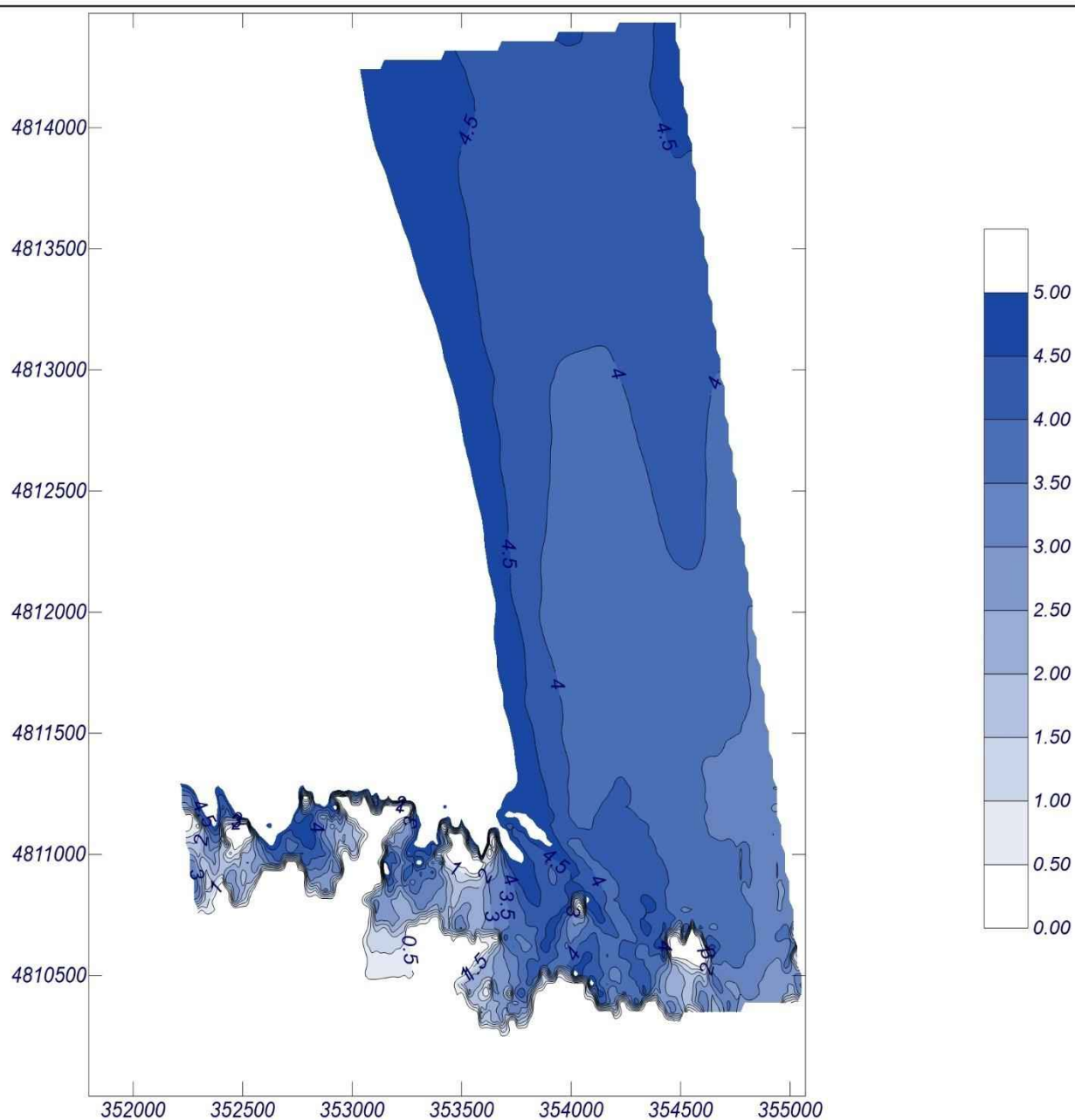
Espectro direccional

θ_m : 41.71° (N50.0W)

σ : 10° - Nº Comp.: 20

COPLA-SP

MOPLA-SP



Proyecto:

Gráfico: Altura de ola significativa

Caso espectral: CC07

CC:

07: 2018-01-17 16:00

Características de la simulación

OLUCA-SP

Espectro frecuencial (TMA)

Hs: 7.48 m

h: 330 m

f_p : 0.0512558 Hz (Tp: 19.51 s)

γ : 10

Nº Comp.: 20

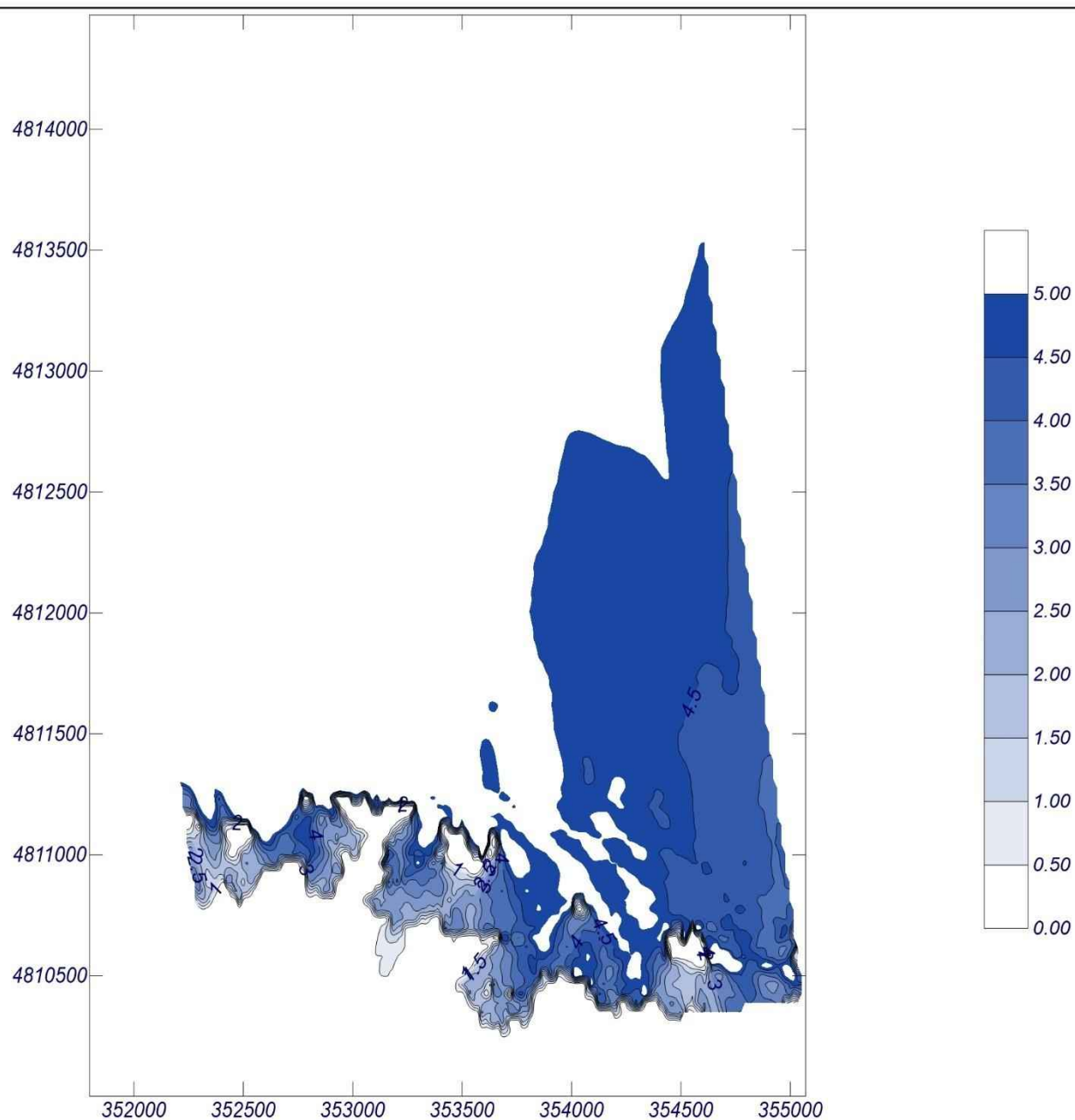
Espectro direccional

θ_m : 28.71° (N37.0W)

σ : 10° - Nº Comp.: 20

COPLA-SP

MOPLA-SP



Proyecto:

Gráfico: Altura de ola significativa

Caso espectral: CC02
CC:
02: 2023-10-28 15:00

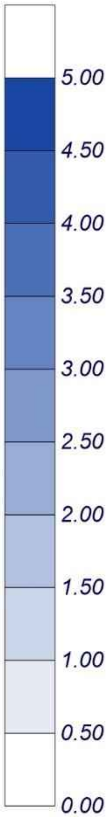
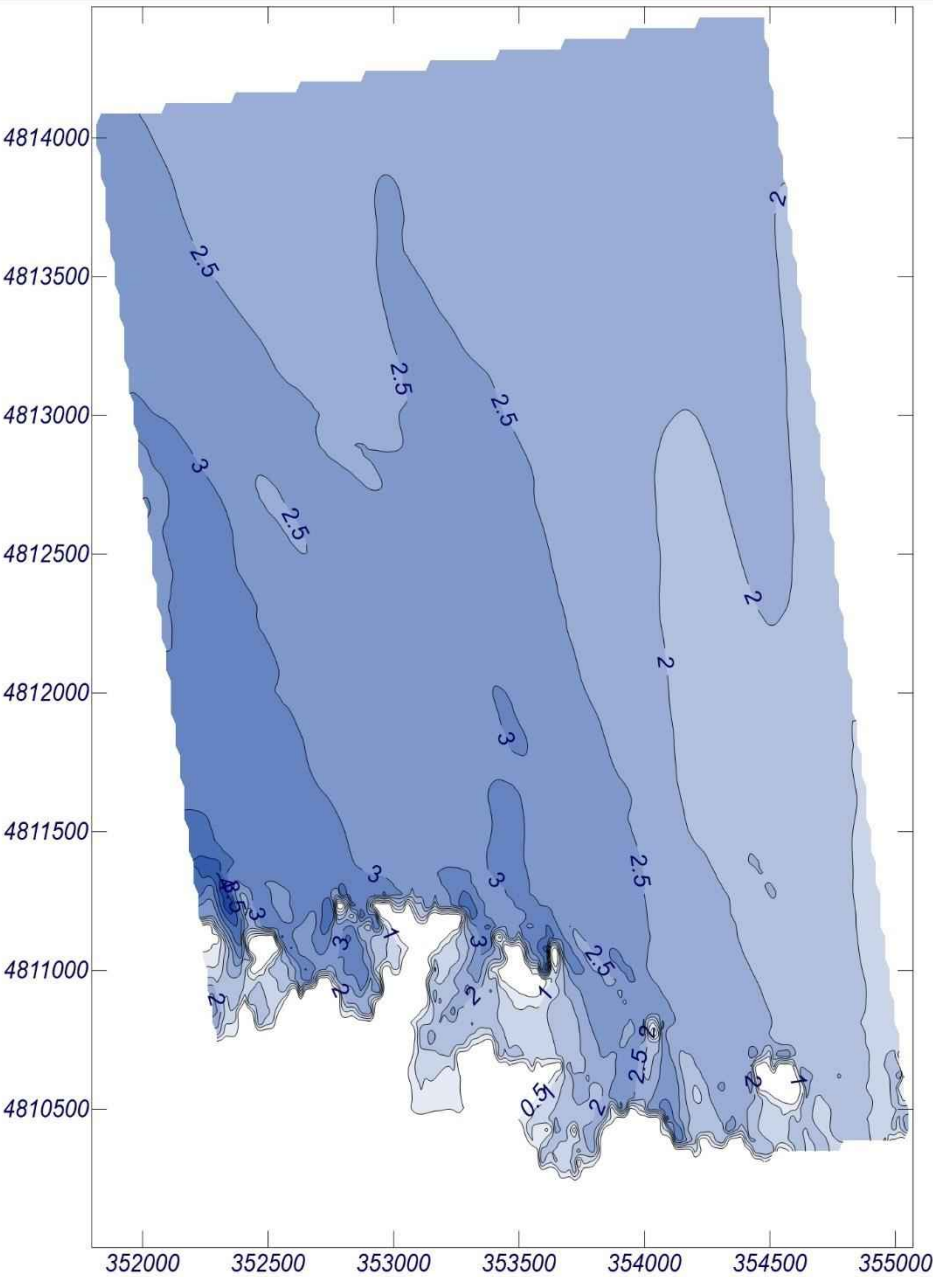
Características de la simulación

OLUCA-SP

Espectro frecuencial (TMA)
Hs: 2.9 m
h: 330 m
fp: 0.0682128 Hz (Tp: 14.66 s)
 γ : 10
Nº Comp.: 20
Espectro direccional
 θ_m : 43.71° (N52.0W)
 σ : 10° - Nº Comp.: 20

COPLA-SP

MOPLA-SP



Proyecto:

Gráfico: Altura de ola significativa

Caso espectral: CC03
CC:
03: 2024-02-11 04:00

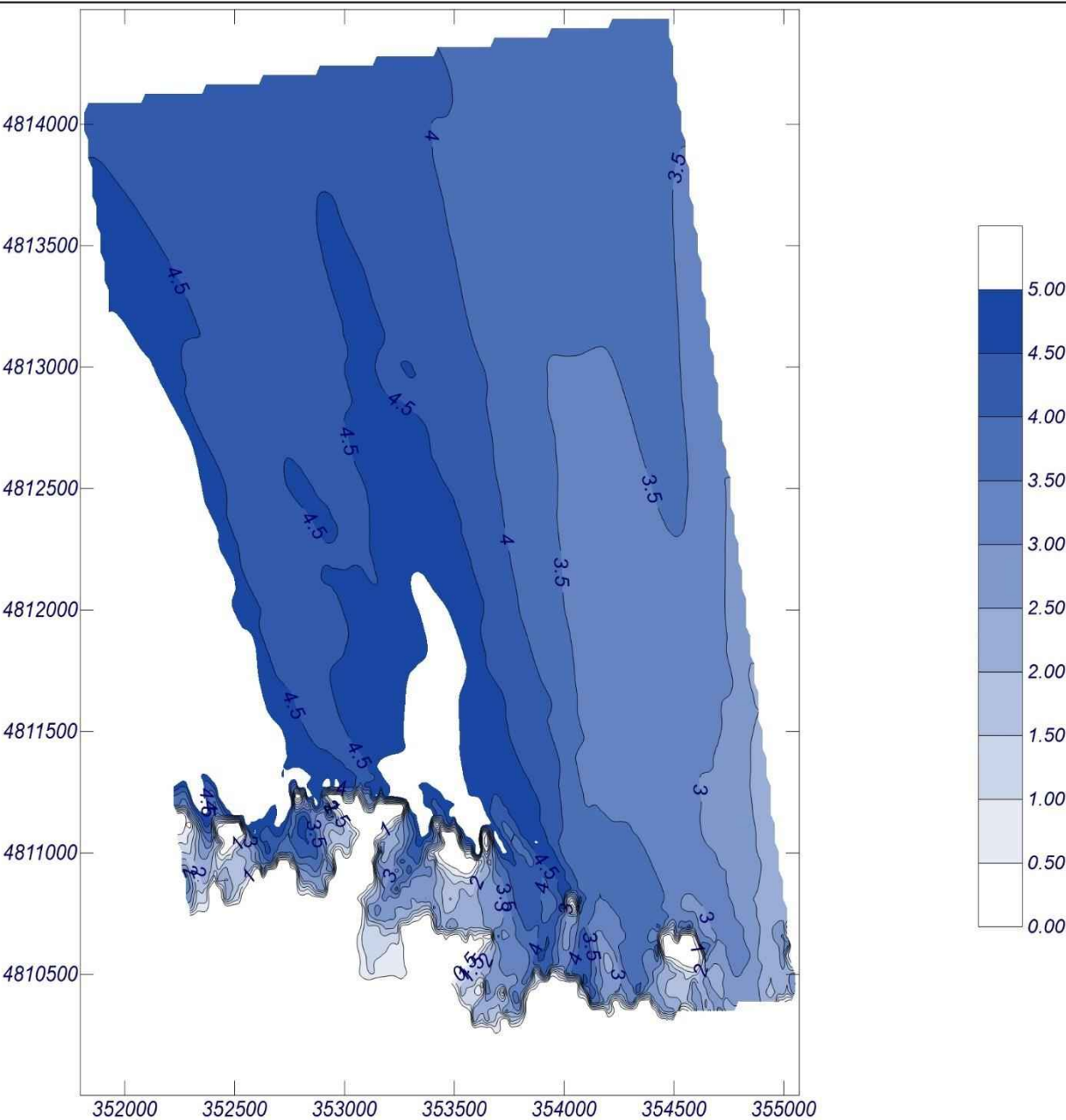
Características de la simulación

OLUCA-SP

Espectro frecuencial (TMA)
Hs: 5.02 m
h: 330 m
fp: 0.0682128 Hz (Tp: 14.66 s)
 γ : 10
Nº Comp.: 20
Espectro direccional
 θ_m : 36.71° (N45.0W)
 σ : 10° - Nº Comp.: 20

COPLA-SP

MOPLA-SP



Proyecto:

Gráfico: Vectores de la altura de ola significativa+Magnitud

Caso espectral: CC04

CC:

04: 2014-02-02 05:00

Características de la simulación

OLUCA-SP

Espectro frecuencial (TMA)

Hs: 6.6 m

h: 330 m

fp: 0.0549149 Hz (Tp: 18.21 s)

γ : 10

Nº Comp.: 20

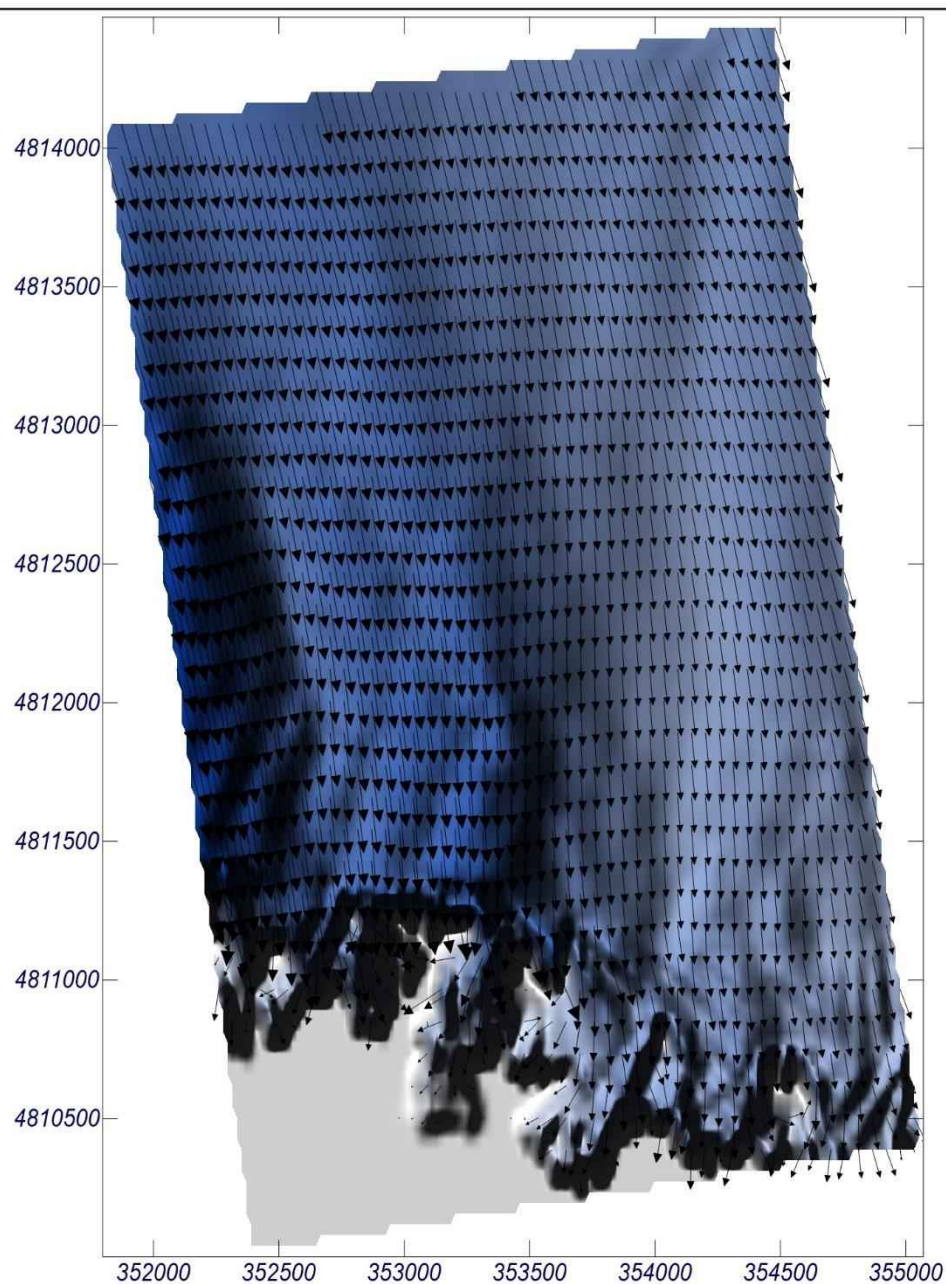
Espectro direccional

θ_m : 39.71° (N48.0W)

σ : 10° - Nº Comp.: 20

COPLA-SP

MOPLA-SP



1 cm = 9.630 m

0 9.63

Proyecto:

Gráfico: Vectores de la altura de ola significativa+Magnitud

Caso espectral: CC01

CC:

01: 2014-03-03 17:00

Características de la simulación

OLUCA-SP

Espectro frecuencial (TMA)

Hs: 10.25 m

h: 330 m

fp: 0.0555864 Hz (Tp: 17.99 s)

γ : 10

Nº Comp.: 20

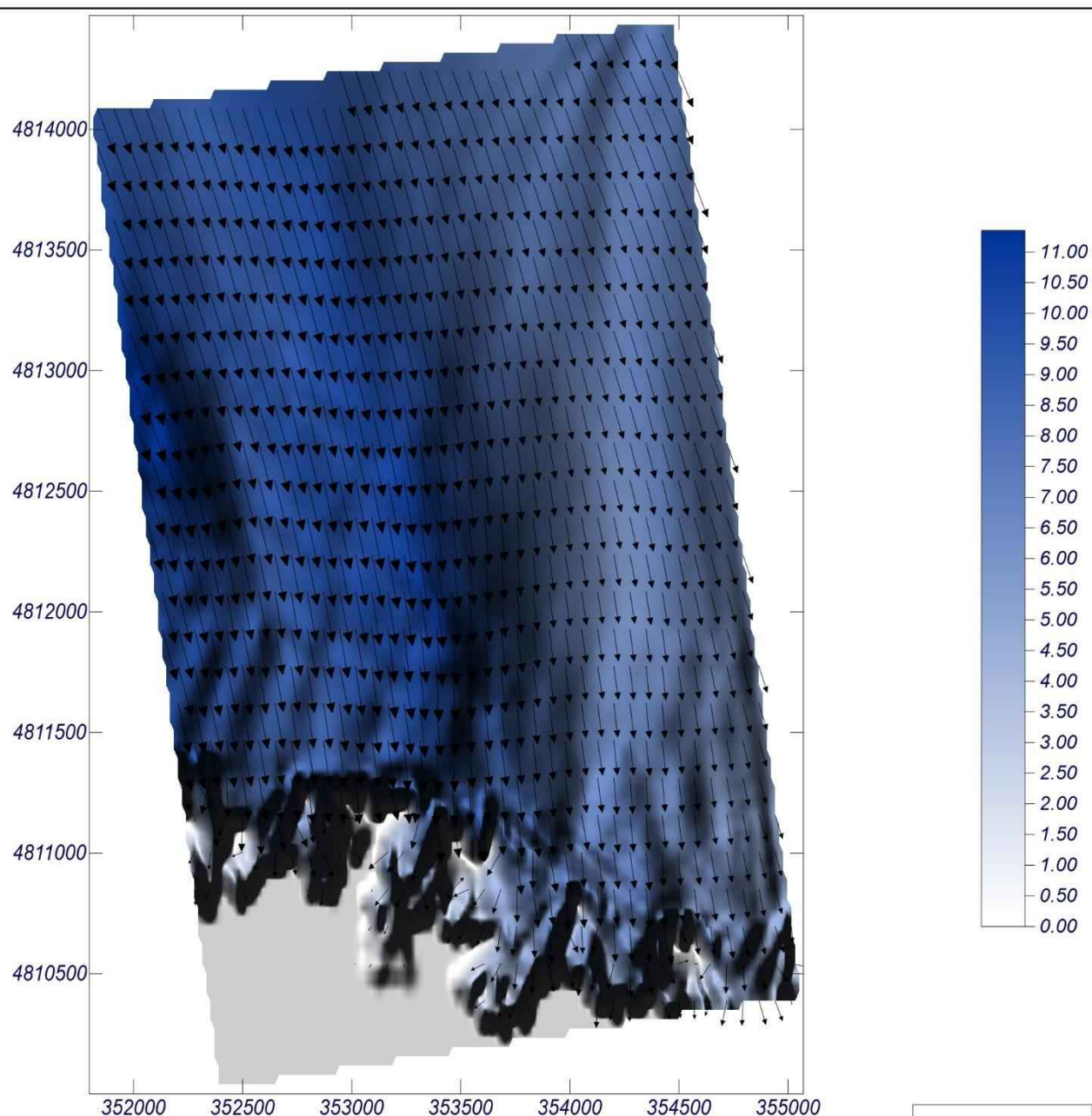
Espectro direccional

θ_m : 48.71° (N57.0W)

σ : 10° - Nº Comp.: 20

COPLA-SP

MOPLA-SP



1 cm = 13.990 m

0 13.99

Proyecto:

Gráfico: Vectores de la altura de ola significativa+Magnitud

Caso espectral: CC05

CC:

05: 2014-03-04 05:00

Características de la simulación

OLUCA-SP

Espectro frecuencial (TMA)

Hs: 7.09 m

h: 330 m

fp: 0.0564653 Hz (Tp: 17.71 s)

γ : 10

Nº Comp.: 20

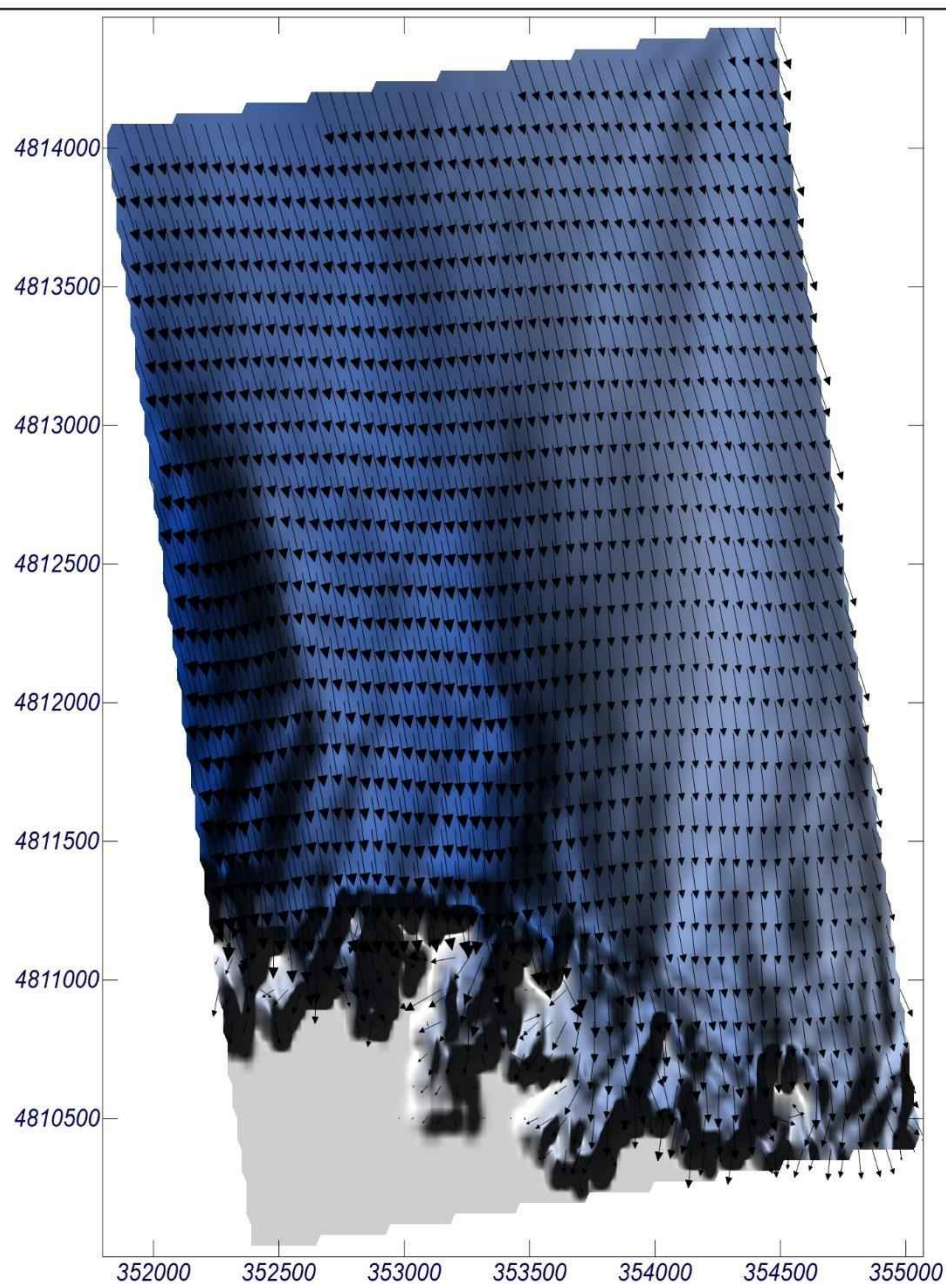
Espectro direccional

θ_m : 42.71° (N51.0W)

σ : 10° - Nº Comp.: 20

COPLA-SP

MOPLA-SP



1 cm = 10.290 m

0 10.29

Proyecto:

Gráfico: Vectores de la altura de ola significativa+Magnitud

Caso espectral: CC06
CC:
06: 2016-02-09 04:00

Características de la simulación

OLUCA-SP

Espectro frecuencial (TMA)

Hs: 6.25 m

h: 330 m

fp: 0.0550055 Hz (Tp: 18.18 s)

γ : 10

Nº Comp.: 20

Espectro direccional

θ_m : 41.71° (N50.0W)

σ : 10° - Nº Comp.: 20

COPLA-SP

MOPLA-SP



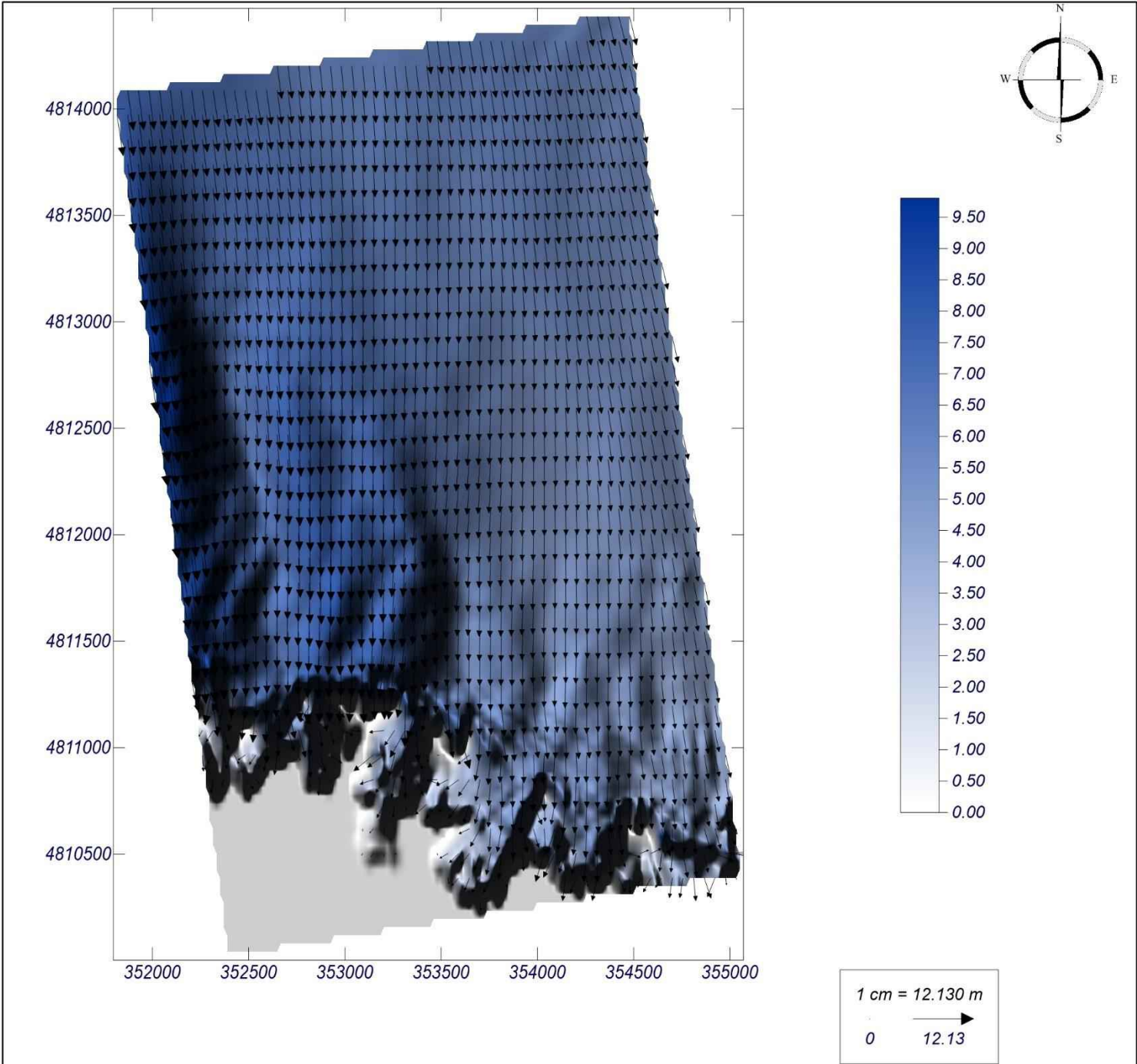
1 cm = 9.510 m

0 9.51

Proyecto:

Gráfico: Vectores de la altura de ola significativa+Magnitud

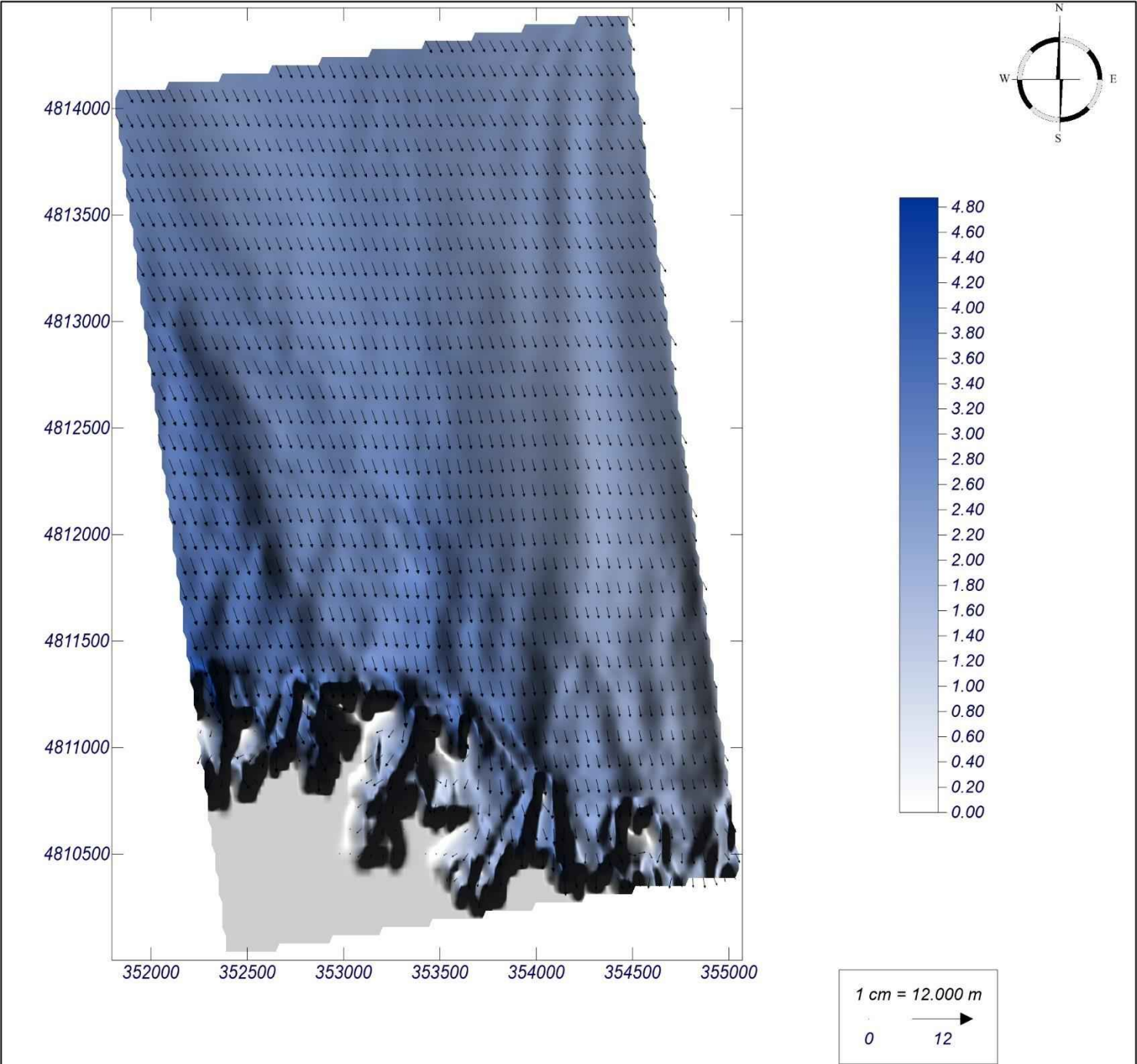
Caso espectral: CC07 CC: 07: 2018-01-17 16:00	Características de la simulación		
	OLUCA-SP <i>Espectro frecuencial (TMA)</i> Hs: 7.48 m h: 330 m fp: 0.0512558 Hz (Tp: 19.51 s) γ: 10 Nº Comp.: 20 <i>Espectro direccional</i> θm: 28.71° (N37.0W) σ: 10° - Nº Comp.: 20	COPLA-SP	MOPLA-SP



Proyecto:

Gráfico: Vectores de la altura de ola significativa+Magnitud

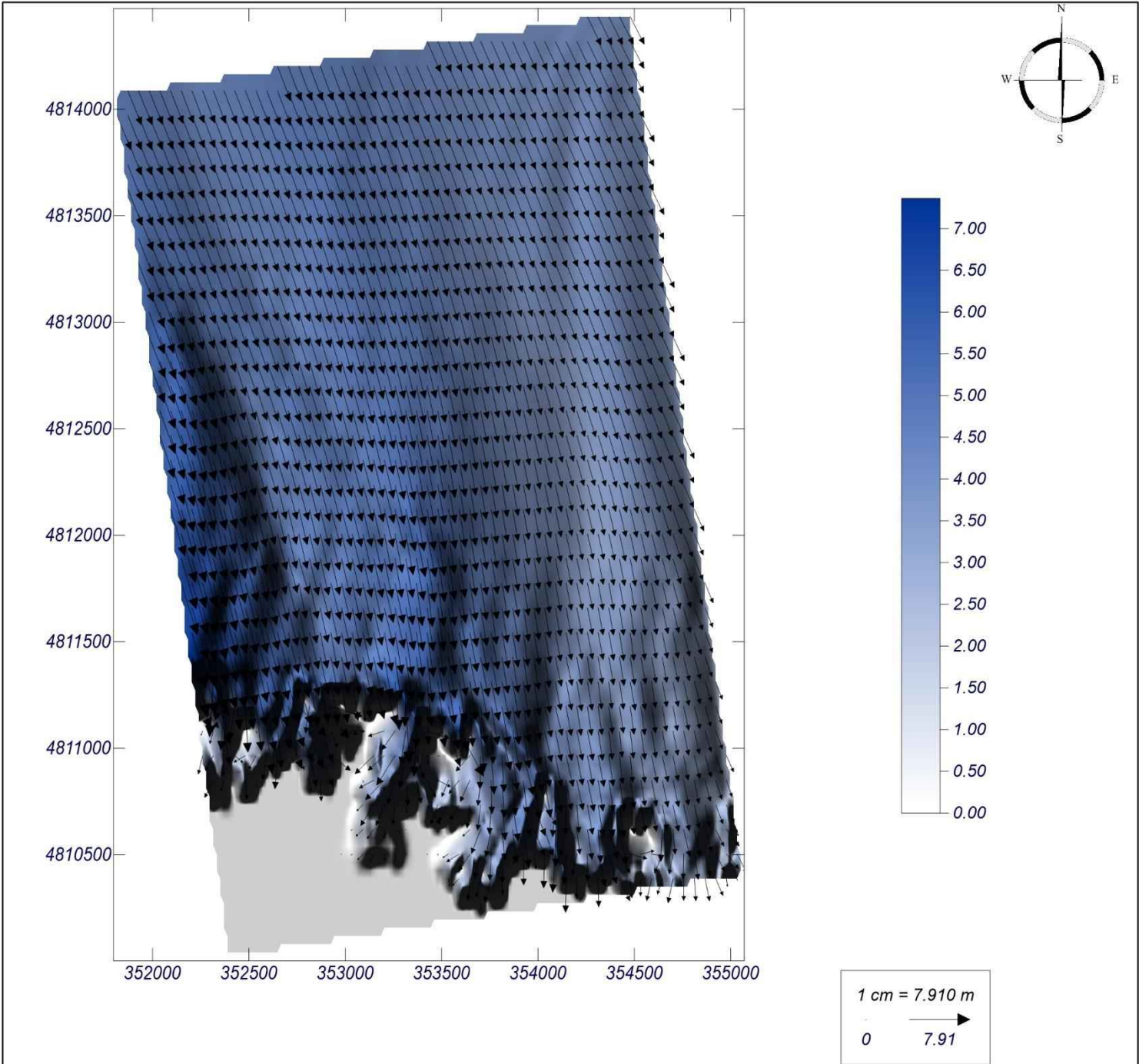
Caso espectral: CC02 CC: 02: 2023-10-28 15:00	Características de la simulación		
	OLUCA-SP <i>Espectro frecuencial (TMA)</i> Hs: 2.9 m h: 330 m fp: 0.0682128 Hz (Tp: 14.66 s) γ: 10 Nº Comp.: 20 <i>Espectro direccional</i> θm: 43.71° (N52.0W) σ: 10° - Nº Comp.: 20	COPLA-SP	MOPLA-SP



Proyecto:

Gráfico: Vectores de la altura de ola significativa+Magnitud

Caso espectral: CC03 CC: 03: 2024-02-11 04:00	Características de la simulación		
	OLUCA-SP <i>Espectro frecuencial (TMA)</i> Hs: 5.02 m h: 330 m fp: 0.0682128 Hz (Tp: 14.66 s) γ: 10 Nº Comp.: 20 <i>Espectro direccional</i> θm: 36.71° (N45.0W) σ: 10° - Nº Comp.: 20	COPLA-SP	MOPLA-SP



Proyecto:

Gráfico: Gráfico combinado de topografía y vectores Hs

Caso espectral: CC04

CC:

04: 2014-02-02 05:00

Características de la simulación

OLUCA-SP

Espectro frecuencial (TMA)

Hs: 6.6 m

h: 330 m

fp: 0.0549149 Hz (Tp: 18.21 s)

γ : 10

Nº Comp.: 20

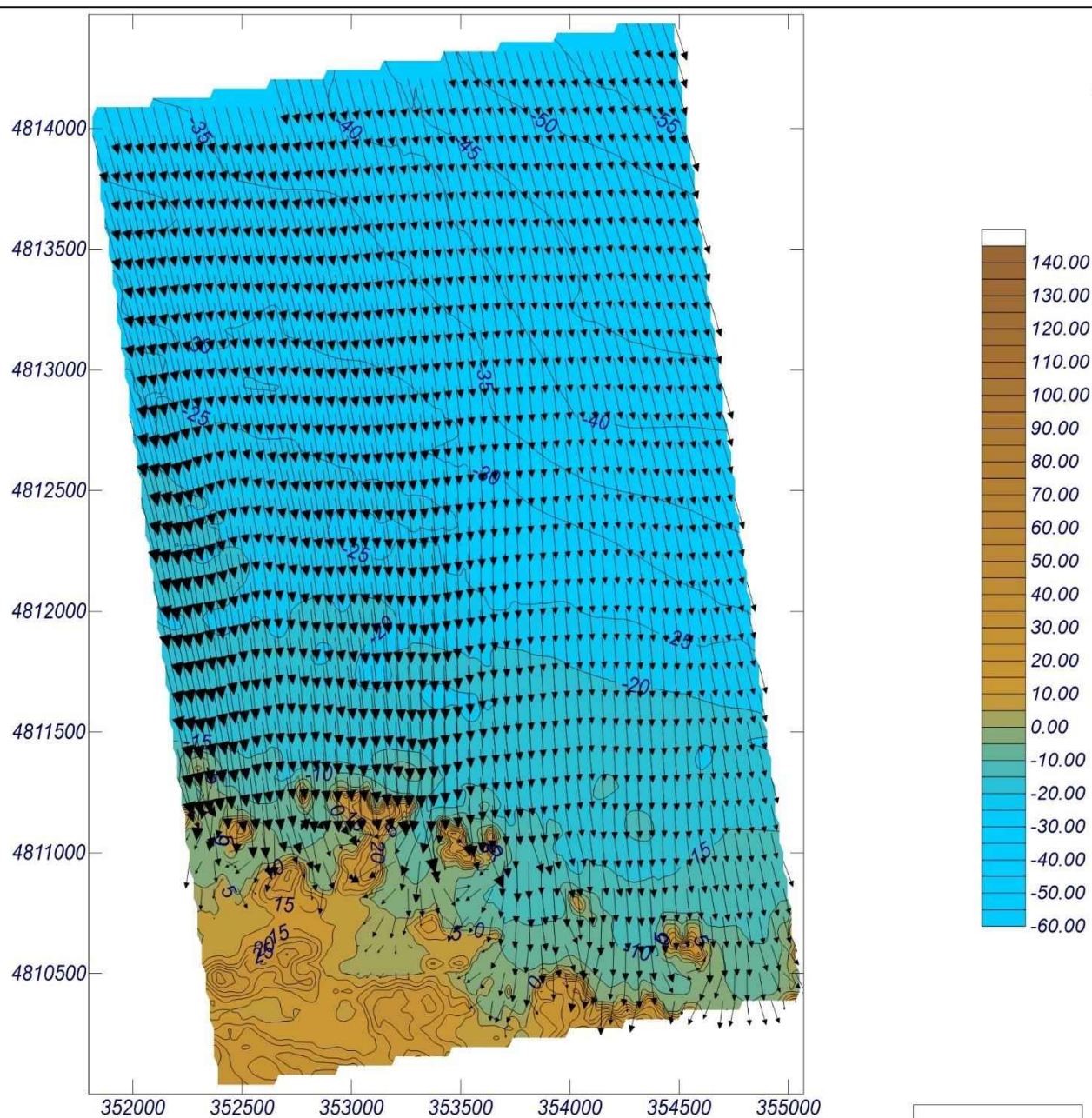
Espectro direccional

θ_m : 39.71° (N48.0W)

σ : 10° - Nº Comp.: 20

COPLA-SP

MOPLA-SP



Proyecto:

Gráfico: Gráfico combinado de topografía y vectores Hs

Caso espectral: CC01

CC:

01: 2014-03-03 17:00

Características de la simulación

OLUCA-SP

Espectro frecuencial (TMA)

Hs: 10.25 m

h: 330 m

fp: 0.0555864 Hz (Tp: 17.99 s)

γ : 10

Nº Comp.: 20

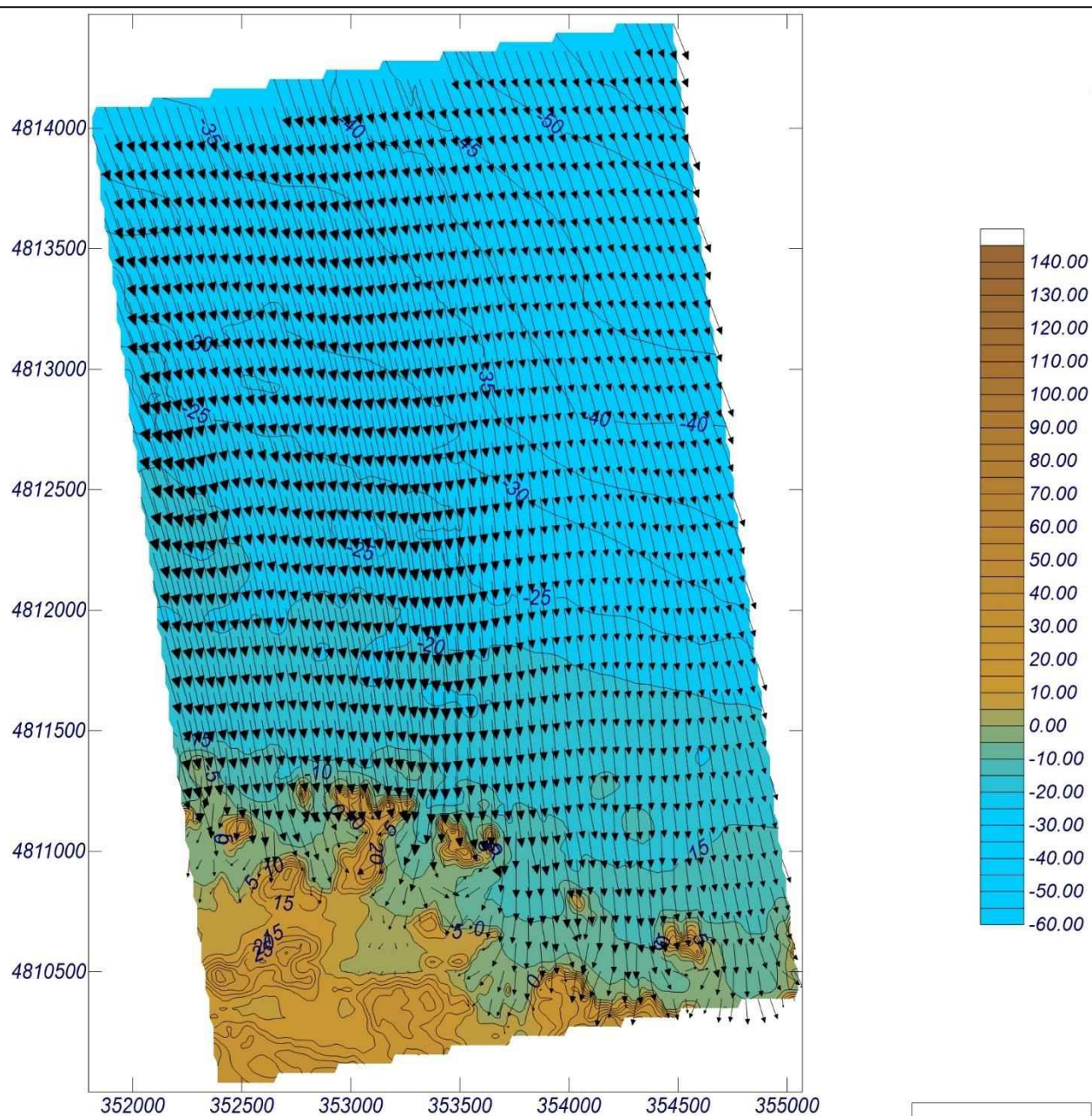
Espectro direccional

θ_m : 48.71° (N57.0W)

σ : 10° - Nº Comp.: 20

COPLA-SP

MOPLA-SP



Proyecto:

Gráfico: Gráfico combinado de topografía y vectores Hs

Caso espectral: CC05

CC:

05: 2014-03-04 05:00

Características de la simulación

OLUCA-SP

Espectro frecuencial (TMA)

Hs: 7.09 m

h: 330 m

fp: 0.0564653 Hz (Tp: 17.71 s)

γ : 10

Nº Comp.: 20

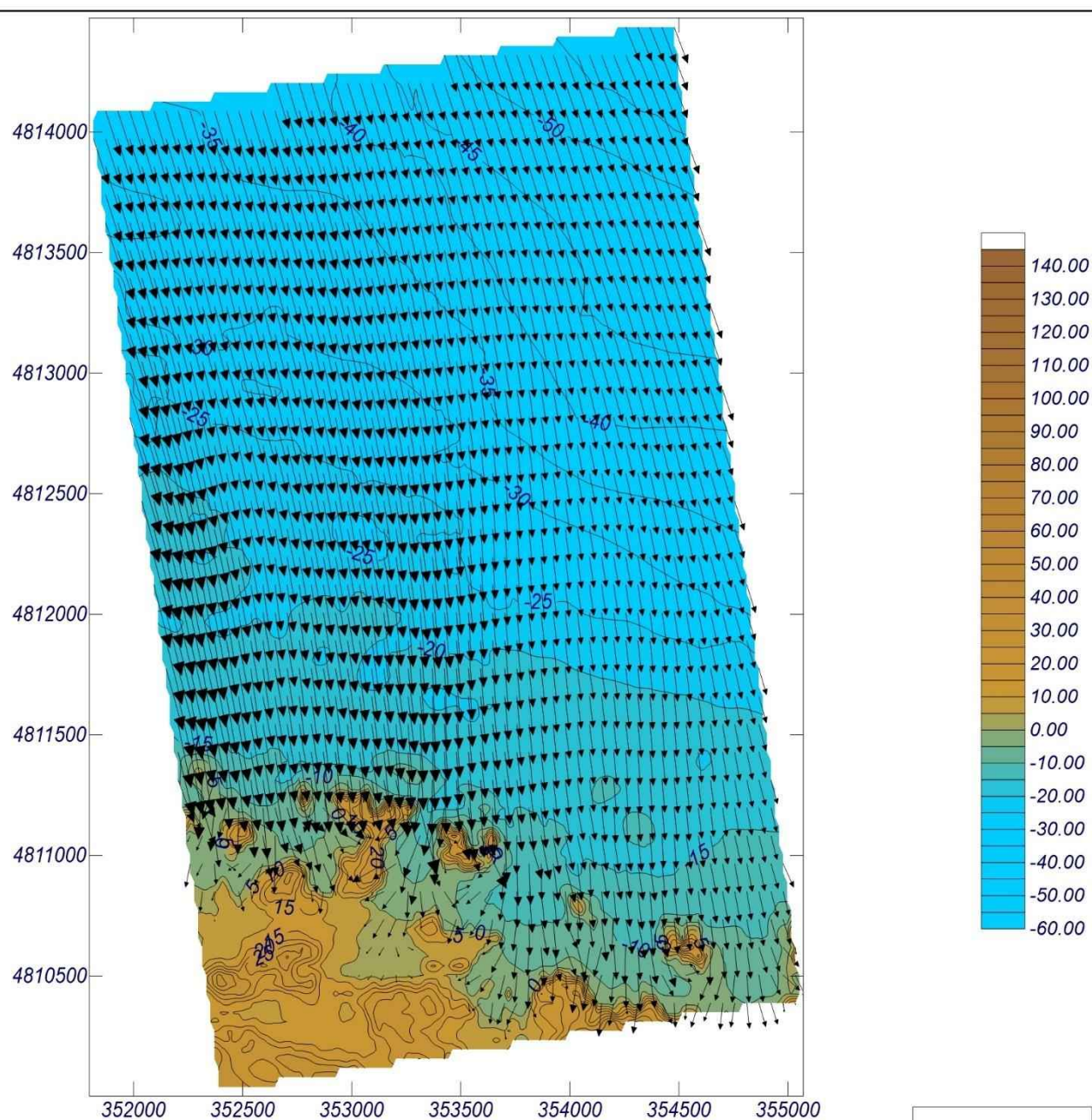
Espectro direccional

θ_m : 42.71° (N51.0W)

σ : 10° - Nº Comp.: 20

COPLA-SP

MOPLA-SP



Proyecto:

Gráfico: Gráfico combinado de topografía y vectores Hs

Caso espectral: CC06

CC:

06: 2016-02-09 04:00

Características de la simulación

OLUCA-SP

Espectro frecuencial (TMA)

Hs: 6.25 m

h: 330 m

fp: 0.0550055 Hz (Tp: 18.18 s)

γ : 10

Nº Comp.: 20

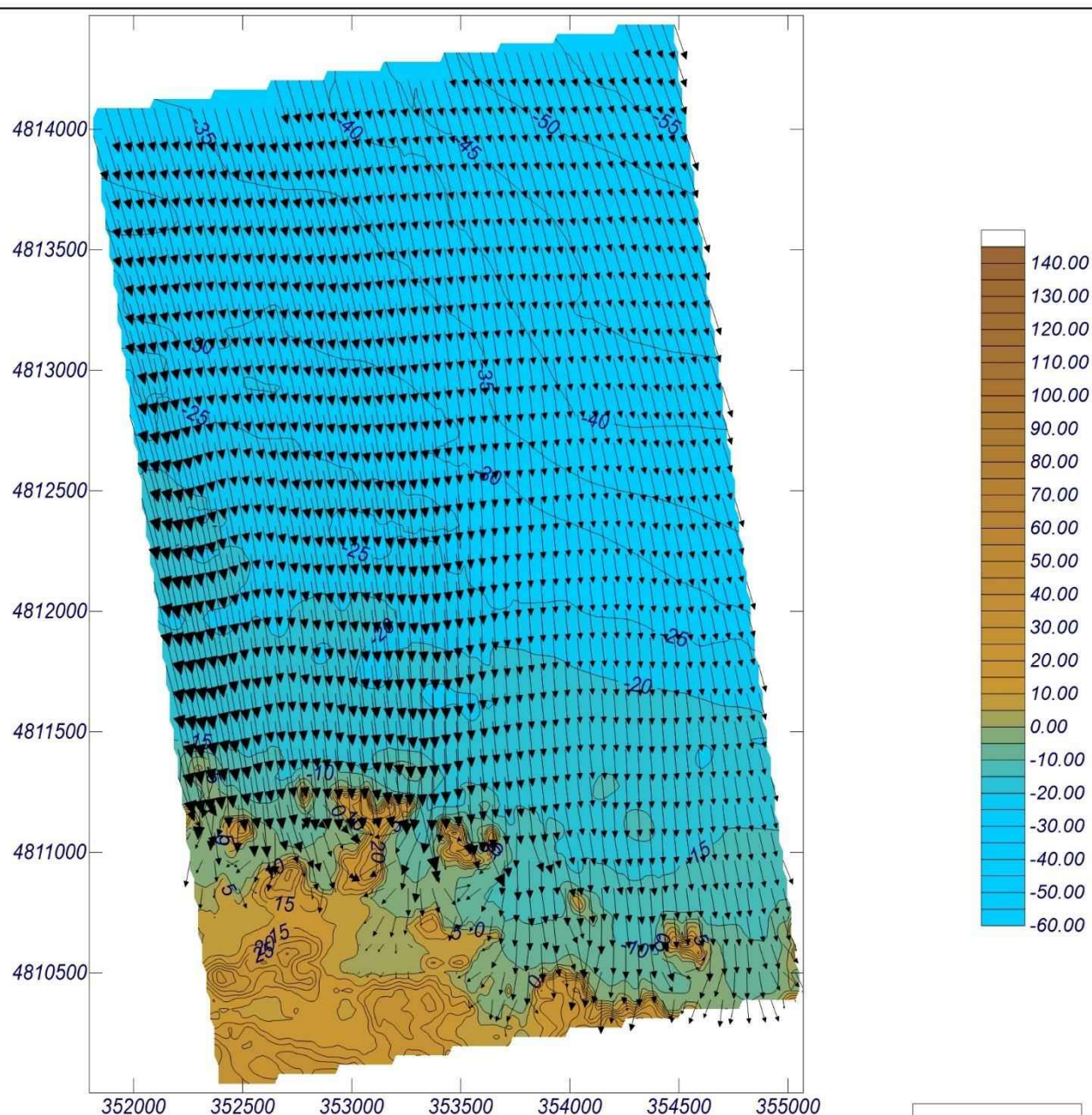
Espectro direccional

θ_m : 41.71° (N50.0W)

σ : 10° - Nº Comp.: 20

COPLA-SP

MOPLA-SP



Proyecto:

Gráfico: Gráfico combinado de topografía y vectores Hs

Caso espectral: CC07

CC:

07: 2018-01-17 16:00

Características de la simulación

OLUCA-SP

Espectro frecuencial (TMA)

Hs: 7.48 m

h: 330 m

f_p: 0.0512558 Hz (Tp: 19.51 s)

γ: 10

Nº Comp.: 20

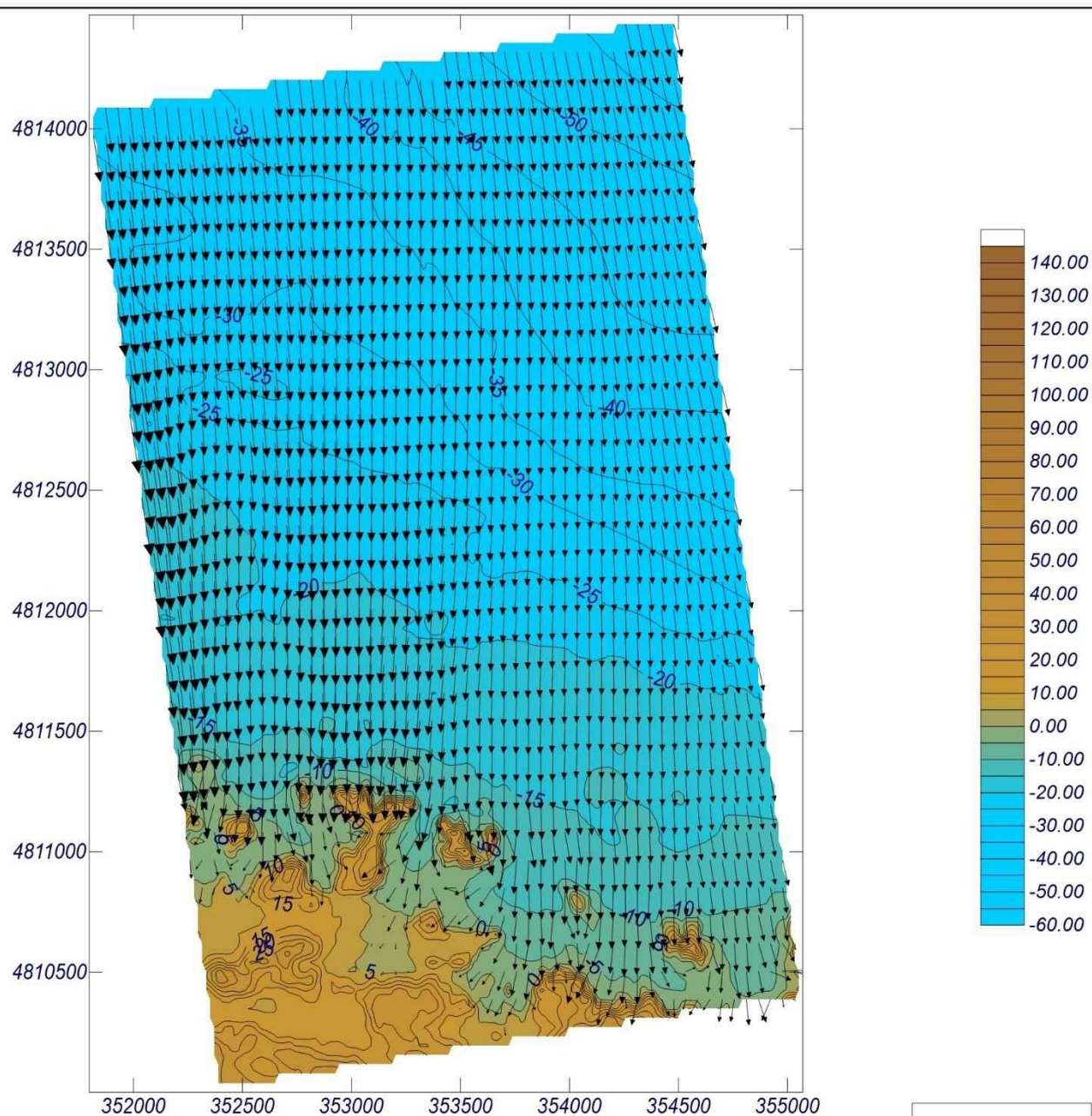
Espectro direccional

θ_m: 28.71° (N37.0W)

σ: 10° - Nº Comp.: 20

COPLA-SP

MOPLA-SP



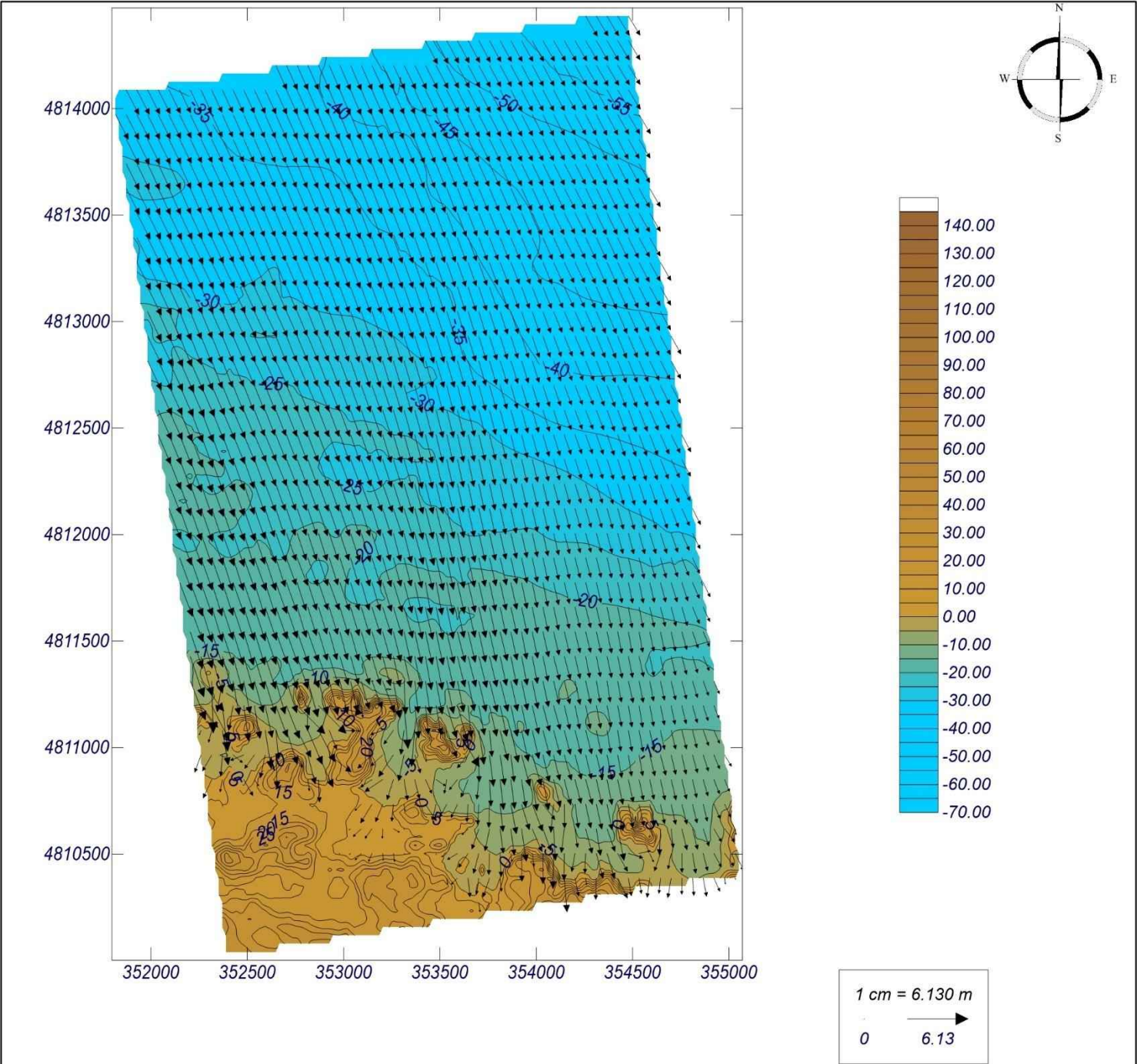
1 cm = 12.130 m

0 12.13

Proyecto:

Gráfico: Gráfico combinado de topografía y vectores Hs

Caso espectral: CC02 CC: 02: 2023-10-28 15:00	Características de la simulación		
	OLUCA-SP <i>Espectro frecuencial (TMA)</i> Hs: 2.9 m h: 330 m fp: 0.0682128 Hz (Tp: 14.66 s) γ: 10 Nº Comp.: 20 <i>Espectro direccional</i> θm: 43.71° (N52.0W) σ: 10° - Nº Comp.: 20	COPLA-SP	MOPLA-SP



Proyecto:

Gráfico: Gráfico combinado de topografía y vectores Hs

Caso espectral: CC03
CC:
03: 2024-02-11 04:00

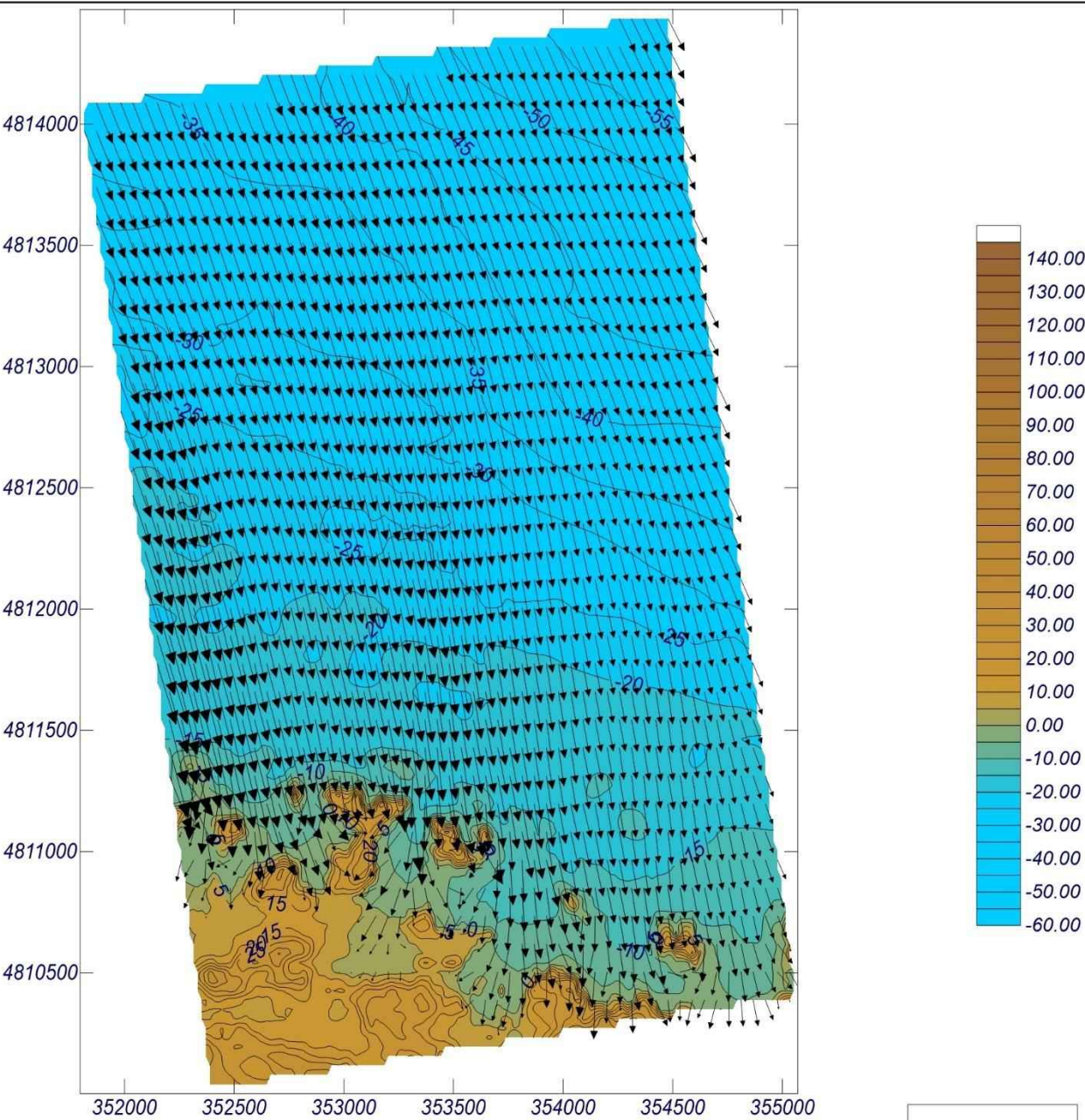
Características de la simulación

OLUCA-SP

Espectro frecuencial (TMA)
Hs: 5.02 m
h: 330 m
fp: 0.0682128 Hz (Tp: 14.66 s)
 γ : 10
Nº Comp.: 20
Espectro direccional
 θ_m : 36.71° (N45.0W)
 σ : 10° - Nº Comp.: 20

COPLA-SP

MOPLA-SP



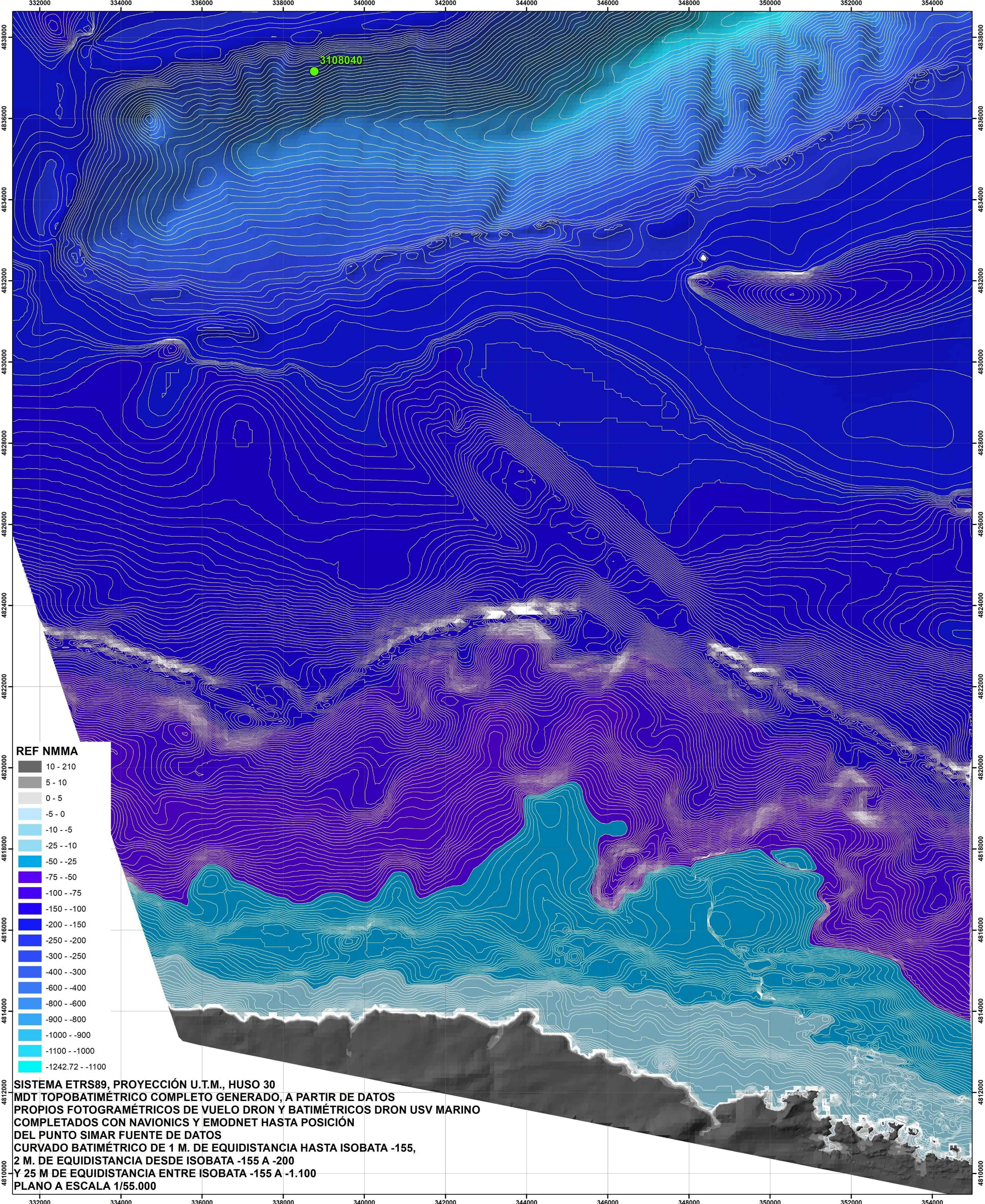
1 cm = 7.700 m
0 7.7



Se incluyen a continuación los planos a escalas 1/55.500 y 1/1.000 en los que se recoge respectivamente el MDT topo-batimétrico generado con el curvado batimétrico vectorial obtenido superpuesto, en el primero de los planos (escala 1/55.000) completo desde profundidades indefinidas incluyendo la posición del Punto Simar, en el segundo de los planos (escala 1/1.000) la franja batimétrica y topográfica en la zona de rompientes y topografía emergida capturadas con dispositivos dron de alta precisión (topo-batimetría de la playa objeto de estudio capturada con drones RPAS-RTK fotogramétrico y USV con RTK-Ecosonda y equipos topográficos de precisión en las campañas de campo de enero y marzo de 2024).

Asimismo se adjuntan los planos a escala 1/2.000 con los resultados de la propagación de los oleajes caracterizada por las alturas de ola H_{sp} propagadas, y por los vectores direccionales del oleaje y módulo H_{sp} propagado (proporcional la longitud del vector al valor H_{sp}) en la zona de profundidades reducidas y rompientes hasta el límite de la topografía emergida, sobre MDT, calculados por Oluca-SP y obtenidos por dicho software a partir de los valores de H_{sp} propagados en los nodos de la malla “Reducidas” (la de mayor detalle) hasta pie de costa de la zona de estudio, todo ello en el sistema ETRS89, elipsoide GRS80, Proyección U.T.M., Huso 30.

A la vista de los resultados de la propagación del oleaje, se confirma la selección del período de cinco años al comprendido entre 2014 y 2018, realizándose los cálculos finales y obtención del quinto nivel de inundación con los estados de mar comprendidos en dicho período, que además fueron los cinco primeros en potencial de inundación estimado previo antes de propagación del oleaje según las iteraciones iniciales en el análisis del clima marítimo.

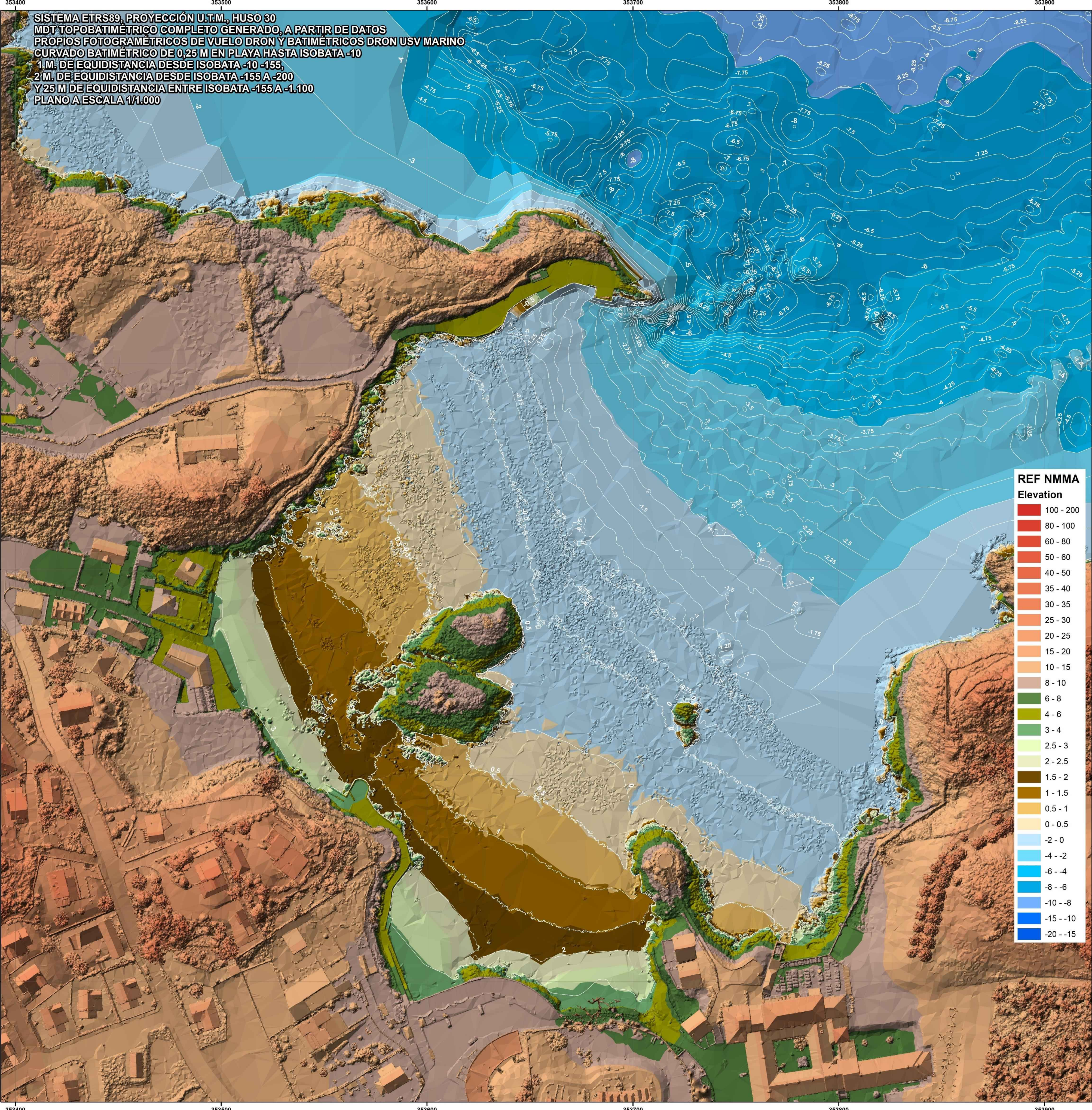
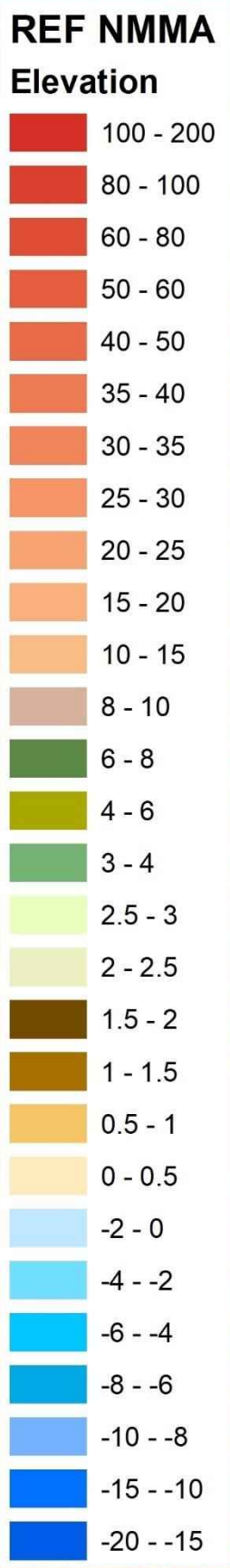


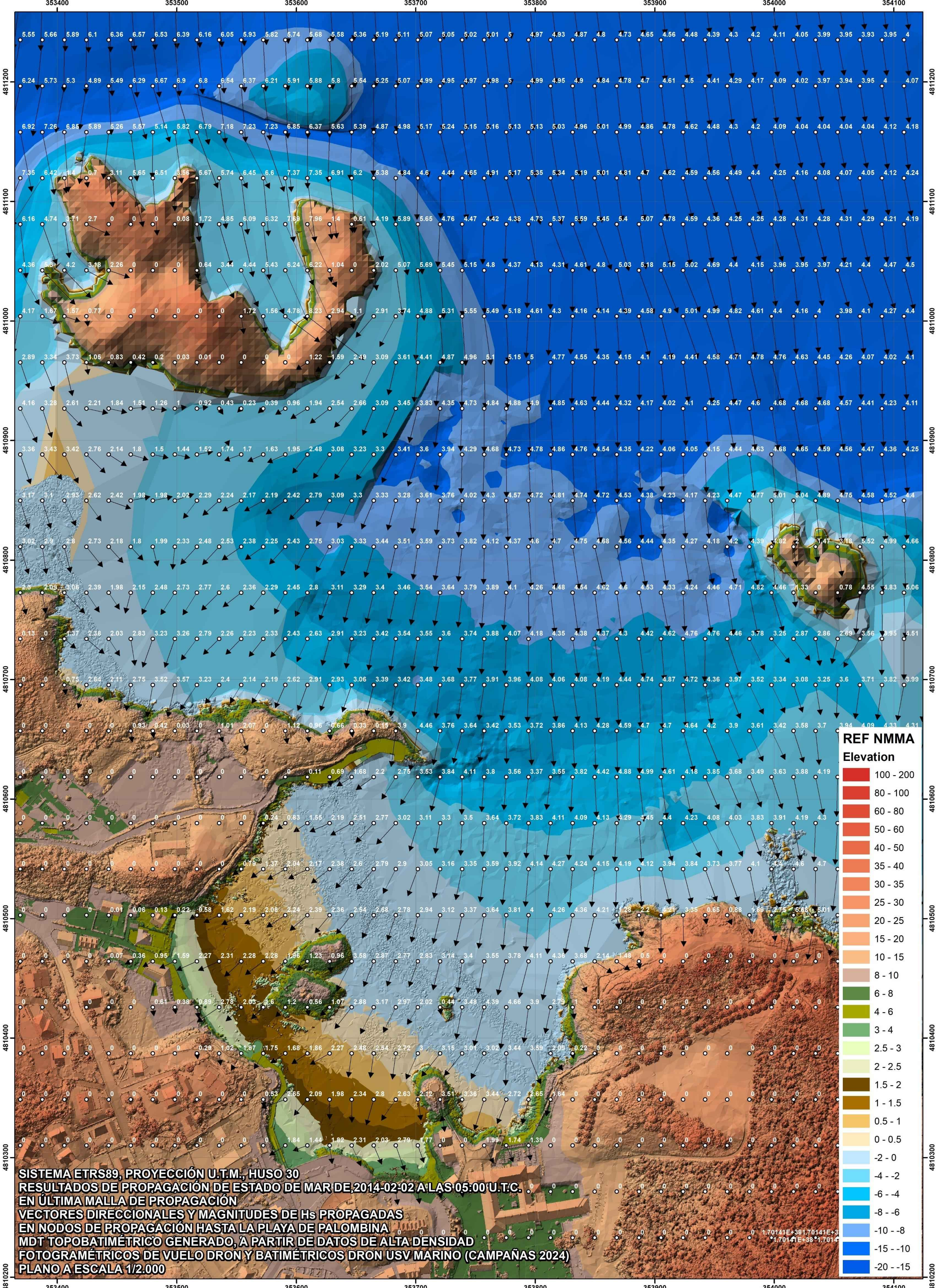
REF NMMA

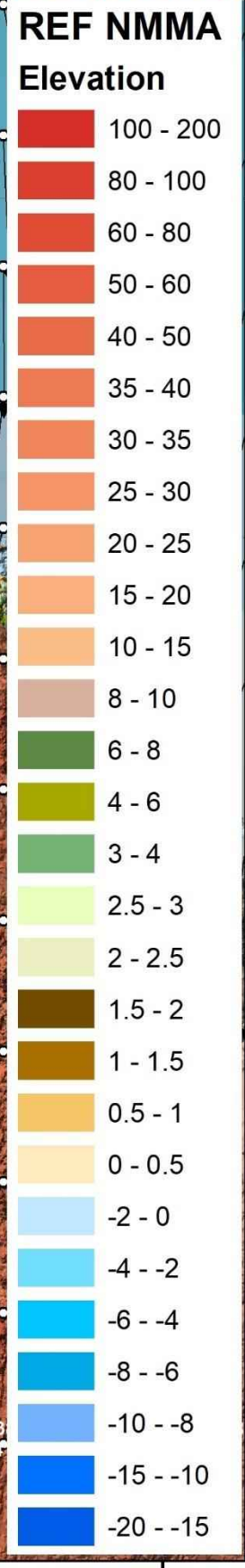
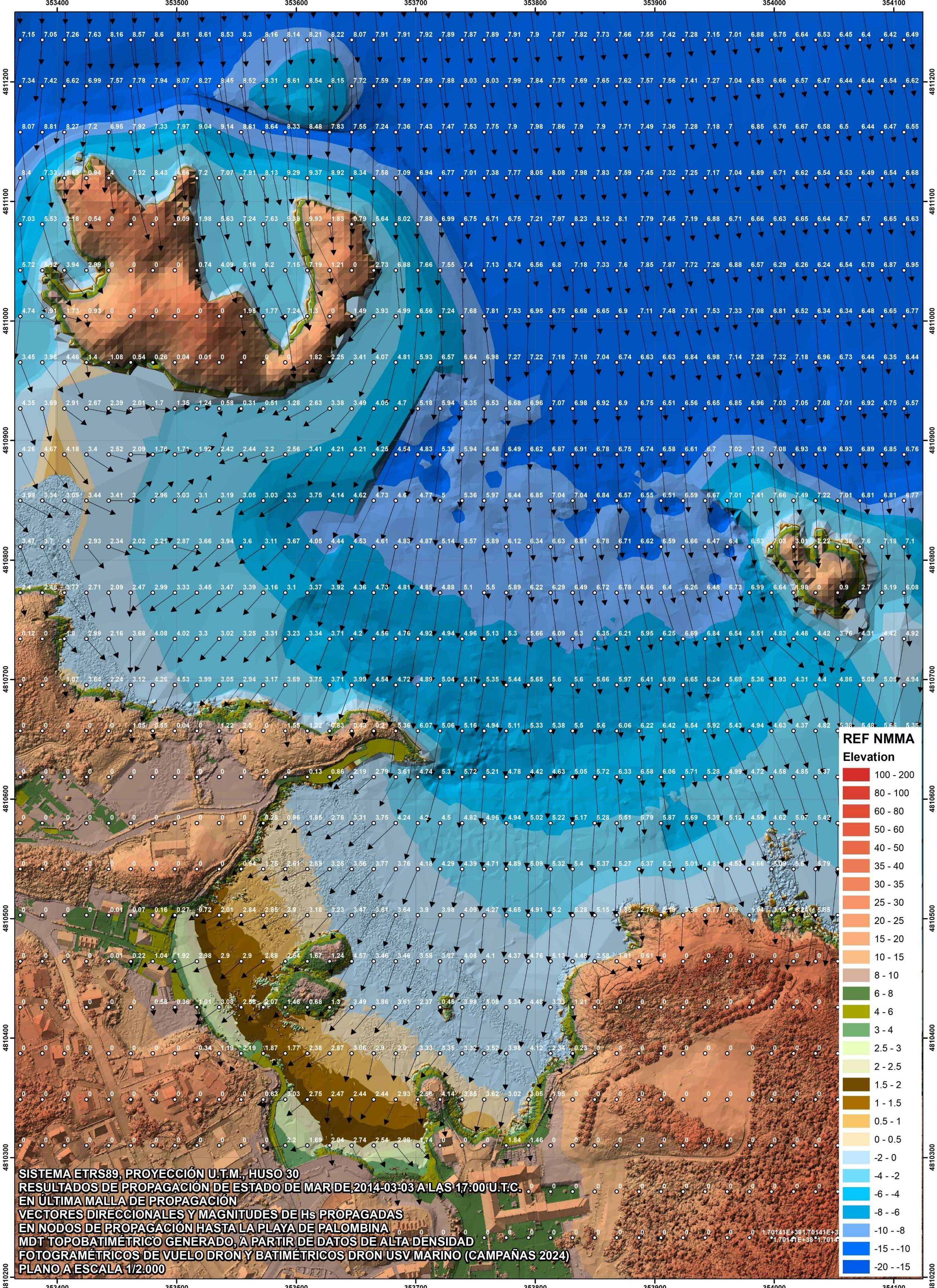
	10 - 210
	5 - 10
	0 - 5
	-5 - 0
	-10 - -5
	-25 - -10
	-50 - -25
	-75 - -50
	-100 - -75
	-150 - -100
	-200 - -150
	-250 - -200
	-300 - -250
	-400 - -300
	-600 - -400
	-800 - -600
	-900 - -800
	-1000 - -900
	-1100 - -1000
	-1242.72 - -1100

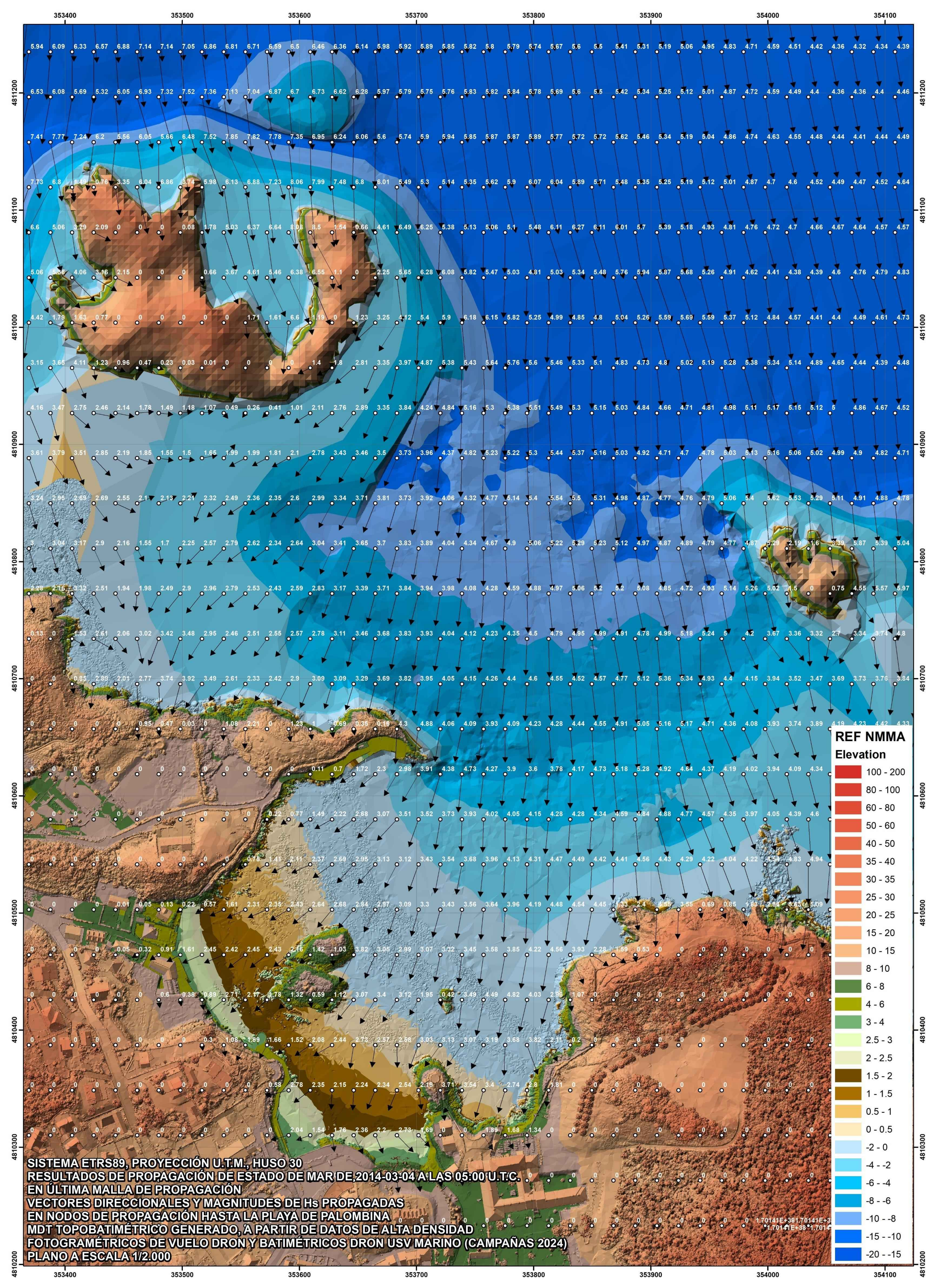
SISTEMA ETRS89, PROYECCIÓN U.T.M., HUSO 30
MDT TOPOBATIMÉTRICO COMPLETO GENERADO, A PARTIR DE DATOS
PROPIOS FOTOGRAMÉTRICOS DE VUELO DRON Y BATIMÉTRICOS DRON USV MARINO
COMPLETADOS CON NAVIONICS Y EMODNET HASTA POSICIÓN
DEL PUNTO SIMAR FUENTE DE DATOS
CURVADO BATIMÉTRICO DE 1 M. DE EQUIDISTANCIA HASTA ISOBATA -155,
2 M. DE EQUIDISTANCIA DESDE ISOBATA -155 A -200
Y 25 M DE EQUIDISTANCIA ENTRE ISOBATA -155 A -1.100
PLANO A ESCALA 1/55.000

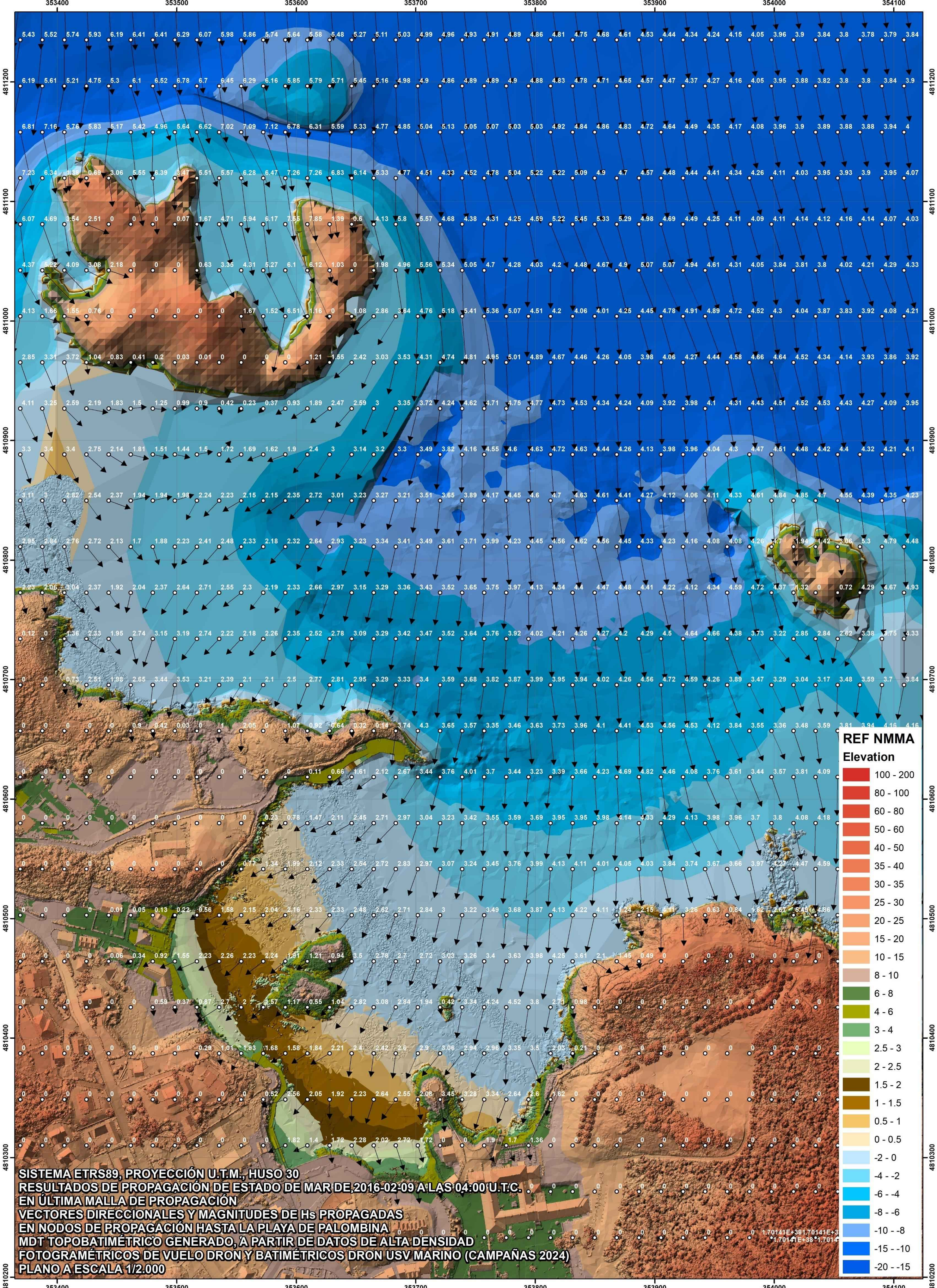
SISTEMA ETRS89, PROYECCIÓN U.T.M., HUSO 30
MDT TOPOBATIMÉTRICO COMPLETO GENERADO, A PARTIR DE DATOS
PROPIOS FOTOGRAMÉTRICOS DE VUELO DRON Y BATIMÉTRICOS DRON USV MARINO
CURVADO BATIMÉTRICO DE 0,25 M EN PLAYA HASTA ISOBATA -10
1 M. DE EQUIDISTANCIA DESDE ISOBATA -10 -155,
2 M. DE EQUIDISTANCIA DESDE ISOBATA -155 A -200
Y 25 M DE EQUIDISTANCIA ENTRE ISOBATA -155 A -1.100
PLANO A ESCALA 1/1.000

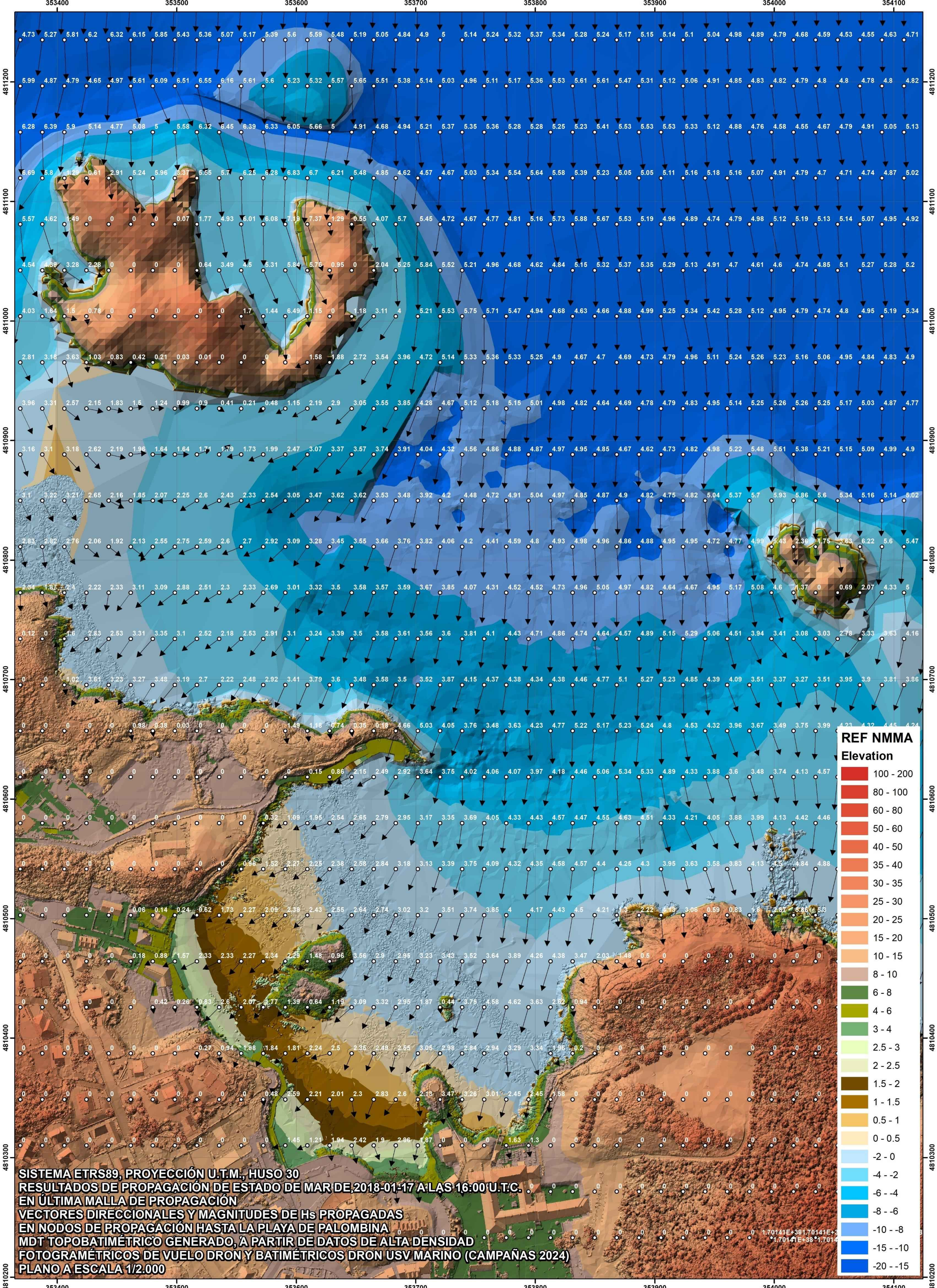


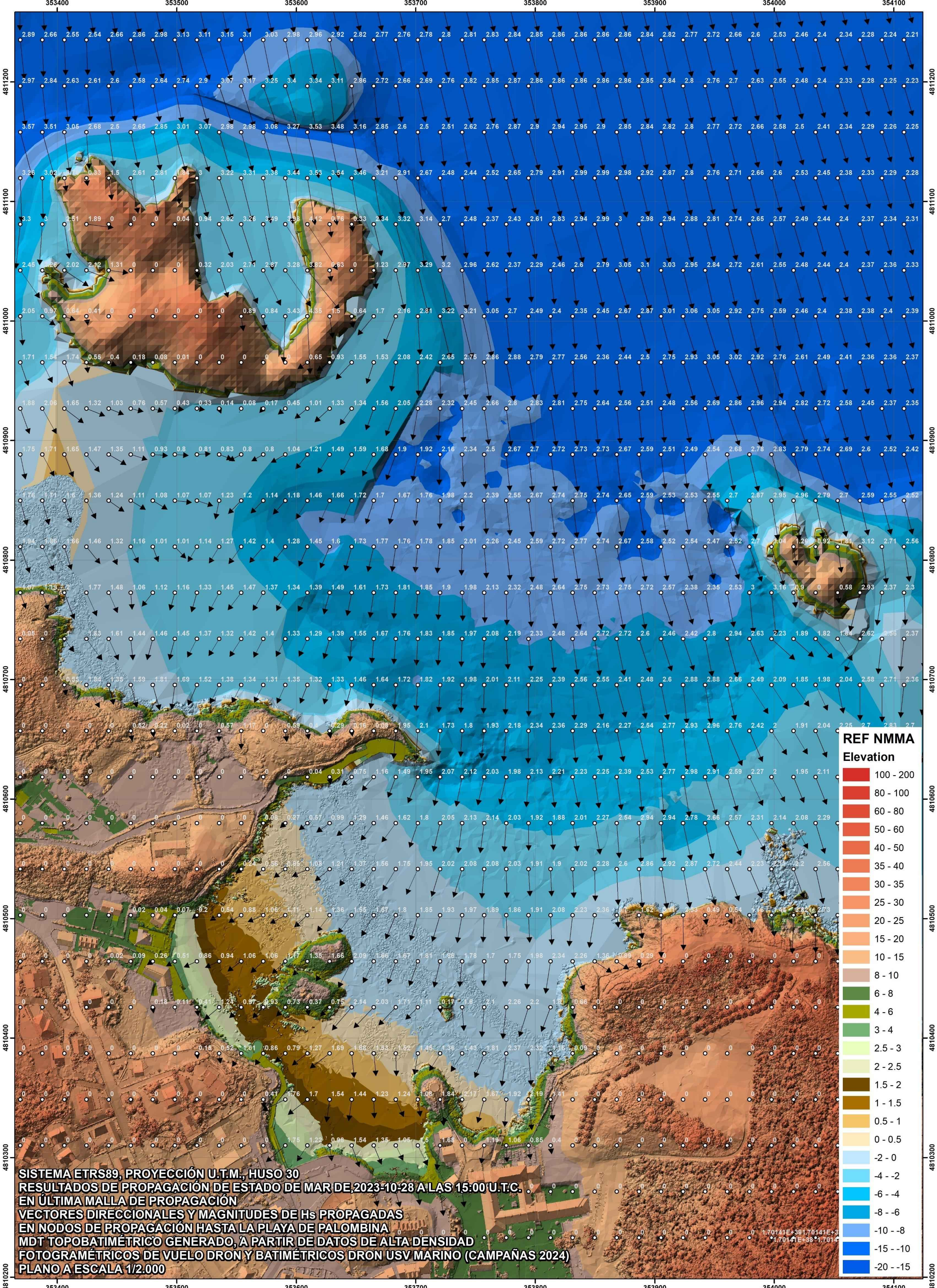




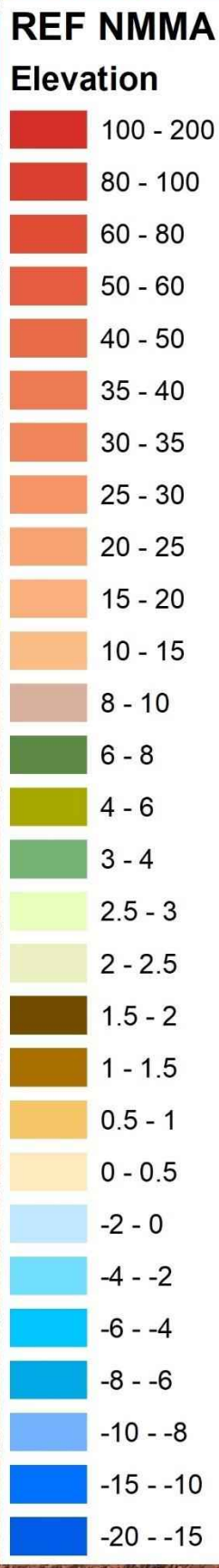


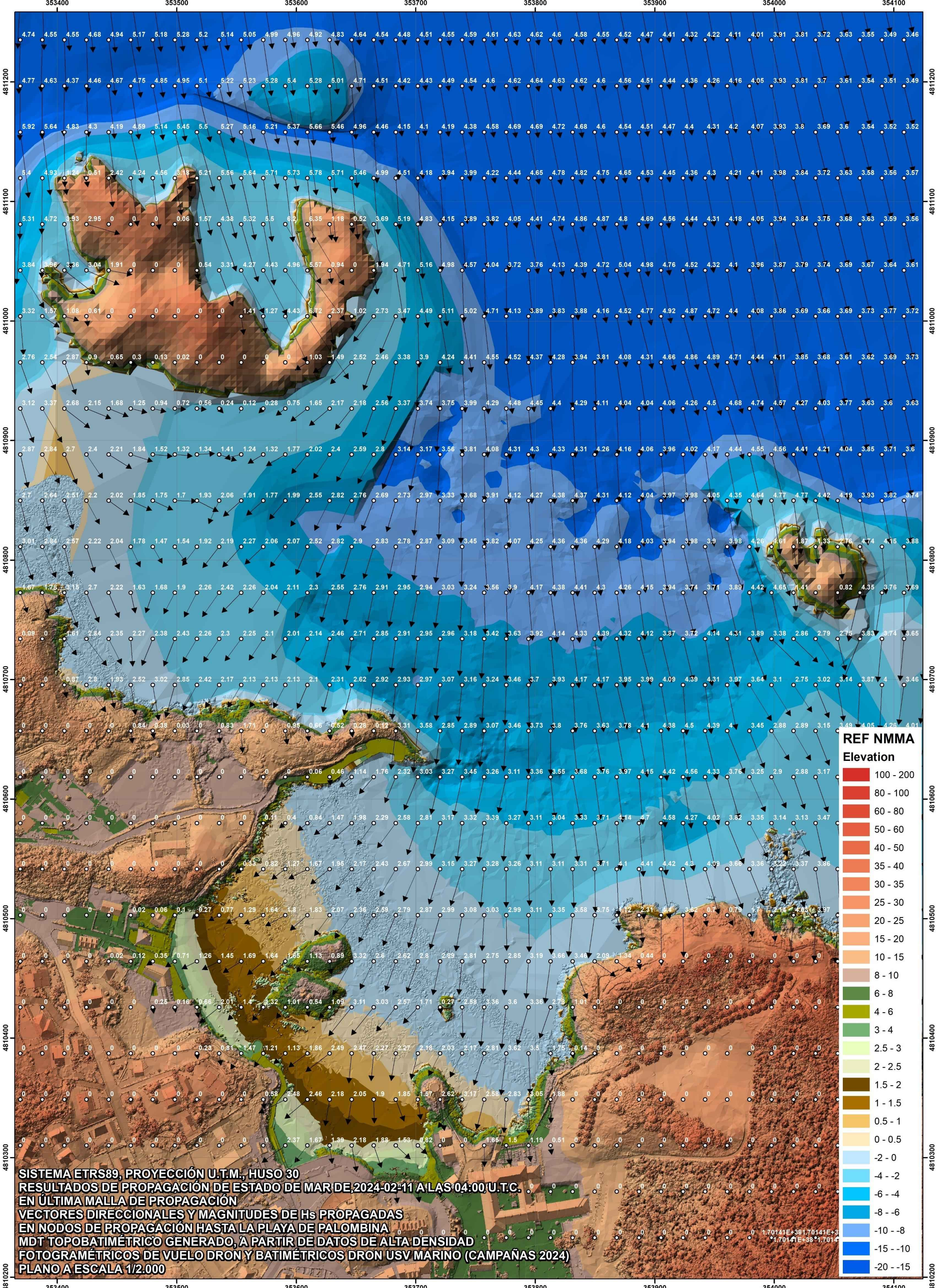


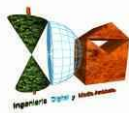




SISTEMA ETRS89, PROYECCIÓN U.T.M., HUSO 30
RESULTADOS DE PROPAGACIÓN DE ESTADO DE MAR DE 2023-10-28 A LAS 15:00 U.T.C.
EN ÚLTIMA MALLA DE PROPAGACIÓN
VECTORES DIRECCIONALES Y MAGNITUDES DE Hs PROPAGADAS
EN NODOS DE PROPAGACIÓN HASTA LA PLAYA DE PALOMBINA
MDT TOPOBATIMÉTRICO GENERADO, A PARTIR DE DATOS DE ALTA DENSIDAD
FOTOGRAMÉTRICOS DE VUELO DRON Y BATIMÉTRICOS DRON USV MARINO (CAMPAÑAS 2024)
PLANO A ESCALA 1/2.000







4. CÁLCULOS DE RUN-UP Y COTAS DE MÁXIMA INUNDACIÓN Y ALCANCE DE OLEAJES

El remonte del oleaje o run up es la sobreelevación debida a la cota que alcanza el oleaje al incidir sobre una superficie, respecto al nivel del mar en reposo, siendo uno de los principales factores de incidencia en la cota de máxima inundación a estimar. El problema principal general de los cálculos de run up reside en que no existe una ley única y general que cubra todas las situaciones posibles, por lo que su cálculo debe realizarse a partir de aproximaciones.

Se aplica en el presente estudio un doble tratamiento en cuanto a la obtención y cálculos de alcance de inundación y oleajes, aplicándose en primera instancia un tratamiento de tramo de perfil de playa para los cálculos de run-up en la zona de playa emergida de Palombina, dado que hasta el fondo de dicha playa el cálculo de la cota de máxima inundación y alcance de oleajes se corresponde íntegramente con morfologías de playa, a cuyo efecto se ha aplicado un modelo de inundación basado en la suma de los distintos incrementos debidos al oleaje y a las mareas, sobre perfiles de ejecución con una equidistancia de 2,82 m. para la obtención de los puntos de inundación máxima por perfil y la línea correspondiente de inundación y alcance de oleajes sobre el fondo de la playa de Palombina, para posteriormente, aplicarse un modelo de cálculo de incrementos de niveles marinos al incidir sobre una estructura vertical, fenómeno que tiene lugar cuando la masa de agua en su avance por la playa tras el fenómeno de rotura y run-up, alcanza el muro vertical de hormigón que se eleva sobre parte del fondo de la playa sobre la que se asienta una zona de estacionamiento asfaltado en su parte superior, siendo precisamente el análisis del posible alcance del oleaje en esta zona el objeto principal del presente estudio.

En consecuencia el análisis del posible alcance y rebase de los oleajes sobre el muro vertical sobre el que se asienta la zona de estacionamiento sobre parte de la playa de Palombina, se ha basado en un doble cálculo de fenómenos del oleaje tras la rotura en la franja de rompientes; el cálculo de run-up sobre la pendiente de la playa y el cálculo del ascenso de la masa de agua que alcanza el citado muro vertical, para determinar en su caso, la existencia de rebase y alcance en el nivel superior de la plataforma de estacionamiento de vehículos.



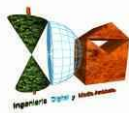
La consecución de los anteriores fenómenos y su conjunción, tiene lugar en los episodios de los mayores temporales, dado que la superficie de la playa emergida de Palombina se encuentra acotada por estructuras antrópicas como el citado muro sobre el que se asienta la zona de estacionamiento en su parte superior, limitando notablemente su extensión y la cota altimétrica hasta la que se extiende la playa (horizonte arenoso), de forma que en la base del muro de la zona de estacionamiento, la cota altimétrica en el límite de las arenas de playa con el mismo está en el entorno de las cotas +3,3 m.-+3,5 m. NMMA, por lo que la energía residual del oleaje que aún conserva sin disipar tras la rotura y ascenso por la pendiente de la playa (run-up), le permite alcanzar el muro y experimentar un incremento o ascenso de cota altimétrica al impactar la masa de agua sobre el mismo.

Esta circunstancia tendrá lugar en aquellos episodios de temporal en los que los valores de los cálculos de run-up incrementados con el correspondiente nivel mareal (es decir, la CI respecto al NMMA), superen esas cotas altimétricas del límite del fondo de la playa, es decir, cuando la CI calculada sobre la playa supere las cotas altimétricas anteriores situándose por encima de la CI de 3,6 NMMA, momento que implicará que en el fenómeno de run-up, no habrá podido el oleaje disipar toda su energía, razón por la cual conservará cierta energía residual que se transformará en un ascenso por el paramento vertical sobre el que se asienta la zona de estacionamiento en su plataforma superior. Una vez constatado lo anterior, resulta de aplicación un modelo de cálculo del ascenso de la masa de agua por el paramento vertical, que ya permite determinar si existe rebase y alcance de oleajes sobre la plataforma superior de estacionamiento.

Dado que el presente estudio de alcance de oleajes presenta una gran complejidad, tanto por la peculiar (y atractiva) morfología de esta playa como por las estructuras antrópicas con las que limitan con la parte emergida de la misma limitando su fondo de playa, se consideró necesario el disponer de la máxima precisión y densidad de datos de la morfología y superficies implicadas en los distintos fenómenos del oleaje para poder caracterizar con el máximo los mismos.



Con la finalidad anterior fueron sido realizados trabajos topográficos, fotogramétricos y batimétricos de alta densidad y precisión sobre las superficies donde concurren la mayor parte de los procesos responsables de los alcances de oleajes sobre esta morfología, habiéndose generado un MDT de alta resolución y cartografía a escala 1/500 obtenido a partir de un levantamiento fotogramétrico de alta densidad en la parte emergida obtenidos a partir de vuelo DRON ejecutado en enero de 2024, así como a partir de una batimetría de detalle de equidistancia de isobatas de 0,25 m. realizada en marzo de 2024 m. con dispositivo USV (dron marino) con equipos topográficos de precisión (GPS de precisión centimétrica multiconstelación-multifrecuencia acoplado e ecosonda tri-frecuencia a 675 Khz y 7° de apertura angular) en la zona de profundidades reducidas y playa emergida hasta la +10 NMMA (batimetría ejecutada en pleamar para solapamiento con franja fotogramétrica).

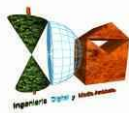


4.1. CÁLCULO DE RUN-UP Y CI CON MODELO DE INUNDACIÓN SOBRE PLAYA

El modelo aplicado para el cálculo del alcance del remonte o run-up que estimará el ascenso del oleaje tras la rotura sobre la pendiente de la playa de Palombina, se basa en la formulación propuesta por Nielsen y Hanslow (1991) para la obtención de los run up, significativo, del 2% (es uno de los modelos implantados en el software SMC 2.5, módulo de Run-up en playas del TIC). Los estudios que dieron lugar a la formulación del modelo propuesto por Nielsen y Hanslow derivados de las observaciones de exhaustivas campañas de campo sobre seis playas del sudeste de la costa australiana, pusieron de manifiesto la independencia de los resultados del run-up de la pendiente de la playa en el caso de playas cuyo valor de pendiente $m = \tan \alpha < 1/10$, es decir, mientras que en playas más reflejantes, con el límite marcado por la pendiente $m = \tan \alpha > 1/10$ se confirma la dependencia del ángulo del talud y, por tanto, del número de Iribarren.

Este método de Nielsen y Hanslow para oleaje irregular, es en el que se basa el propuesto por el anterior Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente y por la Universidad de Cantabria en su estudio y publicación del “Atlas de Inundación del litoral peninsular español” para el cálculo del run-up en playas, e incorpora el factor de corrección de Van Der Meer y Janssen (1995) que permite determinar el run-up “Ru” en un perfil compuesto por dos alineaciones a y b conocido el run-up que tendría en la primera alineación R_{u0} (Nielsen y Hanslow), así como factores que tienen en cuenta las características de rugosidad y percolación de la segunda alineación (playa seca).

De los tres valores de run-up que puede proporcionar el método de Nielsen-Hanslow, en el presente estudio se aplicará el R2%, cuyo valor son superados en un porcentaje de tiempo del 2% del estado de mar, es decir, garantizándose de este modo que el resultado que finalmente se proporcione según el precepto reglamentario (máximo temporal de la serie histórica más amplia disponible) será en realidad superado en más de cinco ocasiones (por el 2% de olas superiores excluidas por el run-up del 2%).



Dicha formulación y modelo empleado de Nielsen-Hanslow con los coeficientes de adaptación a la morfología específica de cada playa o zona costera de bajo perfil introducidos por Van Der Meer y Janssen, se esquematiza a continuación:

$$R_{2\%}=1,98 * 0,04 * (H_{spp} L_0)^{1/2}, \text{ para pendientes } < 10\% (m<0,1), \text{ y}$$

$$R_{2\%}=1,98 * 0,47 * (H_{spp} L_0)^{1/2} * m, \text{ para pendientes } > 10\% (m>0,1),$$

donde:

$R_{2\%}$ = Run-up cuyo valor es superado en un porcentaje de tiempo del 2% del temporal
 H_{spp} y L_0 son la altura de ola significativa a pie de playa antes de rotura y L_0 la longitud de onda del oleaje en profundidades indefinidas

Siendo:

$$L_0 = gT_p^2 / 2\pi \quad (T_p = \text{período de pico})$$

$m = \tan \alpha$, donde α es el ángulo de la pendiente media del frente de playa.

siendo el número de Iribarren $\mathcal{E} = m / (H_{spp} / L_0)^{1/2}$

Los factores de corrección de Van Der Meer y Jansen y rugosidad y percolación, matizan la formulación a las condiciones y morfología más específicas de cada zona, ponderando las cotas de inundación obtenidas por perfil (CI) para la intersección sobre el MDT emergido en los casos de existencia de terrenos bajos al trasdós del cordón dunar, considerando la existencia de una doble pendiente (pendientes muy reducidas al trasdós del cordón dunar o en posiciones interiores a la playa), la rugosidad o la percolación en la superficie de incidencia (playa seca), de forma que las penetraciones de la inundación en las posiciones más interiores, son atenuadas en la cota final que es intersecada sobre el terreno, o dicho de otra forma, en el caso de penetraciones interiores a la playa seca por existencia de terrenos inferiores a la CI calculada, se interseca el MDT en valores reducidos (ponderados) de la CI máxima obtenida ($Ru_{2\%}$), según se refleja en el siguiente gráfico:

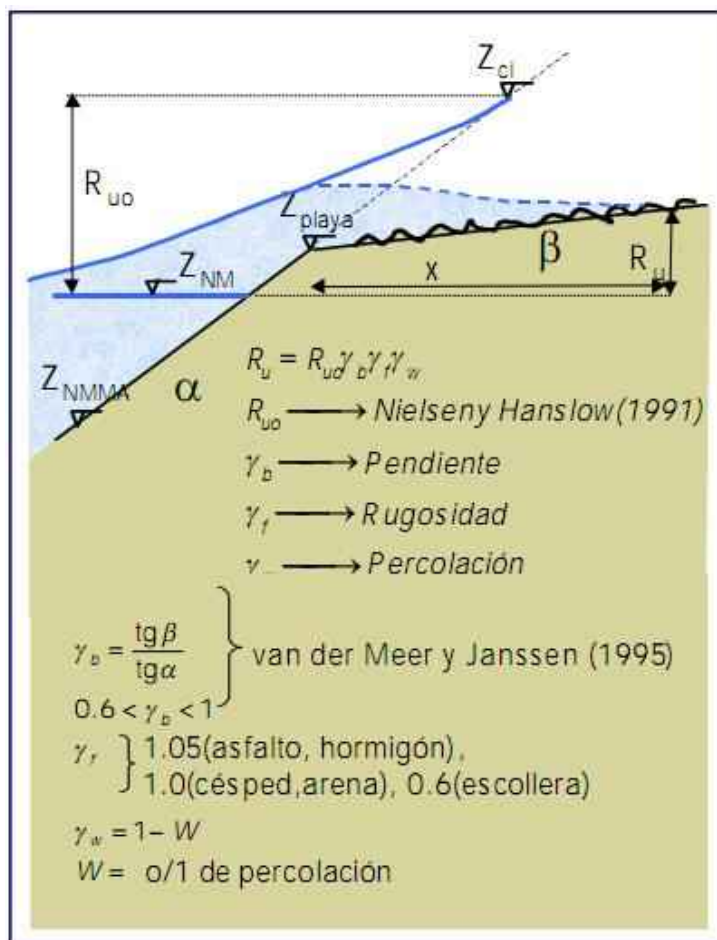


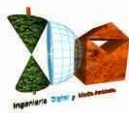
Gráfico ilustrativo de los factores de corrección

Una vez propagados los valores direccionales del oleaje hasta pie de playa antes de rotura en el perfil batimétrico de la playa de Palombina, y de esta forma obtenidos sus correspondientes valores escalares a pie de playa en el inicio de la zona de rompientes, además de depender de dichos valores calculados de H_{spp} y del T_p , el remonte del oleaje dependerá también de la pendiente del frente de playa (tanto en la zona de rompientes como de la playa emergida donde incide el oleaje), que han sido obtenidos del MDT generado a partir de un levantamiento fotogramétrico de alta densidad procedente de un vuelo DRON efectuado con fecha de enero de 2024 sobre la playa de Palombina y en gran parte de la ensenada de Celorio, y de la batimetría realizada en campaña de campo de marzo de 2024 con dispositivo USV (dron marino) dotado con G.P.S. centimétrico multiconstelación y multifrecuencia acoplado con ecosonda de triple frecuencia monohaz trabajando a 625 khz, ambos con la referencia altimétrica al N.M.M.A. e integrados en un MDT topo-batimétrico digital



Para los cálculos de los perfiles de los frentes de los subtramos de playa en la zona de rompientes y playa emergida y en función de las profundidades de rotura que correspondería a las alturas de ola propagadas hasta pie de playa, se han tomado los perfiles comprendiendo la franja de rompientes desde la playa sumergida en la franja de rompientes (aproximadamente desde las isobata -10,5) hasta el fondo de playa (en el entorno de las cotas +3,3 m. -+3,5 m. NMMA, habiéndose definido a lo largo del tramo de estudio correspondiente a la zona del muro vertical de hormigón coronado por plataforma asfaltada dedicada al estacionamiento de vehículos que se alza sobre el fondo de playa, 30 perfiles-transectos en la morfología de playa atendiendo a la geometría de la línea de orilla y batimétricas de rompientes, sobre los cuales se han realizado los cálculos de run-up, que proporcionarán 30 valores respectivamente de inundación sobre la playa de Palombina, una vez incrementados en el nivel mareal correspondiente sincronizado al estado de mar a lo largo de dichos tramos de costa, para cada uno de los 5 estados de mar tomados a partir de los datos del Puntos Simar 3108040 en profundidades indefinidas, para su propagación hasta pie de playa y la posterior ejecución del modelo de inundación, los cuales configurarán 5 resultados de inundación por perfil (150 valores de inundación en total, 30 por cada uno de los 5 estados de mar seleccionados finalmente correspondientes al período de 5 años fijado entre 2014-2018 tras el análisis del clima marítimo y de los estados de mar horarios del período 1995-2024).

El factor de percolación γ_w aplicado ha sido de $\gamma_w = 1$, dado que al encontrarse la playa acotada en la zona de estudio por estructuras antrópicas en un entorno urbanizado, la mayor parte de su superficie se encuentra en la franja intermareal, en función de los datos analizados del mareógrafo 3108 de Gijón 2, que han determinado un máximo mareal (marea astronómica + marea meteorológica) en el período de estudio 1995-actualidad de +2,913 m. NMMA, así como por los datos concretos de incrementos mareales correspondientes a los 5 estados de mar finalmente seleccionados, que comprenden desde +1,67 m. hasta 2,68 m. NMMA, por lo que teniendo en cuenta el incremento medio del nivel del mar o set-up en la zona de rompientes hasta la playa emergida, los incrementos mareales, la acción del run-up y la limitación del fondo de playa, se deduce que en los episodios de los máximos temporales se puede considerar que para una mínima duración del temporal la saturación de la playa será completa (una estimación realizada en un episodio de máximo temporal con un promedio de marea de +2 m., un set-up en el entorno de +1 m, NMMA ya proporcionan un nivel que cubre prácticamente toda la playa emergida hasta el fondo antropizado, sin tener en cuenta el run-up) y en consecuencia $\gamma_w = 1$.

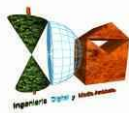


Asimismo el factor reductor por escollera debe adoptar el valor de $\gamma_f = 1$, dado que la playa de Palombina no cuenta con una escollera de protección o una defensa en la pendiente emergida a lo largo de los transectos de ejecución del modelo de inundación desde rotura hasta el muro de hormigón sobre el que se sustenta la zona de estacionamiento en su plataforma superior en el fondo de playa analizado.

El factor de Van Der Meer y Janssen para la ponderación de una reducción en el caso de una pendiente emergida inferior a la sumergida o en casos de pendiente negativa, adoptará en este caso igualmente el valor de $\gamma_b = 1$, dado que el perfil de la playa mantiene una configuración aproximada a playa infinita, estando los promedios de playa sumergida en rompientes y playa emergida pendientes promedio muy similares, lo que se traduce en un factor $\gamma_b = 1$.

La expresión final del Run up corregida por estos coeficientes en las ejecuciones de los modelos de inundación en los 30 perfiles, será la de $R_{u2\%} = R_{0u2\%} \cdot \gamma_f \cdot \gamma_b \cdot \gamma_w$ (factores de corrección morfológica de rugosidad, pendiente y percolación).

Para los cálculos de los perfiles de los frentes de subtramos de playa en la zona de rompientes y playa emergida y en función de las profundidades de rotura que correspondería a las alturas de ola propagadas hasta pie de playa, se han tomado los perfiles comprendiendo la franja de rompientes aproximadamente desde las isobatas en el intervalo -10 m. a -10,6 m. referidas al N.M.M.A. (en función de las propagaciones de los oleajes hasta la ensenada de Celorio, son profundidades a las cuales todavía no ha tenido lugar el fenómeno de rotura del oleaje), hasta el límite interior del fondo de playa que limita con el muro vertical de hormigón sobre el que se sustenta la plataforma superior de terrenos antropizados en zona de estacionamiento de vehículos, habiéndose definido en el tramo de estudio 30 perfiles-transectos de incidencia atendiendo a la geometría de la línea de orilla y batimétricas finales de rompientes así como a las direcciones dominantes de vectores del oleaje en la propagación en dicha franja, sobre los cuales se han realizado los cálculos de run-up, que proporcionarán 30 valores de inundación por cada uno de los 5 temporales propagados, una vez incrementados en el nivel mareal correspondiente sincronizado al estado de mar a lo largo de dicho tramo de costa de estudio, para los 5 temporales seleccionados como responsables de los máximos niveles tras el análisis de datos horarios analizados en el máximo período disponible de datos (150 datos de CI sobre todos los perfiles en los tres temporales calculados), a partir de los cuales se tomarán los máximos valores que configurarán la línea solución.



Se adjuntan varias series de planos que recogen tanto la morfología de la playa y zona de estudio en imágenes 3D obtenidas por renderización de las nubes de puntos super-densas generadas a partir de los vuelos dron de alta resolución y datos RTK GNSS de precisión centimétrica en las campañas de enero y marzo de 2024, los planos en los que se detallan las posiciones, geometrías y pendientes de los perfiles/transectos a escala 1/750 sobre el MDT topo-batimétrico y sobre la ortofoto de altas resoluciones generados a partir de dichos trabajos topográficos y fotogramétricos realizados entre enero y marzo de 2024, en coordenadas del sistema ETRS89, elipsoide GRS80, Proyección U.T.M., Huso 30, en los que se representan los 30 perfiles de ejecución de los modelos de inundación sobre la playa de Palombina, indicándose en el plano sobre MDT topo-batimétrico la pendiente promedio por perfil calculada sobre dicho MDT con el método de ajuste por mínimos cuadrados desde la posición del punto antes de rotura (en el entorno de la batimétrica -10,5 NMMA) hasta el límite del fondo de playa (en el entorno de la cota +3,5 NMMA), así como sobre ortofoto con el identificador de los 30 perfiles, para su correlación con sus correspondientes gráficos (croquis de los perfiles).

Se adjuntan a continuación de las series de planos anteriores dos series de gráficos correspondientes a los 30 perfiles de dichas líneas sobre el MDT topo-batimétrico generado desde la franja de rompientes hasta el límite interior del fondo de playa emergida, una de ellas desde el extremo en la playa sumergida en el entorno de la batimétrica (-10,5 NMMA) hasta el límite del fondo de playa sin considerar las estructuras antrópicas al trasdós de la misma, siendo esta serie sobre las que la aplicación que opera en entorno GIS ha obtenido las pendientes para la formulación de Nielsen-Hanslow de la playa desde rompientes hasta la playa emergida, desde el entorno de la isobatas -10 m. a -10,6 m. NMMA hasta el entorno de las cotas + 3,3 m. - +3,6 m. NMMA del fondo de playa, habiendo sido esta primera serie la que se corresponde con las pendientes de los perfiles consignadas en planos y tablas y que son las tenidas en cuenta en los cálculos, y una segunda serie en la que los croquis de los perfiles reflejan el perfil completo recogido en los planos anteriores, es decir, incluyendo las morfologías de las estructuras al trasdós de la playa, hasta donde se extiende la geometría de cada perfil según los planos, a diferencia de la anterior serie.

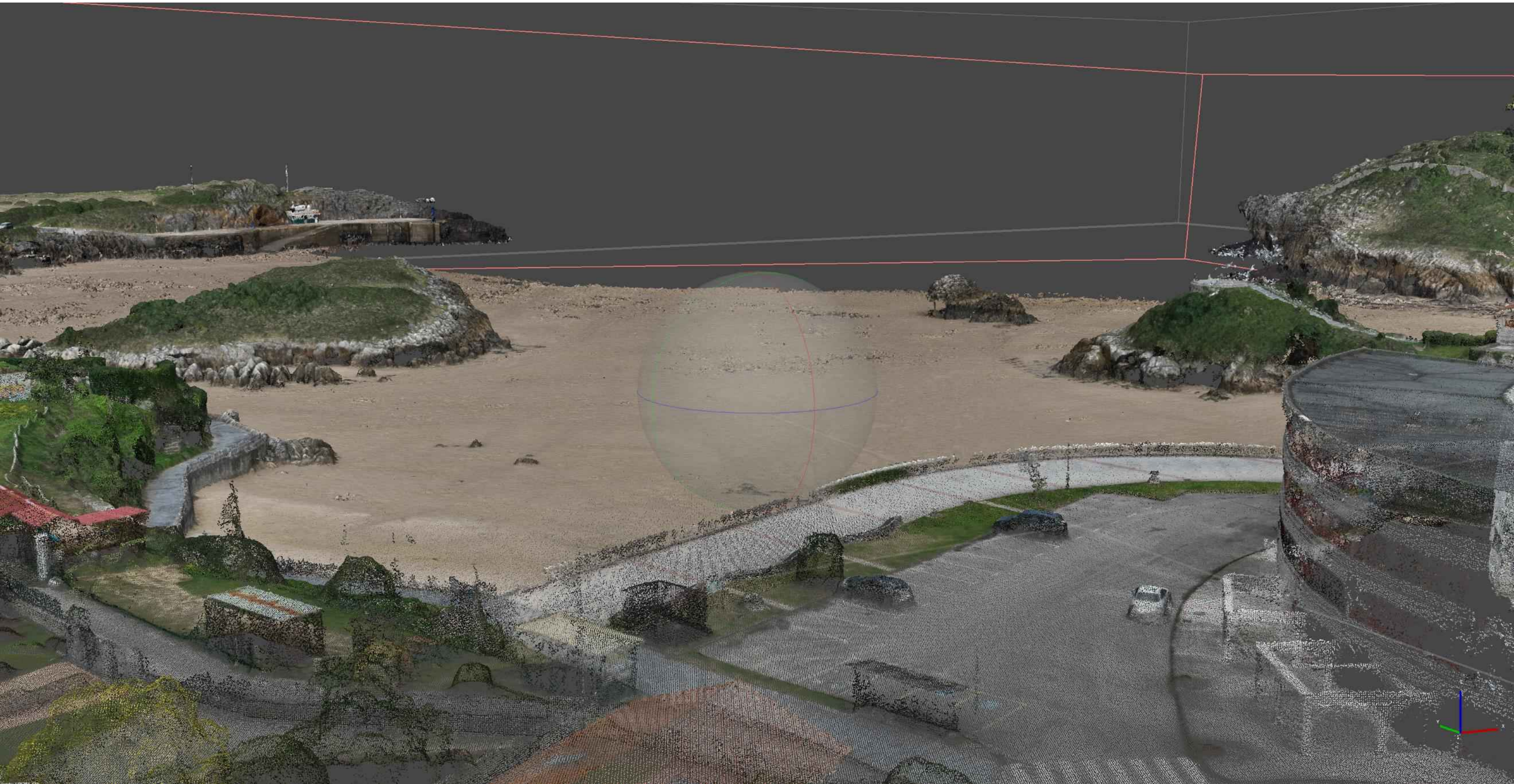


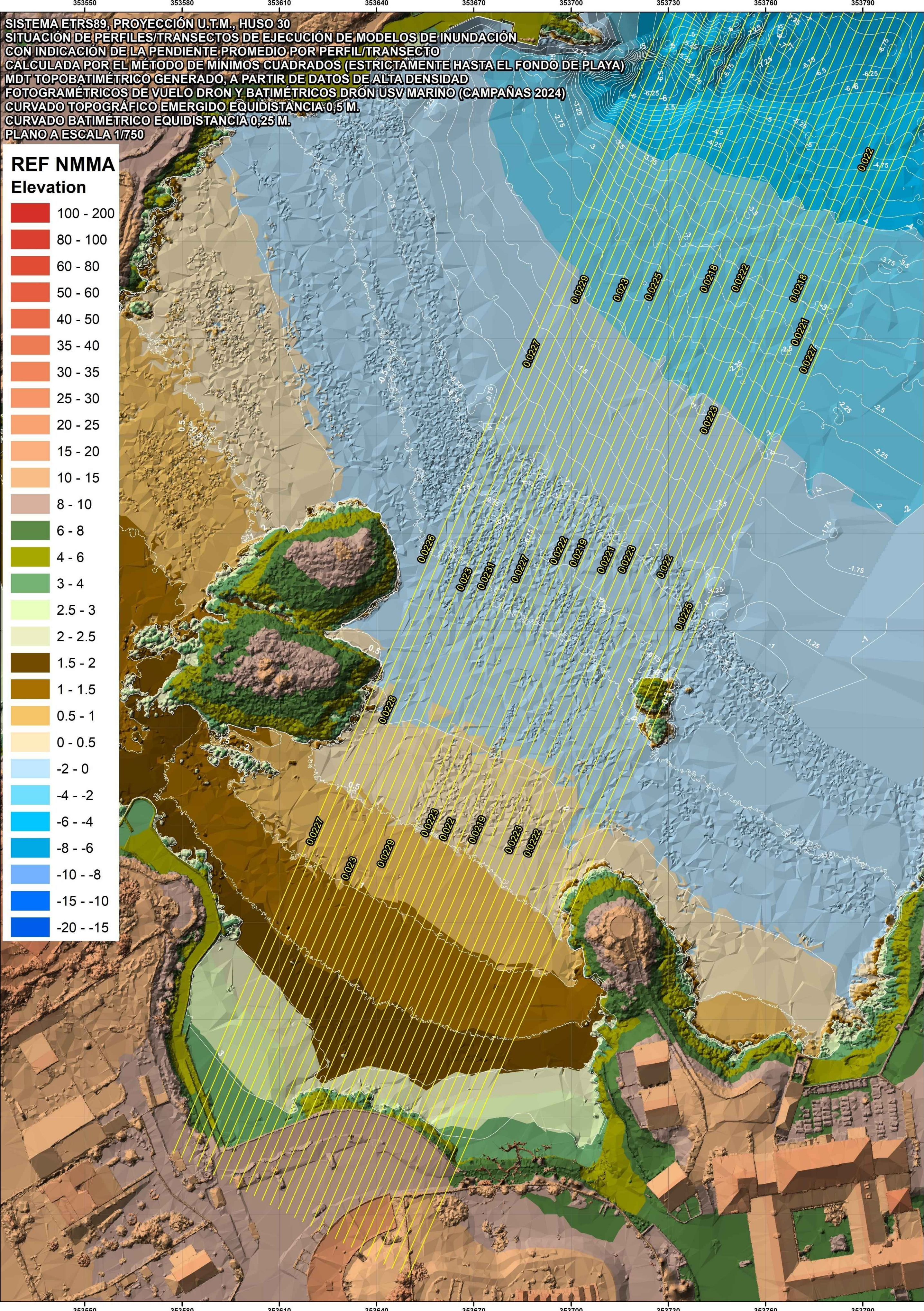










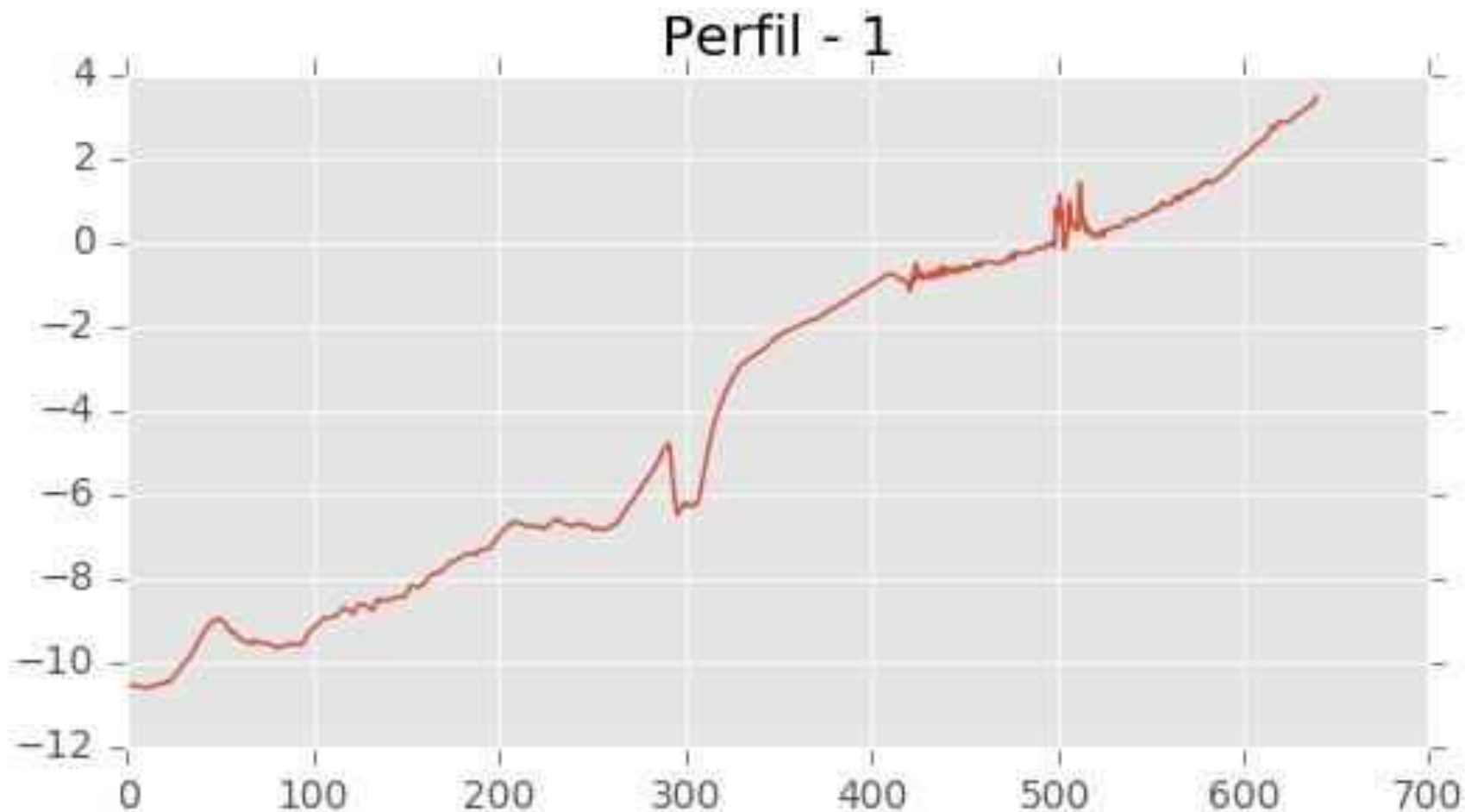




SISTEMA ETRS89, PROYECCIÓN U.T.M., HUSO 30
SITUACIÓN DE PÉRFILES/TRANSECTOS DE EJECUCIÓN DE MODELOS DE INUNDACIÓN
CON INDICACIÓN DEL IDENTIFICADOR POR PÉRFIL/TRANSECTO
ORTOFOTO DE ALTA RESOLUCIÓN GENERADA A PARTIR DE TRABAJOS FOTOGRAMÉTRICOS REALIZADOS EN CAMPAÑA DE ENERO 2024
PLANO A ESCALA 1/750



HASTA EL FONDO DE PLAYA QUE HAN DADO LUGAR A LAS PENDIENTES PROMEDIO CONSIGNADAS EN LOS PLANOS Y TABLAS, SIN INCLUIR LAS MORFOLOGÍAS ANTRÓPICAS QUE COMPRENDE LA EXTENSIÓN COMPLETA DE CADA PERFIL





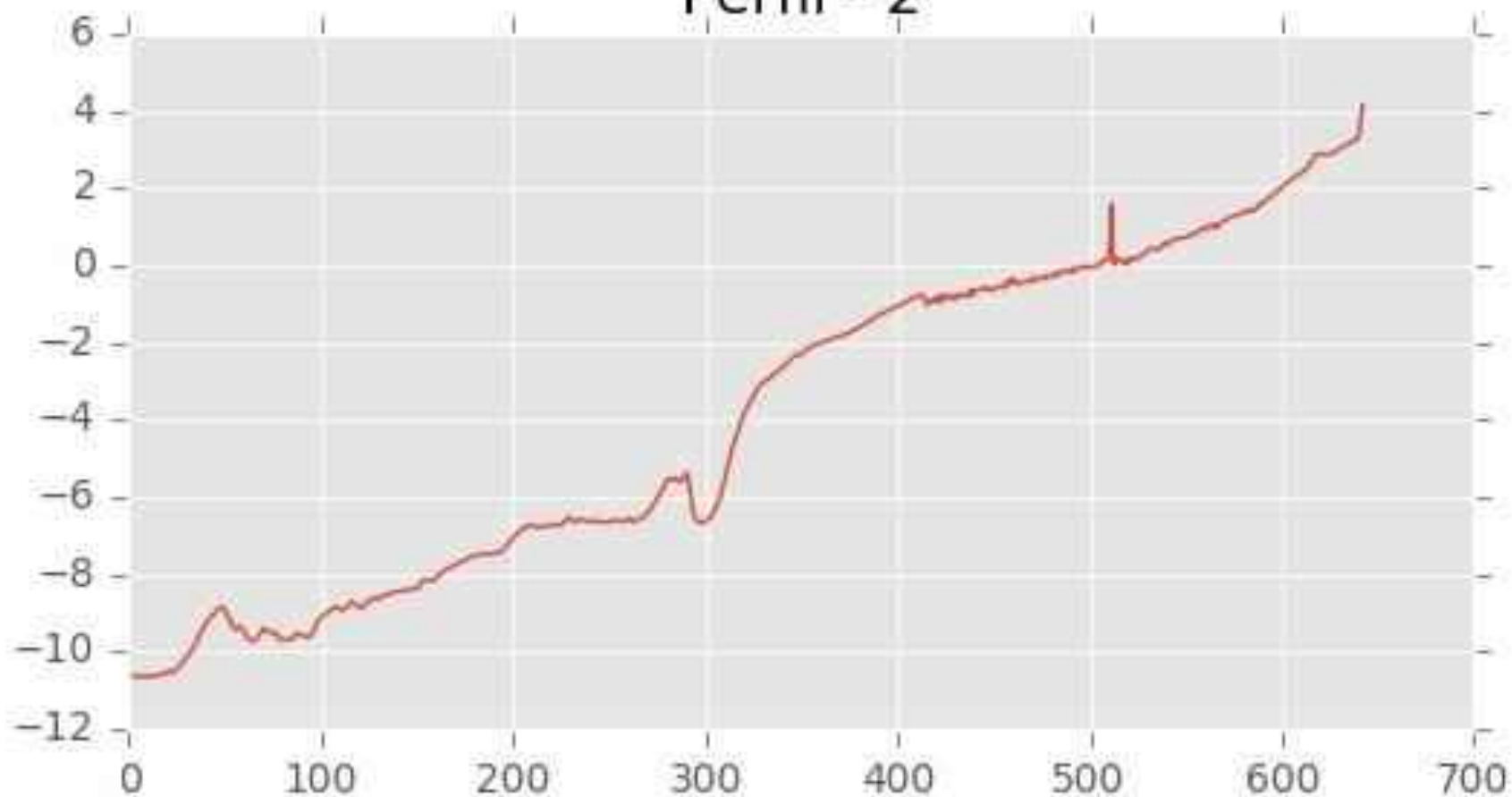
INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)

C/ Cañadilla 6, local 68, C. Comercial Coronado, Las Rozas de Madrid 28231, Madrid

Pza. de la Montañeta 4, entresuelo, 03001 Alicante

Tfno.: 918961731; Fax: 918903410; e-mail: idyma@idyma.es

Perfil - 2



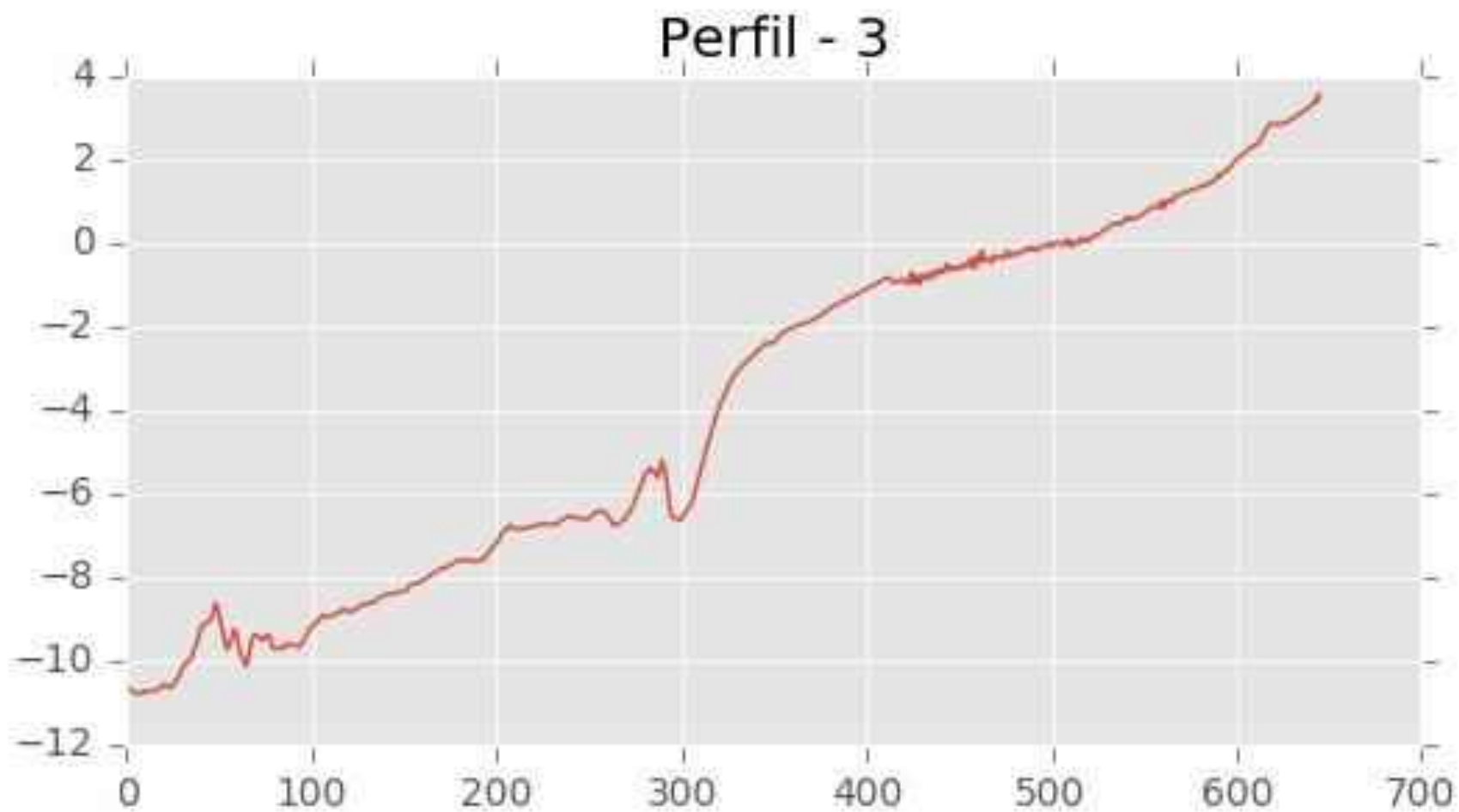


INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)

C/ Cañadilla 6, local 68, C. Comercial Coronado, Las Rozas de Madrid 28231, Madrid

Pza. de la Montañeta 4, entresuelo, 03001 Alicante

Tfno.: 918961731; Fax: 918903410; e-mail: idyma@idyma.es



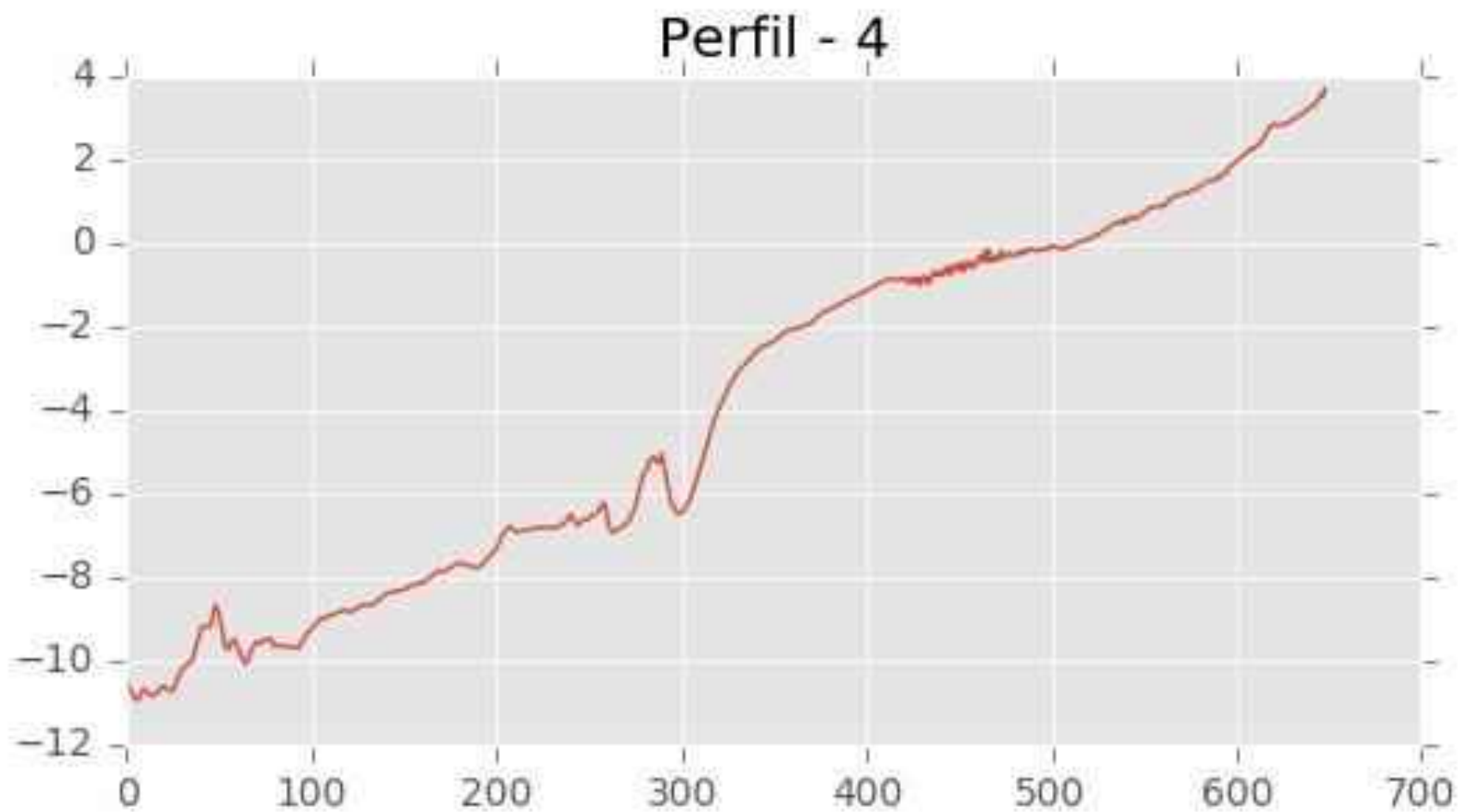


INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)

C/ Cañadilla 6, local 68, C. Comercial Coronado, Las Rozas de Madrid 28231, Madrid

Pza. de la Montañeta 4, entresuelo, 03001 Alicante

Tfno.: 918961731; Fax: 918903410; e-mail: idyma@idyma.es



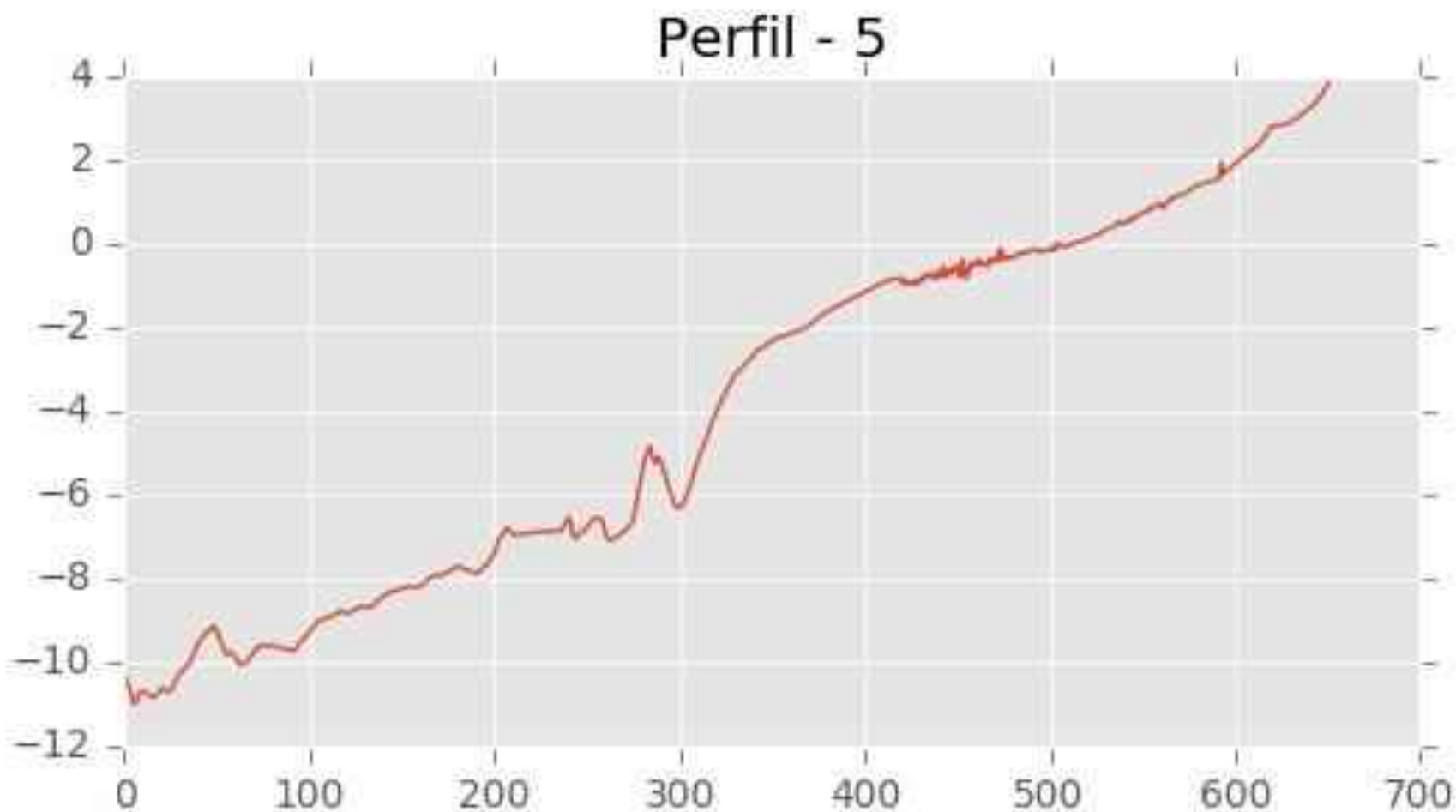


INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)

C/ Cañadilla 6, local 68, C. Comercial Coronado, Las Rozas de Madrid 28231, Madrid

Pza. de la Montañeta 4, entresuelo, 03001 Alicante

Tfno.: 918961731; Fax: 918903410; e-mail: idyma@idyma.es



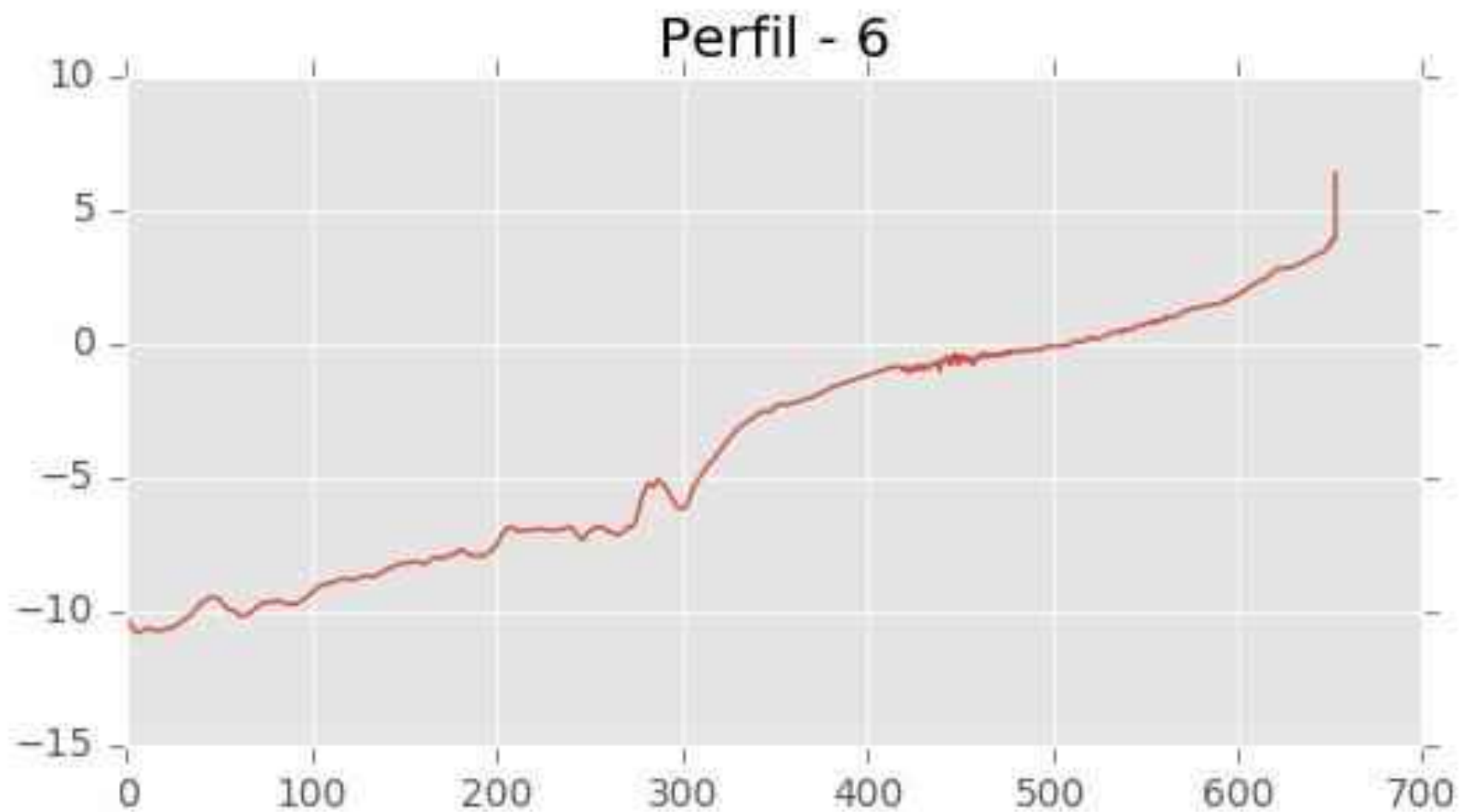


INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)

C/ Cañadilla 6, local 68, C. Comercial Coronado, Las Rozas de Madrid 28231, Madrid

Pza. de la Montañeta 4, entresuelo, 03001 Alicante

Tfno.: 918961731; Fax: 918903410; e-mail: idyma@idyma.es



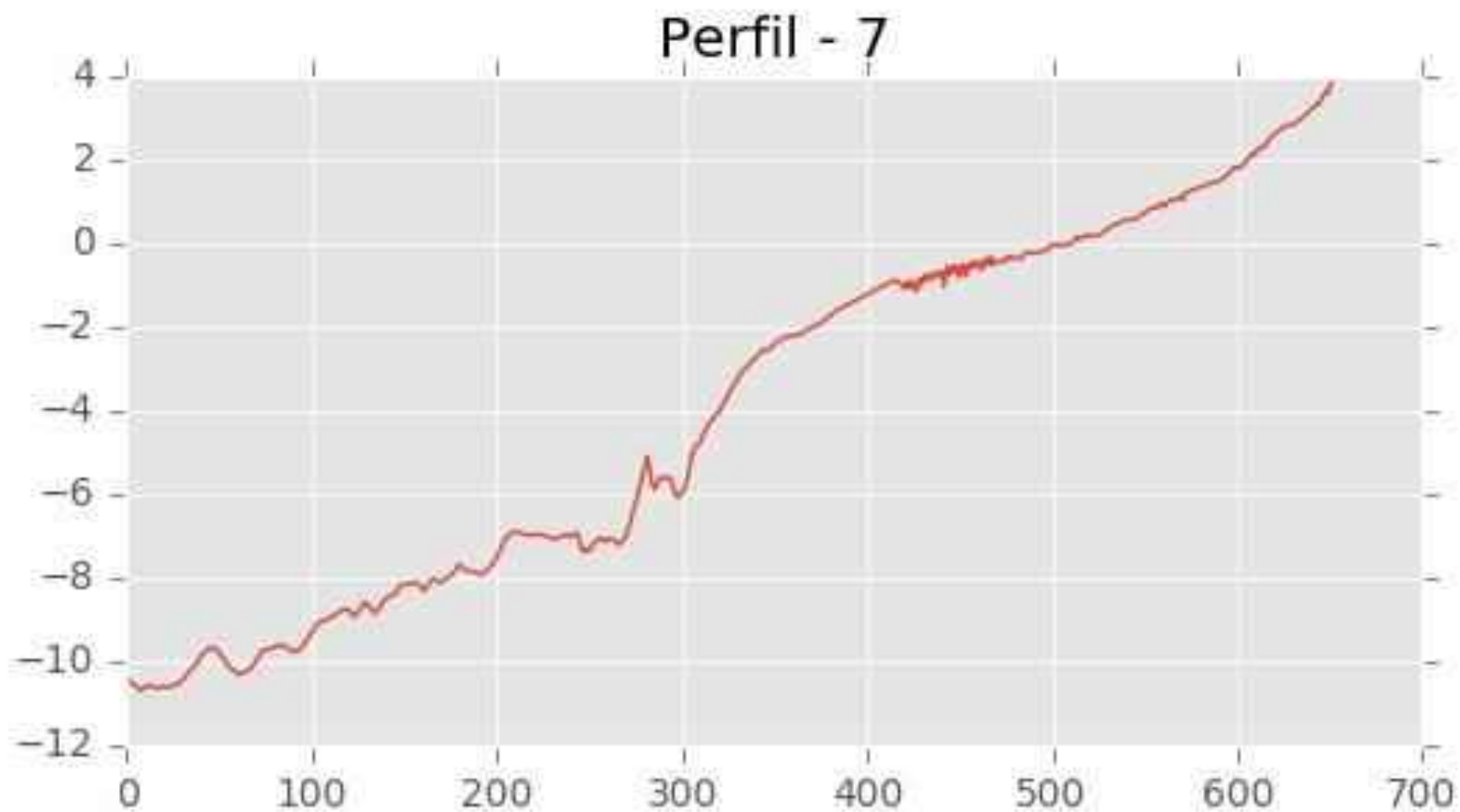


INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)

C/ Cañadilla 6, local 68, C. Comercial Coronado, Las Rozas de Madrid 28231, Madrid

Pza. de la Montañeta 4, entresuelo, 03001 Alicante

Tfno.: 918961731; Fax: 918903410; e-mail: idyma@idyma.es



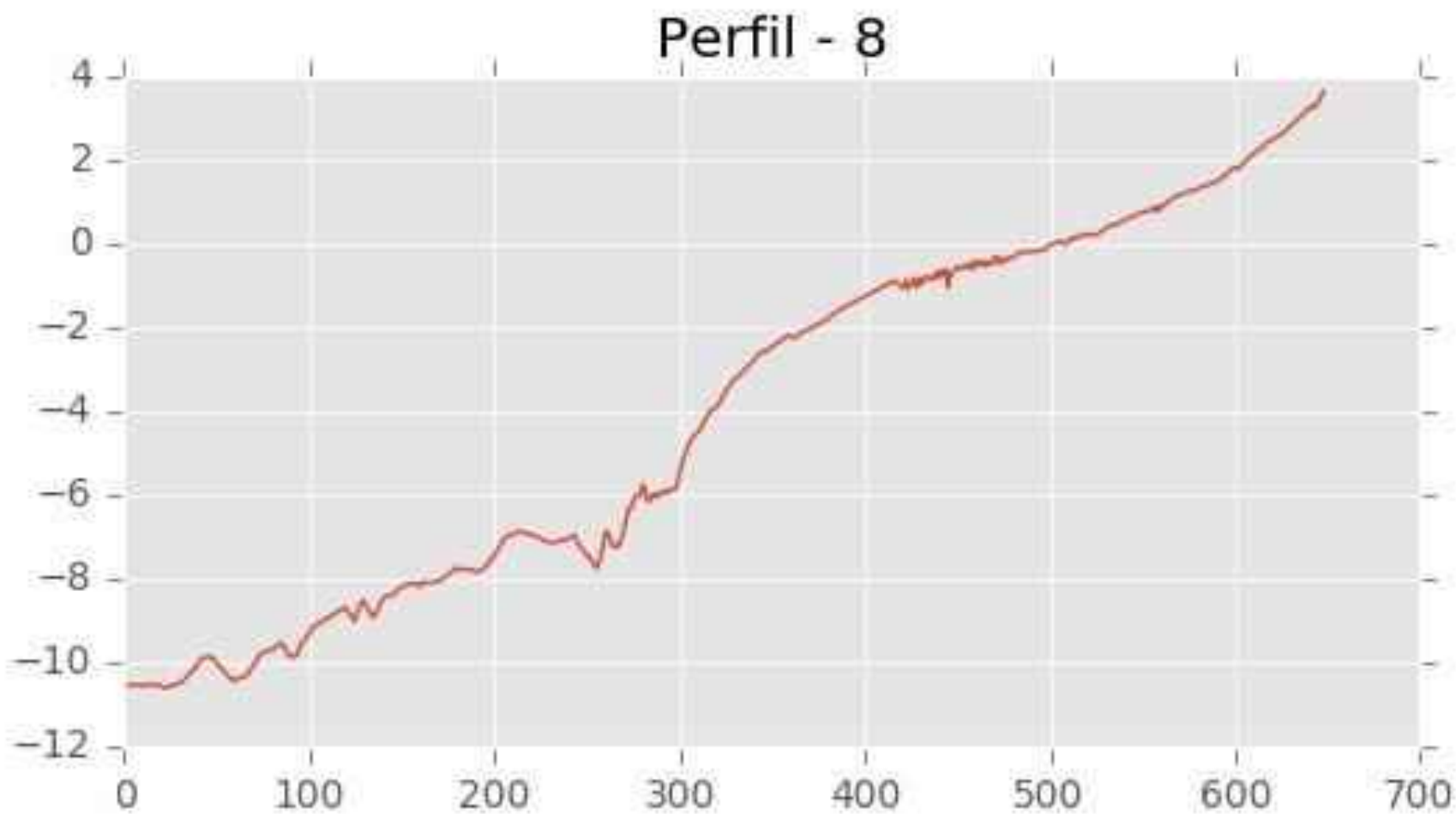


INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)

C/ Cañadilla 6, local 68, C. Comercial Coronado, Las Rozas de Madrid 28231, Madrid

Pza. de la Montañeta 4, entresuelo, 03001 Alicante

Tfno.: 918961731; Fax: 918903410; e-mail: idyma@idyma.es





INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)

C/ Cañadilla 6, local 68, C. Comercial Coronado, Las Rozas de Madrid 28231, Madrid

Pza. de la Montañeta 4, entresuelo, 03001 Alicante

Tfno.: 918961731; Fax: 918903410; e-mail: idyma@idyma.es



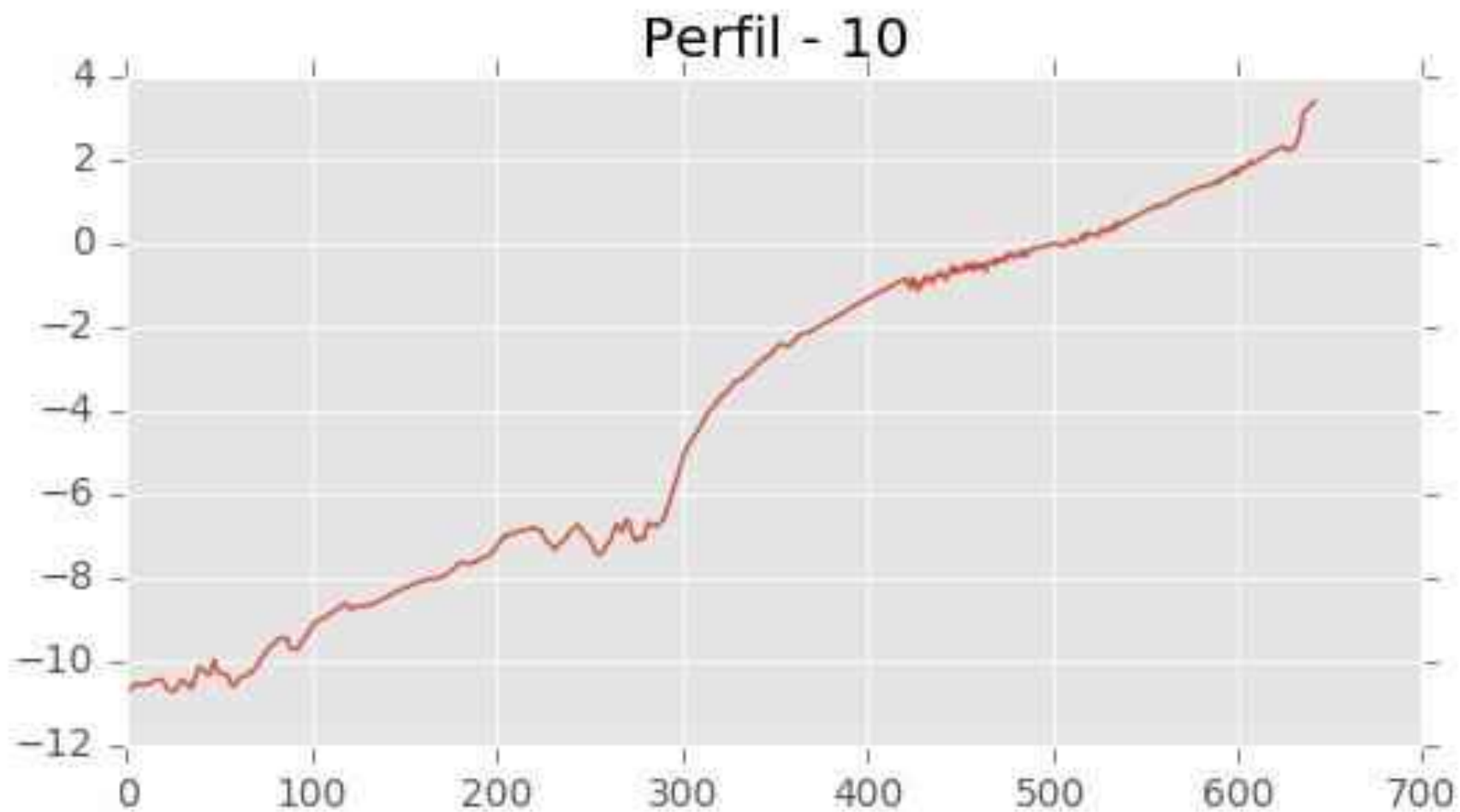


INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)

C/ Cañadilla 6, local 68, C. Comercial Coronado, Las Rozas de Madrid 28231, Madrid

Pza. de la Montañeta 4, entresuelo, 03001 Alicante

Tfno.: 918961731; Fax: 918903410; e-mail: idyma@idyma.es



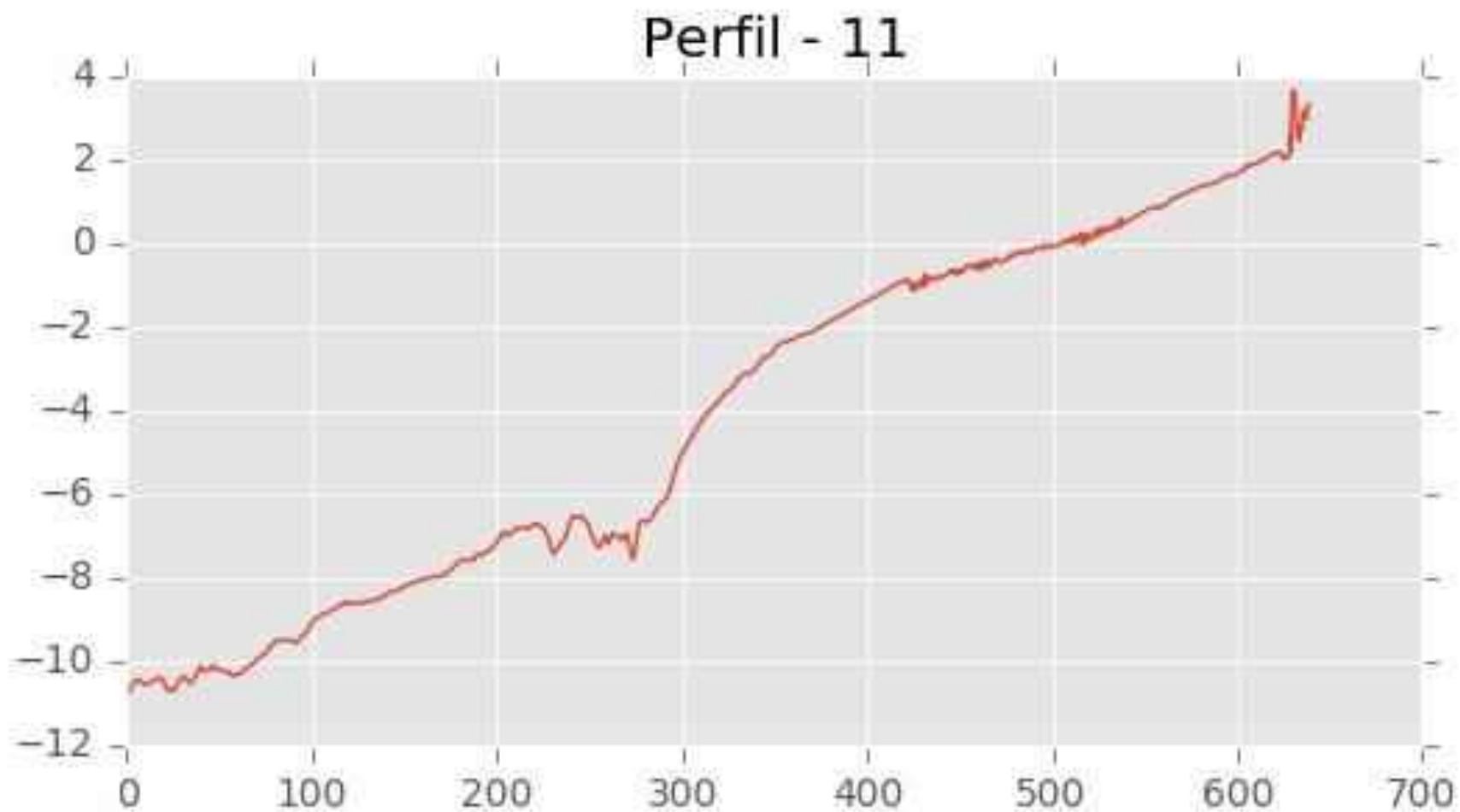


INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)

C/ Cañadilla 6, local 68, C. Comercial Coronado, Las Rozas de Madrid 28231, Madrid

Pza. de la Montañeta 4, entresuelo, 03001 Alicante

Tfno.: 918961731; Fax: 918903410; e-mail: idyma@idyma.es



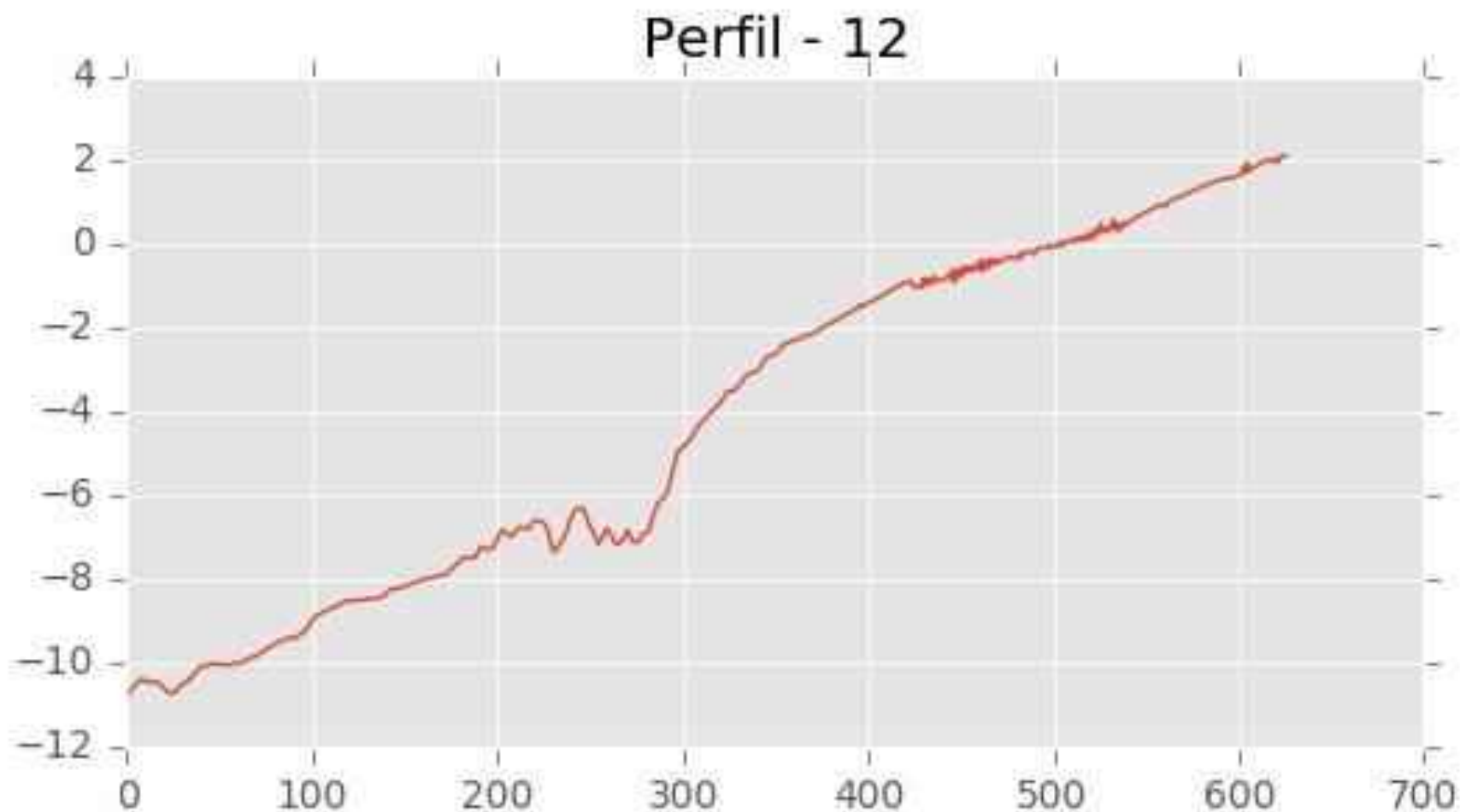


INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)

C/ Cañadilla 6, local 68, C. Comercial Coronado, Las Rozas de Madrid 28231, Madrid

Pza. de la Montañeta 4, entresuelo, 03001 Alicante

Tfno.: 918961731; Fax: 918903410; e-mail: idyma@idyma.es





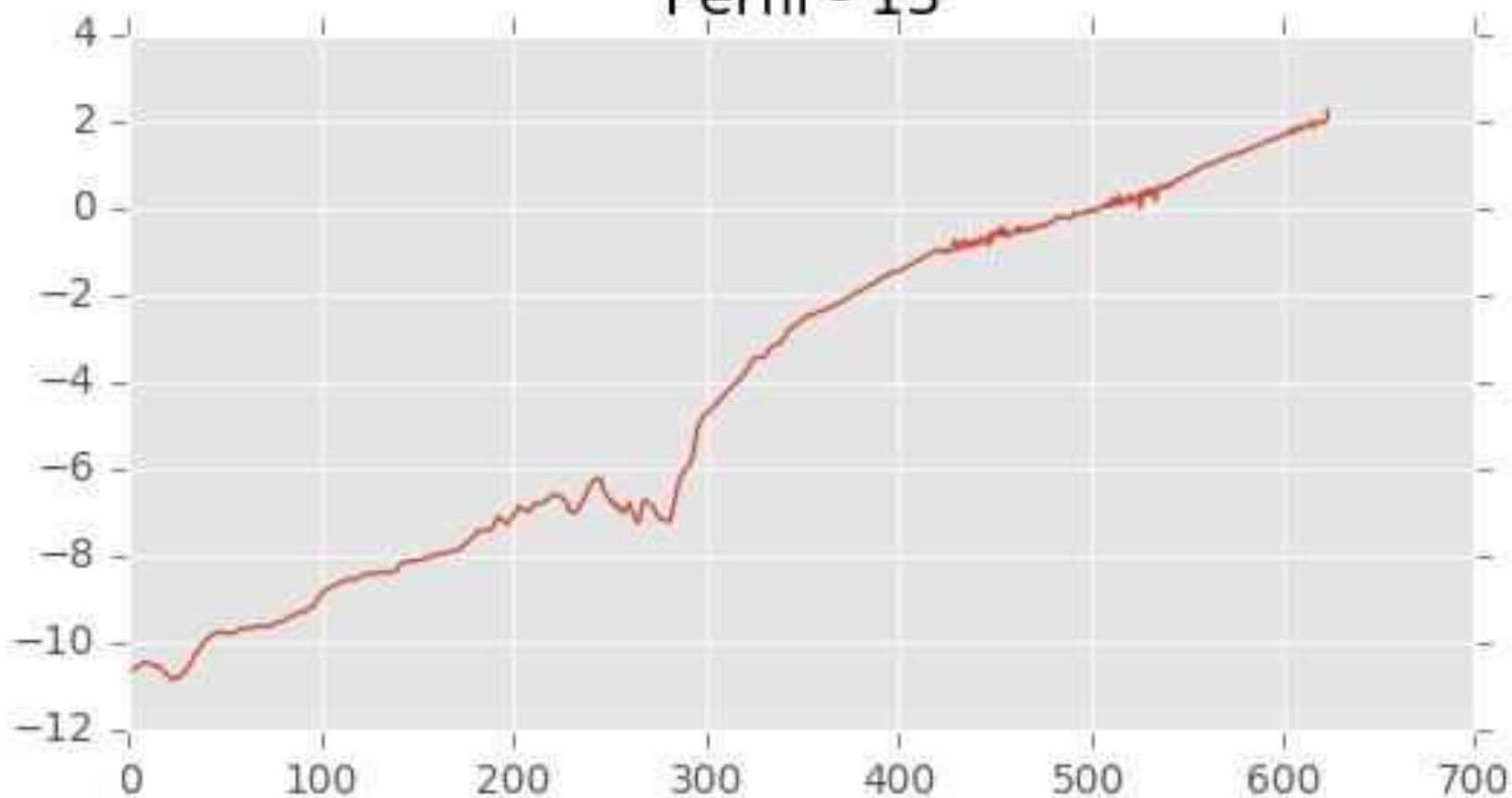
INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)

C/ Cañadilla 6, local 68, C. Comercial Coronado, Las Rozas de Madrid 28231, Madrid

Pza. de la Montañeta 4, entresuelo, 03001 Alicante

Tfno.: 918961731; Fax: 918903410; e-mail: idyma@idyma.es

Perfil - 13



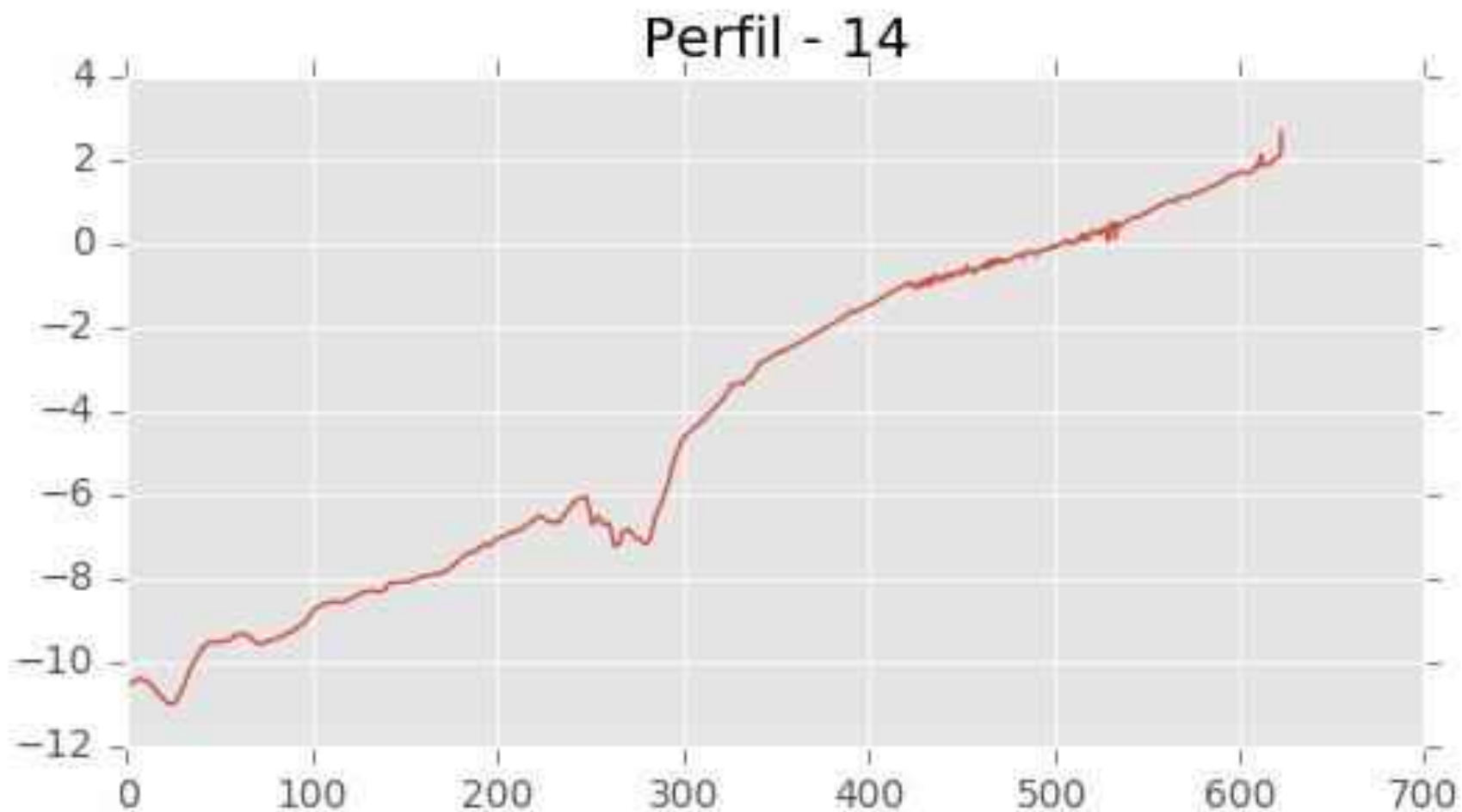


INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)

C/ Cañadilla 6, local 68, C. Comercial Coronado, Las Rozas de Madrid 28231, Madrid

Pza. de la Montañeta 4, entresuelo, 03001 Alicante

Tfno.: 918961731; Fax: 918903410; e-mail: idyma@idyma.es



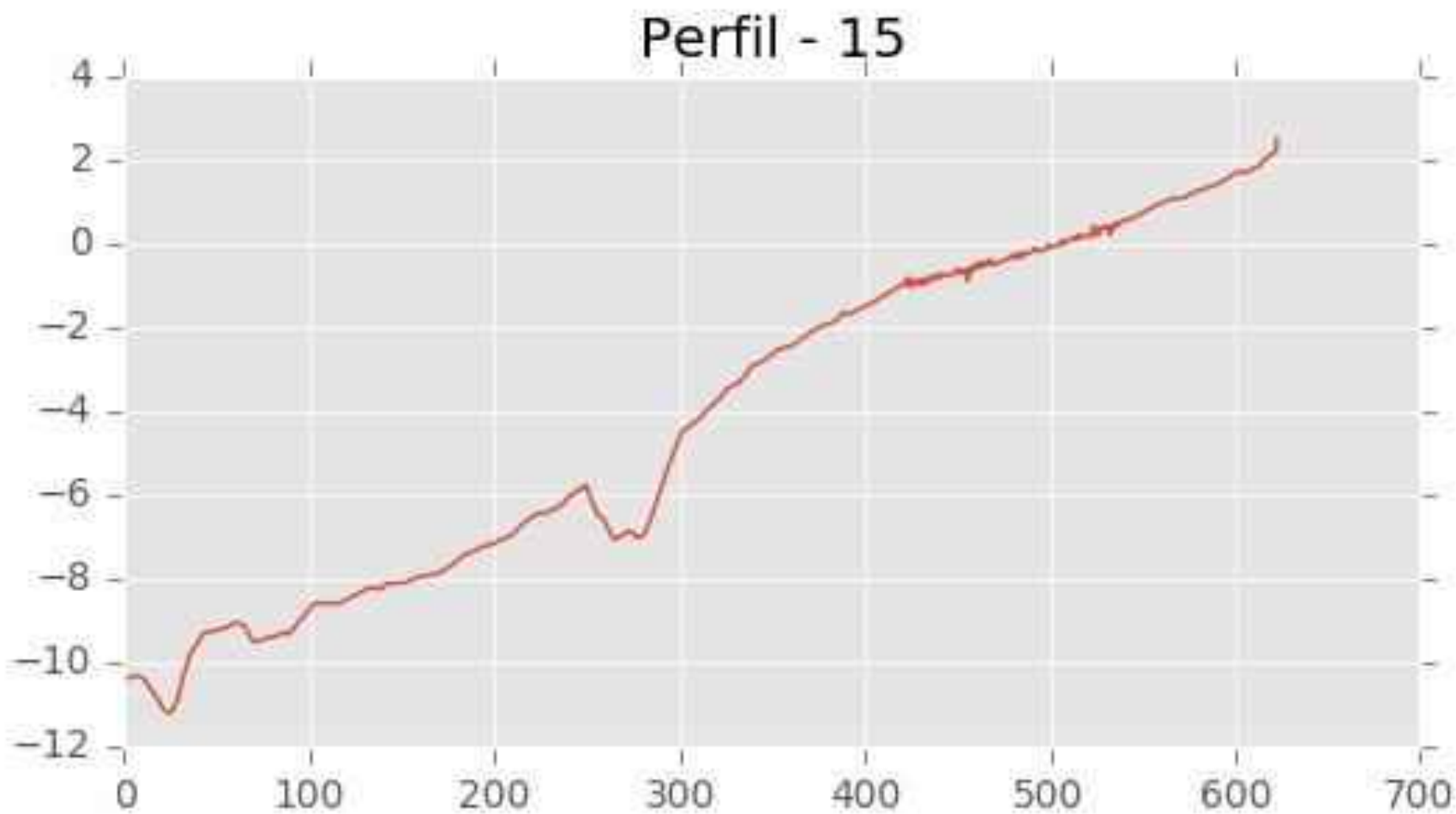


INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)

C/ Cañadilla 6, local 68, C. Comercial Coronado, Las Rozas de Madrid 28231, Madrid

Pza. de la Montañeta 4, entresuelo, 03001 Alicante

Tfno.: 918961731; Fax: 918903410; e-mail: idyma@idyma.es



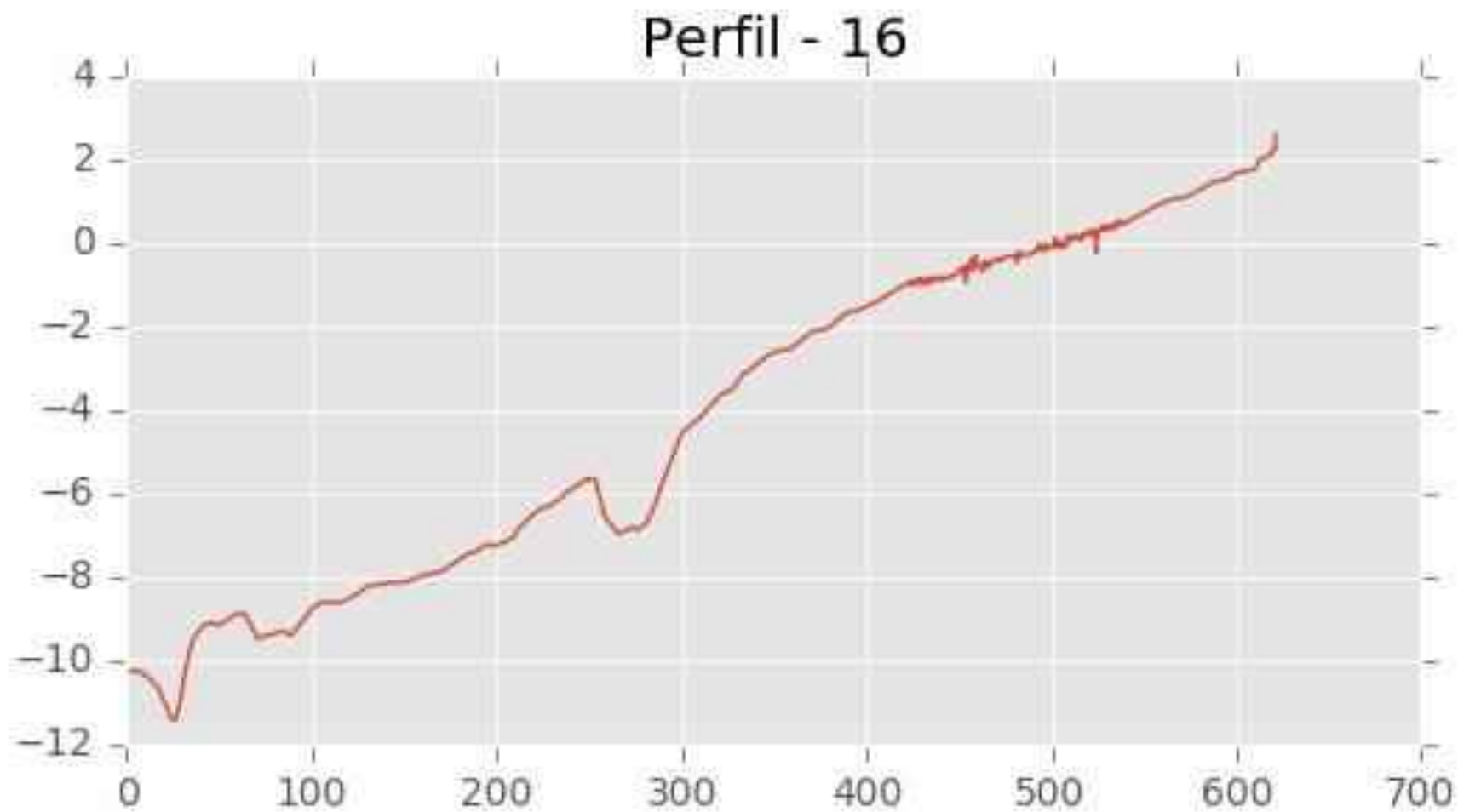


INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)

C/ Cañadilla 6, local 68, C. Comercial Coronado, Las Rozas de Madrid 28231, Madrid

Pza. de la Montañeta 4, entresuelo, 03001 Alicante

Tfno.: 918961731; Fax: 918903410; e-mail: idyma@idyma.es





INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)

C/ Cañadilla 6, local 68, C. Comercial Coronado, Las Rozas de Madrid 28231, Madrid

Pza. de la Montañeta 4, entresuelo, 03001 Alicante

Tfno.: 918961731; Fax: 918903410; e-mail: idyma@idyma.es





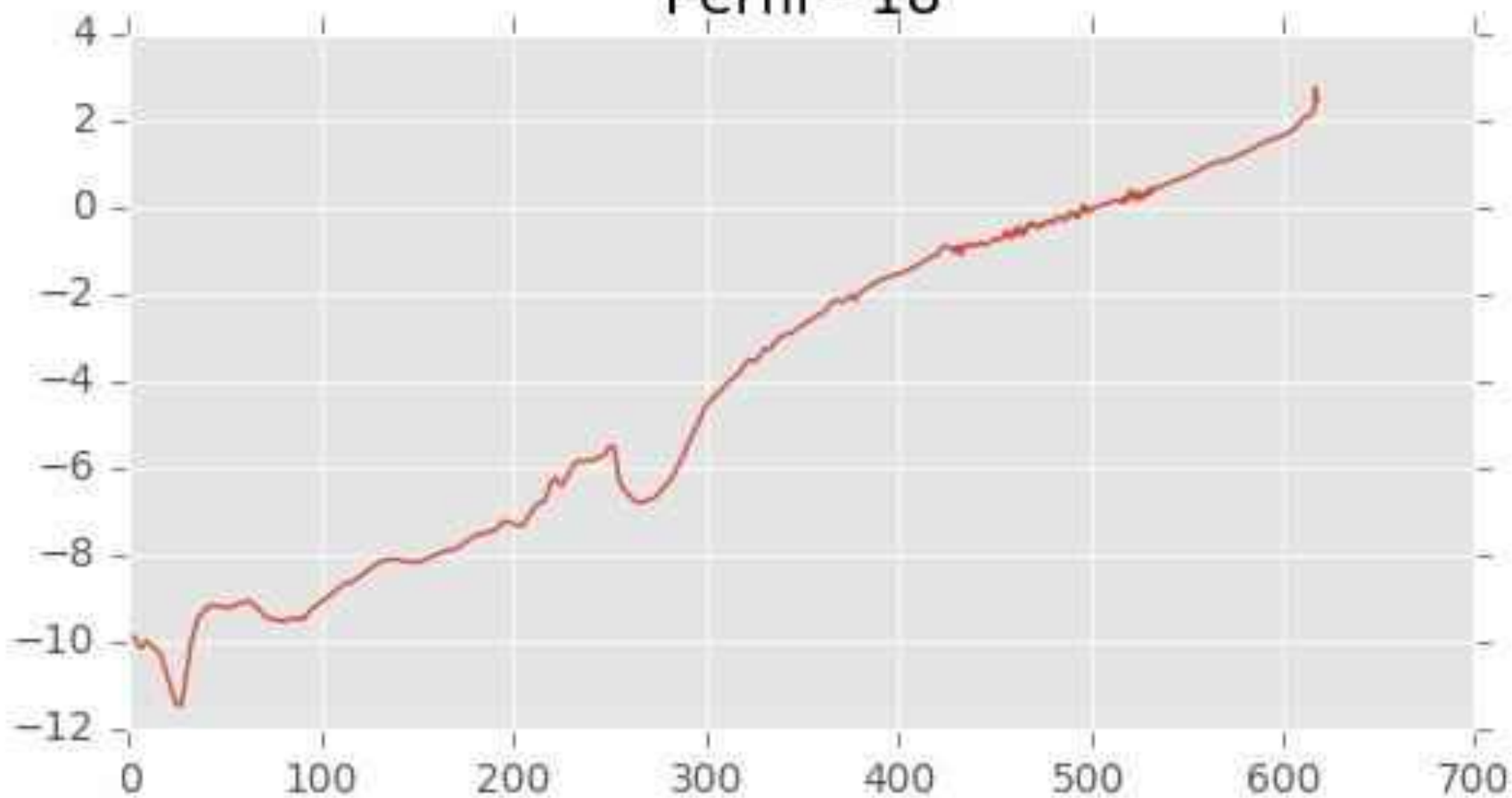
INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)

C/ Cañadilla 6, local 68, C. Comercial Coronado, Las Rozas de Madrid 28231, Madrid

Pza. de la Montañeta 4, entresuelo, 03001 Alicante

Tfno.: 918961731; Fax: 918903410; e-mail: idyma@idyma.es

Perfil - 18





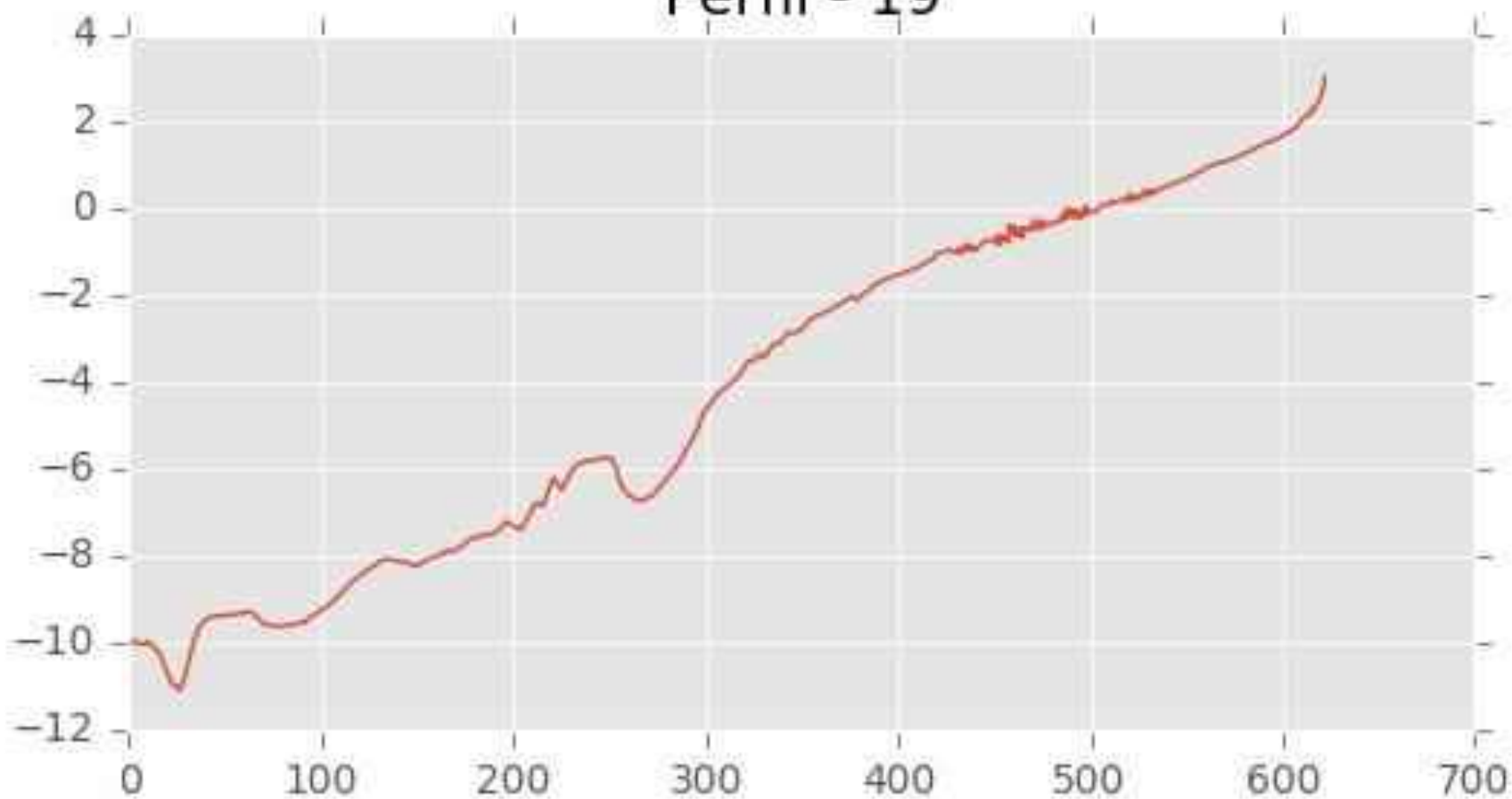
INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)

C/ Cañadilla 6, local 68, C. Comercial Coronado, Las Rozas de Madrid 28231, Madrid

Pza. de la Montañeta 4, entresuelo, 03001 Alicante

Tfno.: 918961731; Fax: 918903410; e-mail: idyma@idyma.es

Perfil - 19



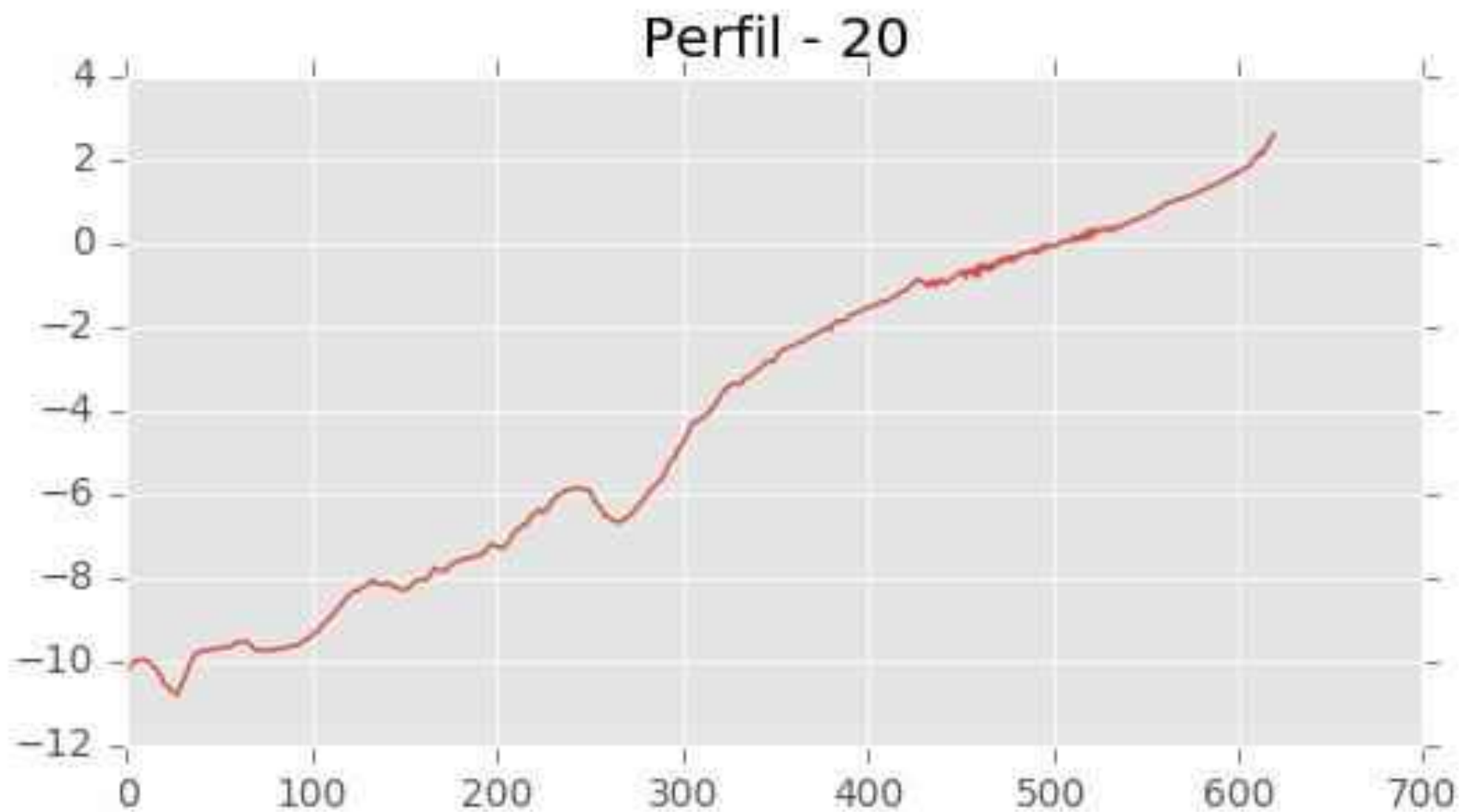


INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)

C/ Cañadilla 6, local 68, C. Comercial Coronado, Las Rozas de Madrid 28231, Madrid

Pza. de la Montañeta 4, entresuelo, 03001 Alicante

Tfno.: 918961731; Fax: 918903410; e-mail: idyma@idyma.es



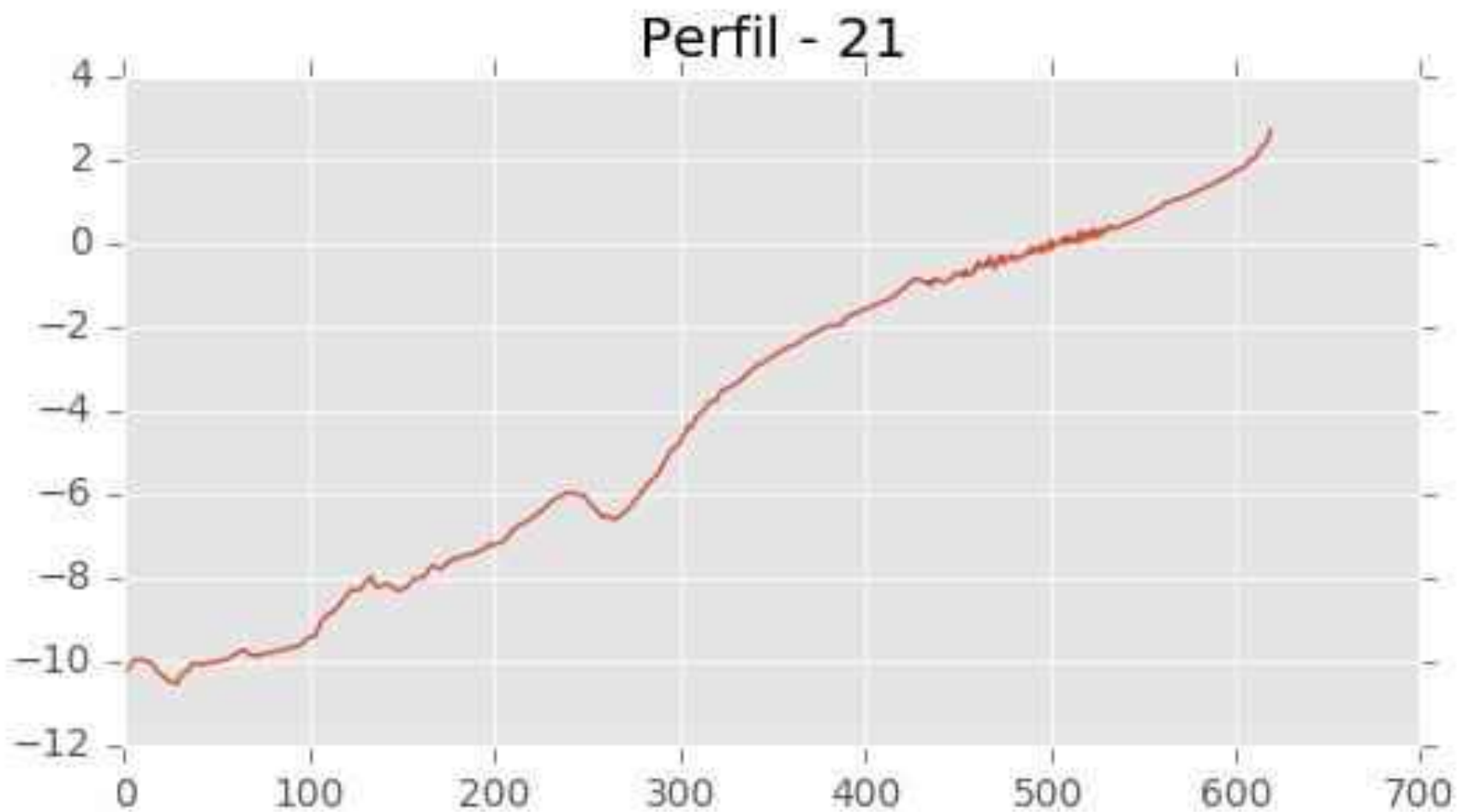


INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)

C/ Cañadilla 6, local 68, C. Comercial Coronado, Las Rozas de Madrid 28231, Madrid

Pza. de la Montañeta 4, entresuelo, 03001 Alicante

Tfno.: 918961731; Fax: 918903410; e-mail: idyma@idyma.es





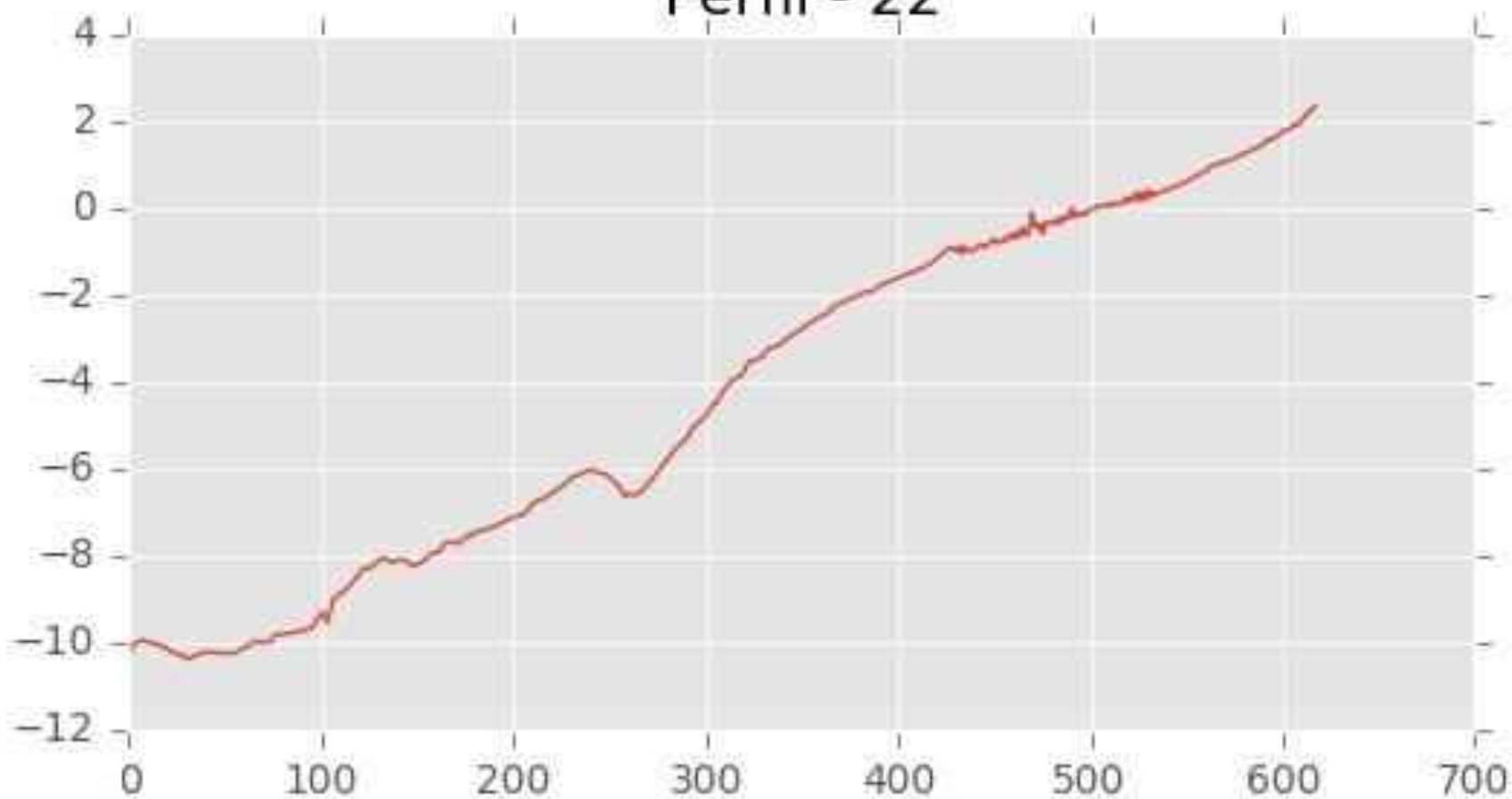
INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)

C/ Cañadilla 6, local 68, C. Comercial Coronado, Las Rozas de Madrid 28231, Madrid

Pza. de la Montañeta 4, entresuelo, 03001 Alicante

Tfno.: 918961731; Fax: 918903410; e-mail: idyma@idyma.es

Perfil - 22





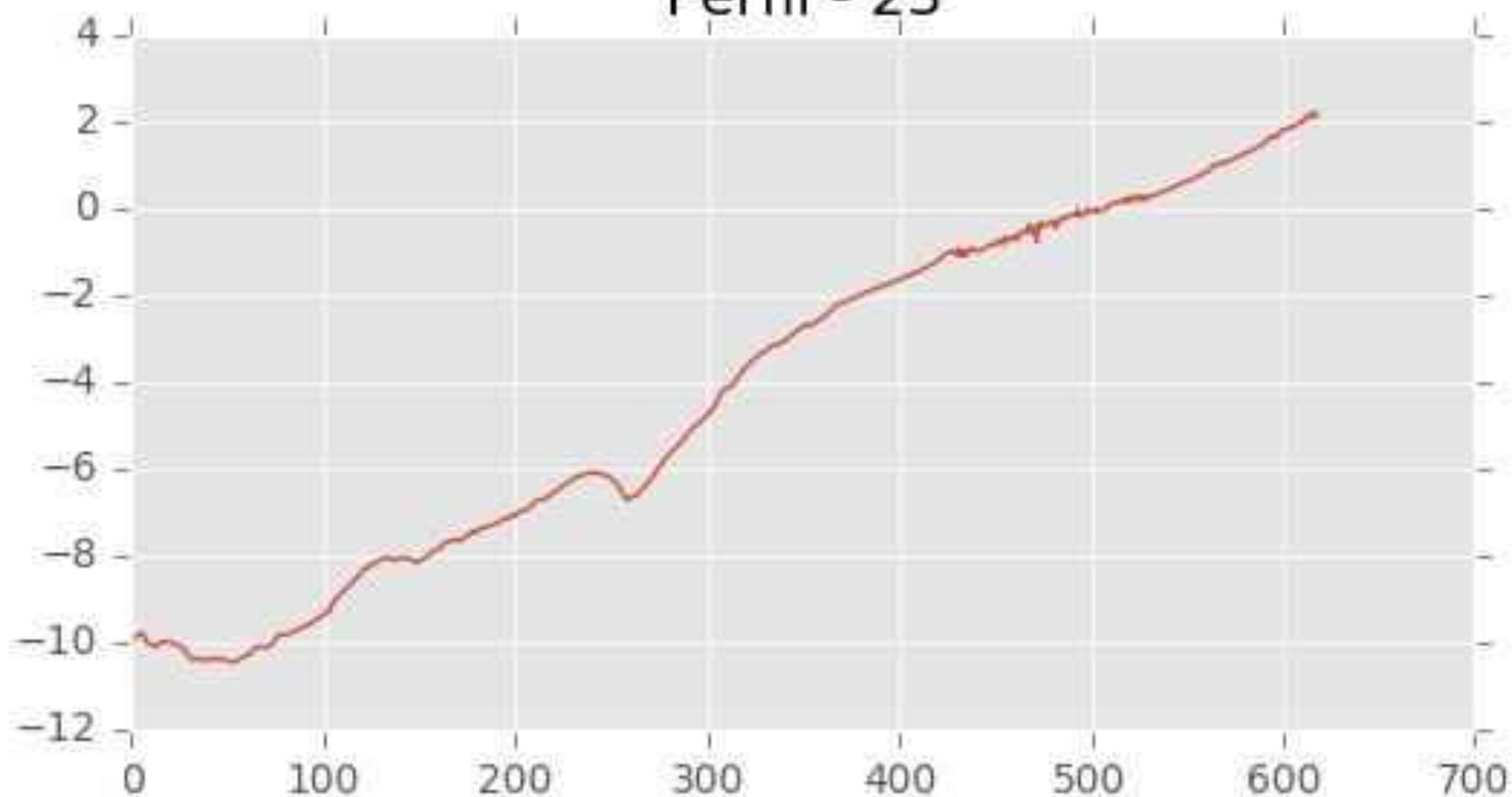
INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)

C/ Cañadilla 6, local 68, C. Comercial Coronado, Las Rozas de Madrid 28231, Madrid

Pza. de la Montañeta 4, entresuelo, 03001 Alicante

Tfno.: 918961731; Fax: 918903410; e-mail: idyma@idyma.es

Perfil - 23



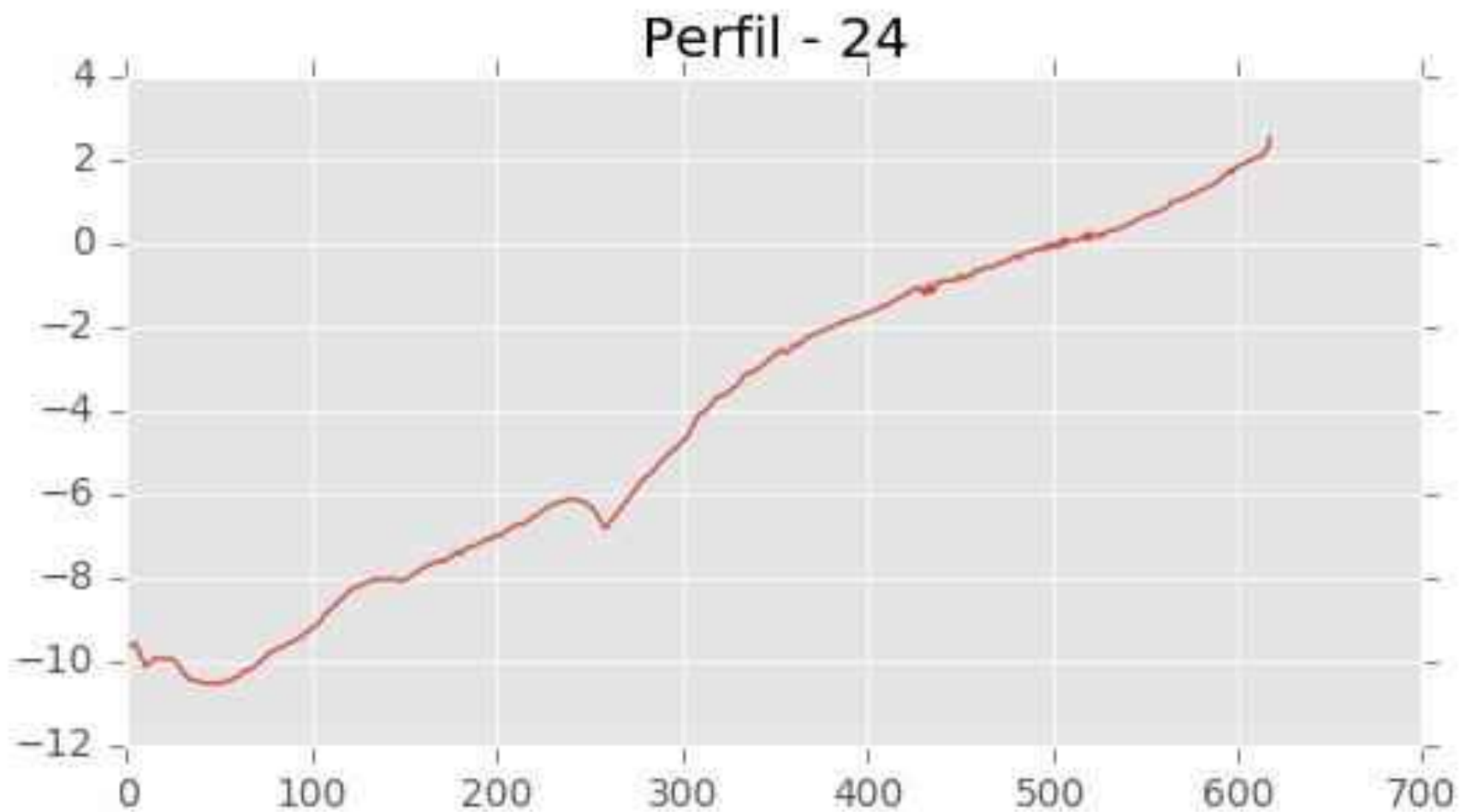


INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)

C/ Cañadilla 6, local 68, C. Comercial Coronado, Las Rozas de Madrid 28231, Madrid

Pza. de la Montañeta 4, entresuelo, 03001 Alicante

Tfno.: 918961731; Fax: 918903410; e-mail: idyma@idyma.es





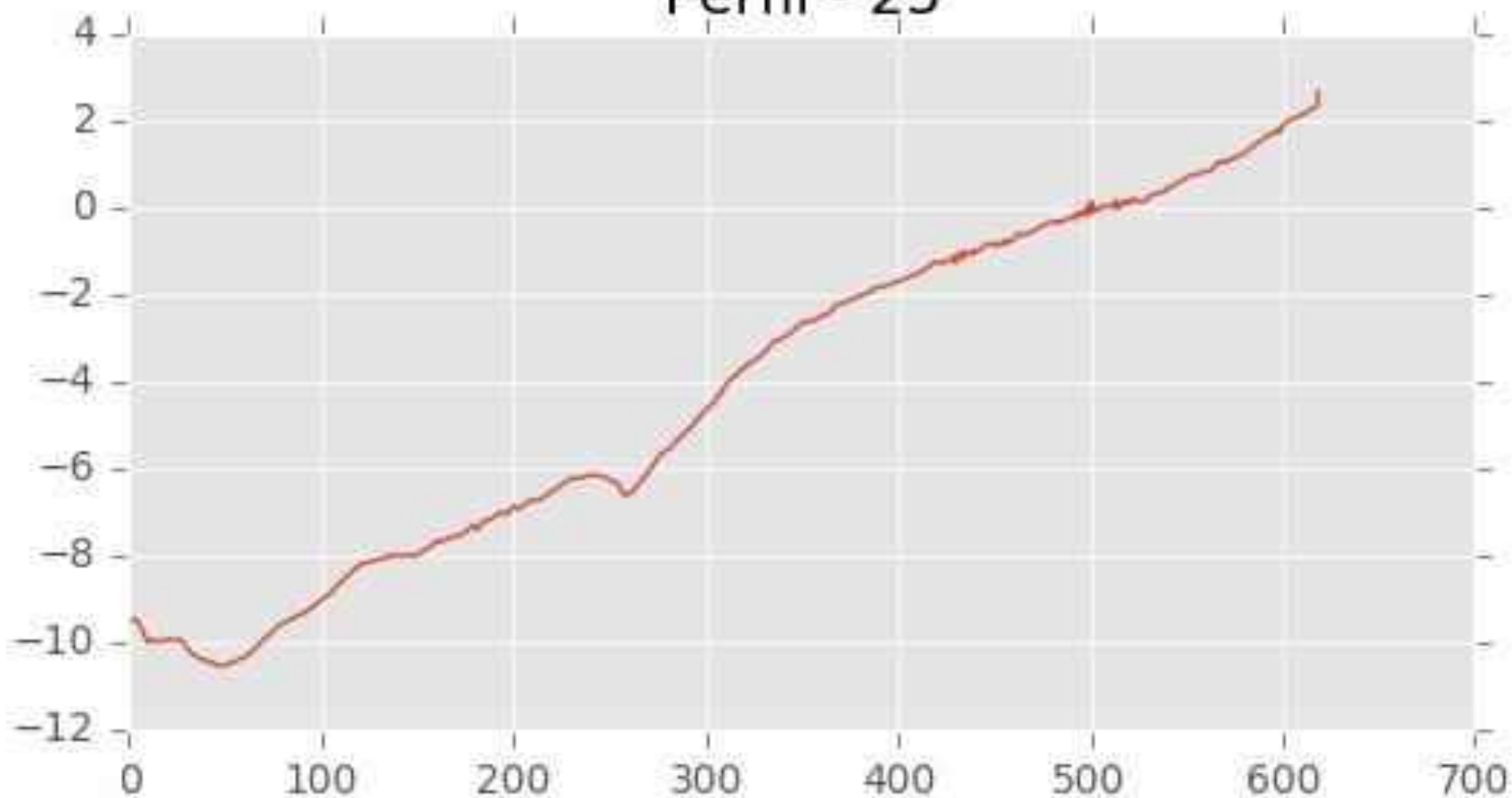
INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)

C/ Cañadilla 6, local 68, C. Comercial Coronado, Las Rozas de Madrid 28231, Madrid

Pza. de la Montañeta 4, entresuelo, 03001 Alicante

Tfno.: 918961731; Fax: 918903410; e-mail: idyma@idyma.es

Perfil - 25





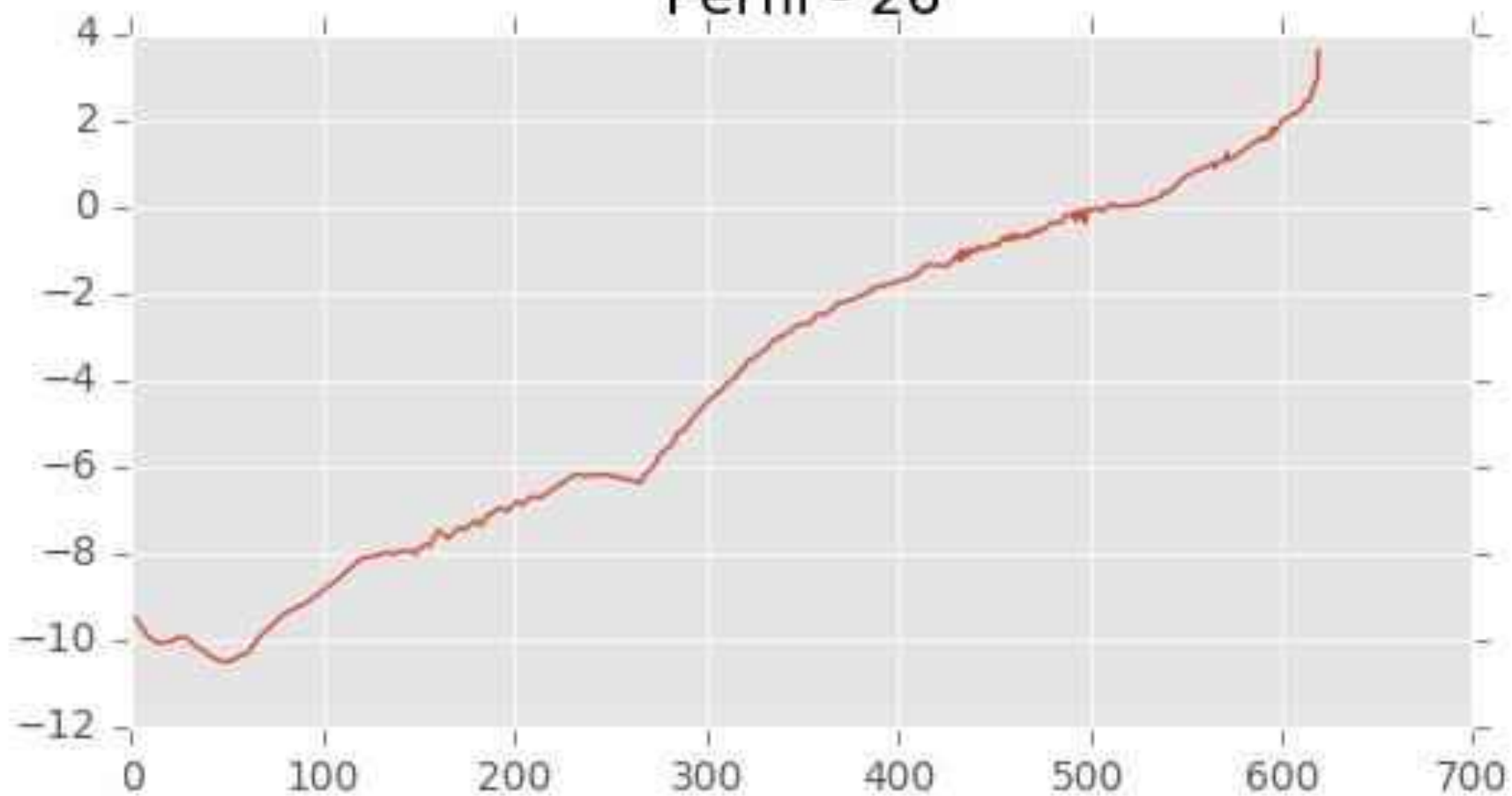
INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)

C/ Cañadilla 6, local 68, C. Comercial Coronado, Las Rozas de Madrid 28231, Madrid

Pza. de la Montañeta 4, entresuelo, 03001 Alicante

Tfno.: 918961731; Fax: 918903410; e-mail: idyma@idyma.es

Perfil - 26





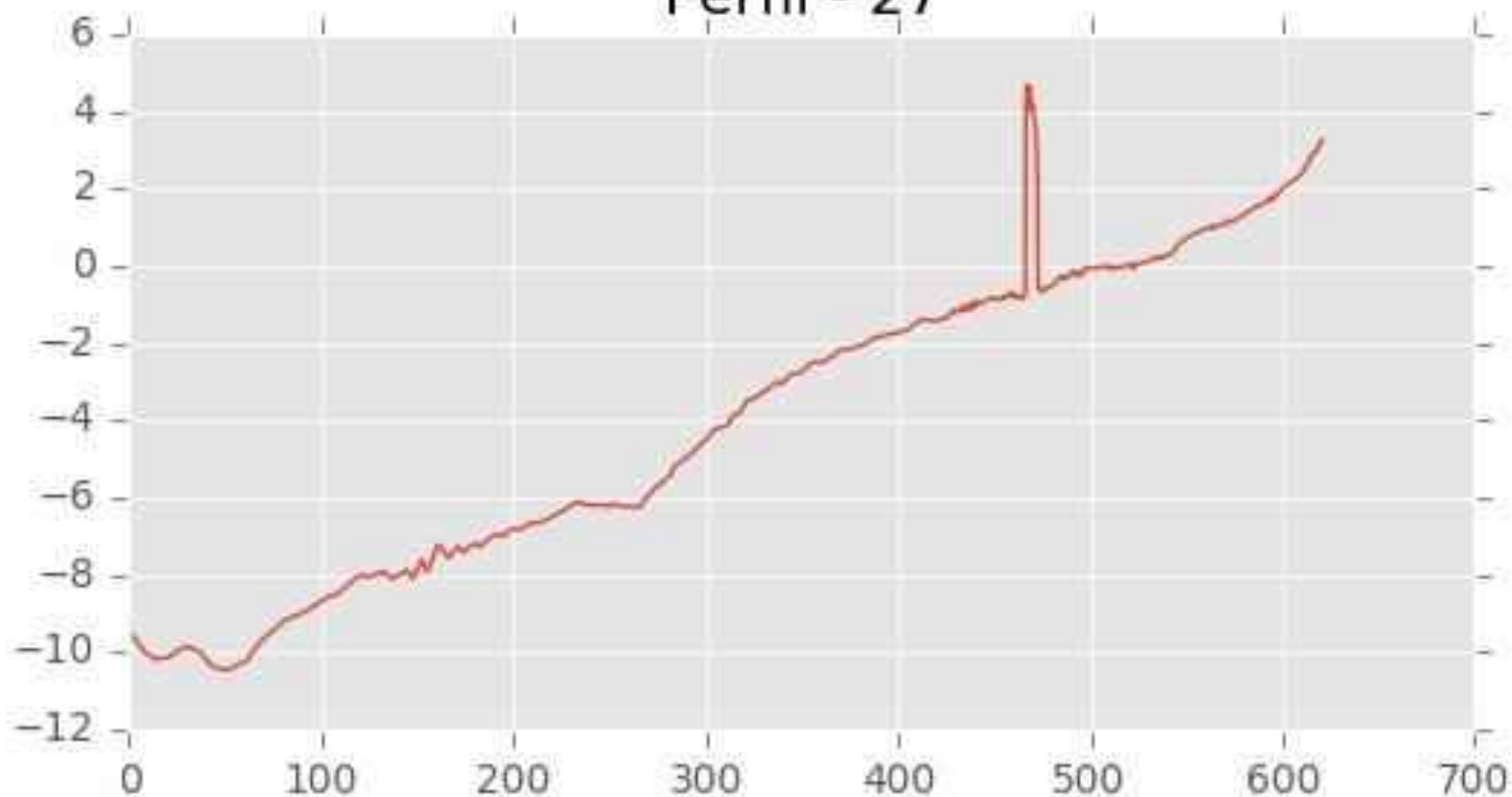
INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)

C/ Cañadilla 6, local 68, C. Comercial Coronado, Las Rozas de Madrid 28231, Madrid

Pza. de la Montañeta 4, entresuelo, 03001 Alicante

Tfno.: 918961731; Fax: 918903410; e-mail: idyma@idyma.es

Perfil - 27



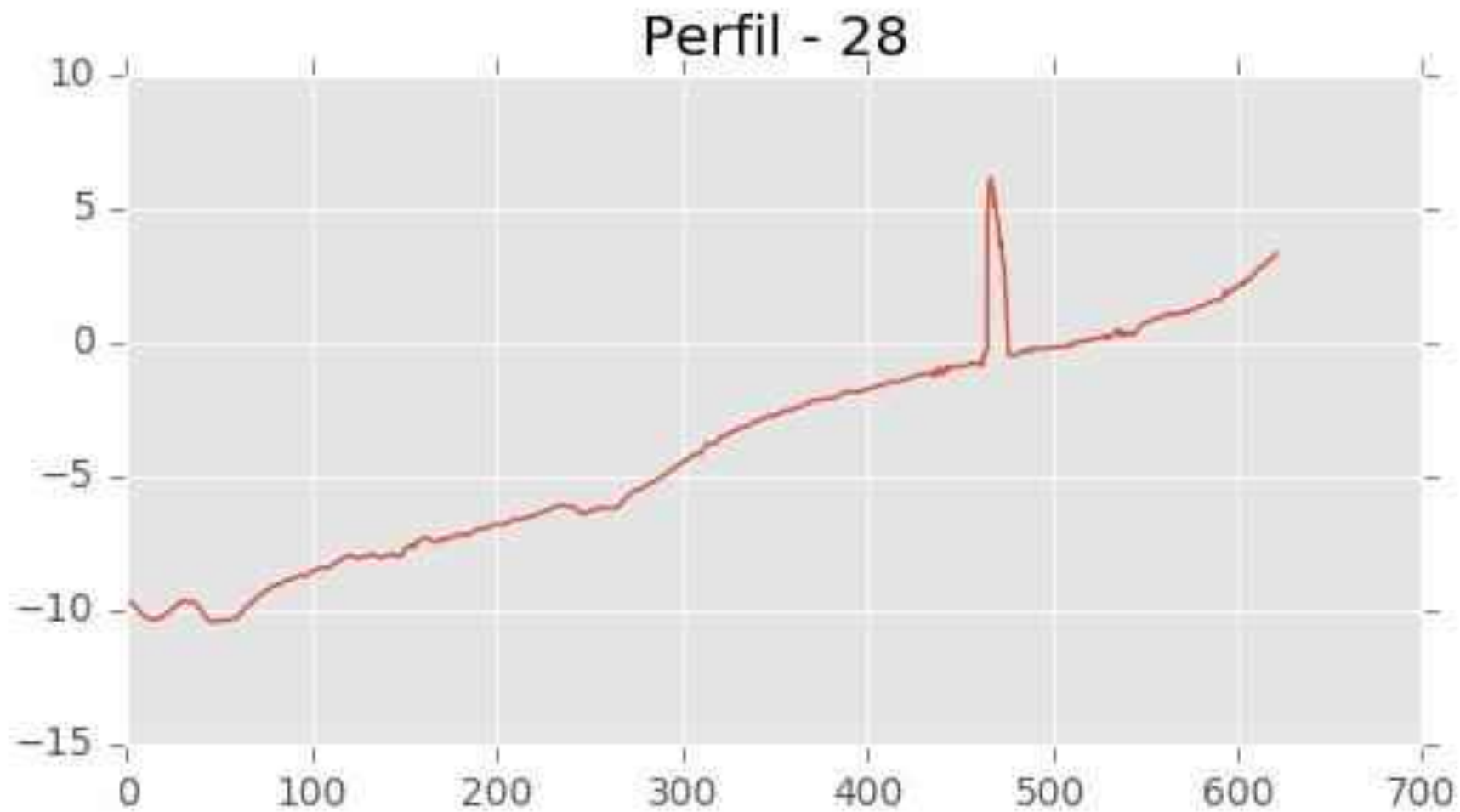


INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)

C/ Cañadilla 6, local 68, C. Comercial Coronado, Las Rozas de Madrid 28231, Madrid

Pza. de la Montañeta 4, entresuelo, 03001 Alicante

Tfno.: 918961731; Fax: 918903410; e-mail: idyma@idyma.es





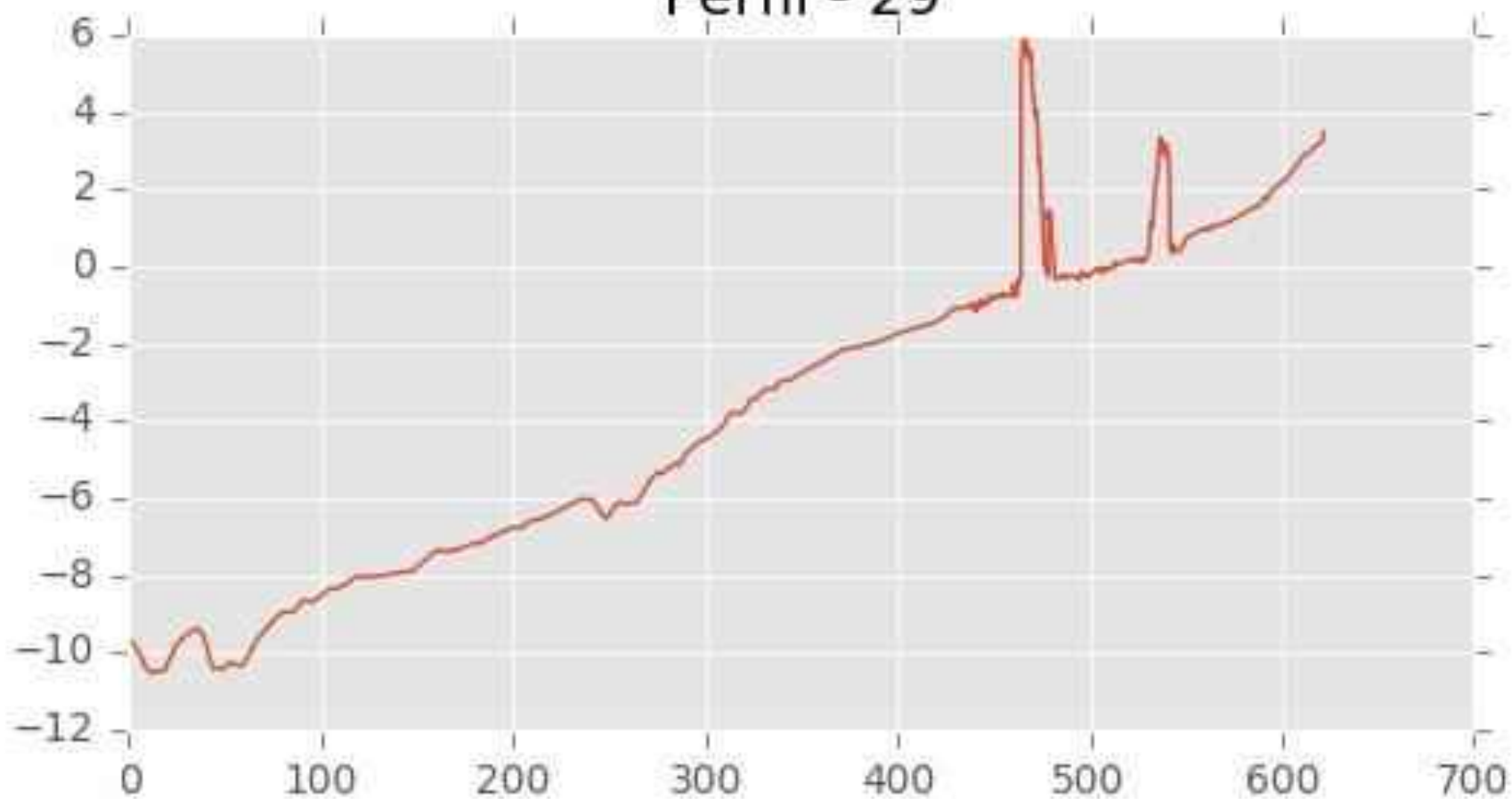
INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)

C/ Cañadilla 6, local 68, C. Comercial Coronado, Las Rozas de Madrid 28231, Madrid

Pza. de la Montañeta 4, entresuelo, 03001 Alicante

Tfno.: 918961731; Fax: 918903410; e-mail: idyma@idyma.es

Perfil - 29





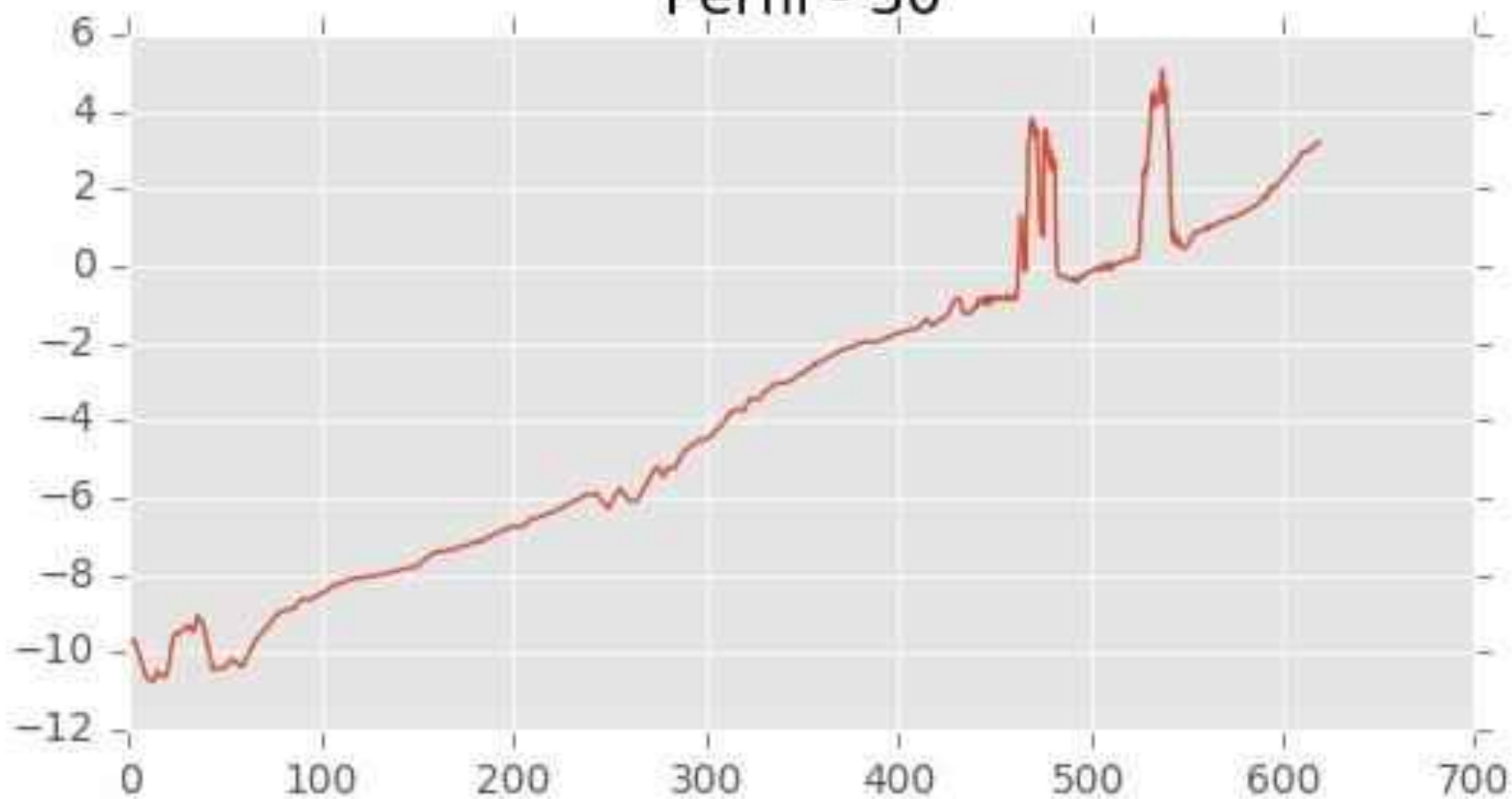
INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)

C/ Cañadilla 6, local 68, C. Comercial Coronado, Las Rozas de Madrid 28231, Madrid

Pza. de la Montañeta 4, entresuelo, 03001 Alicante

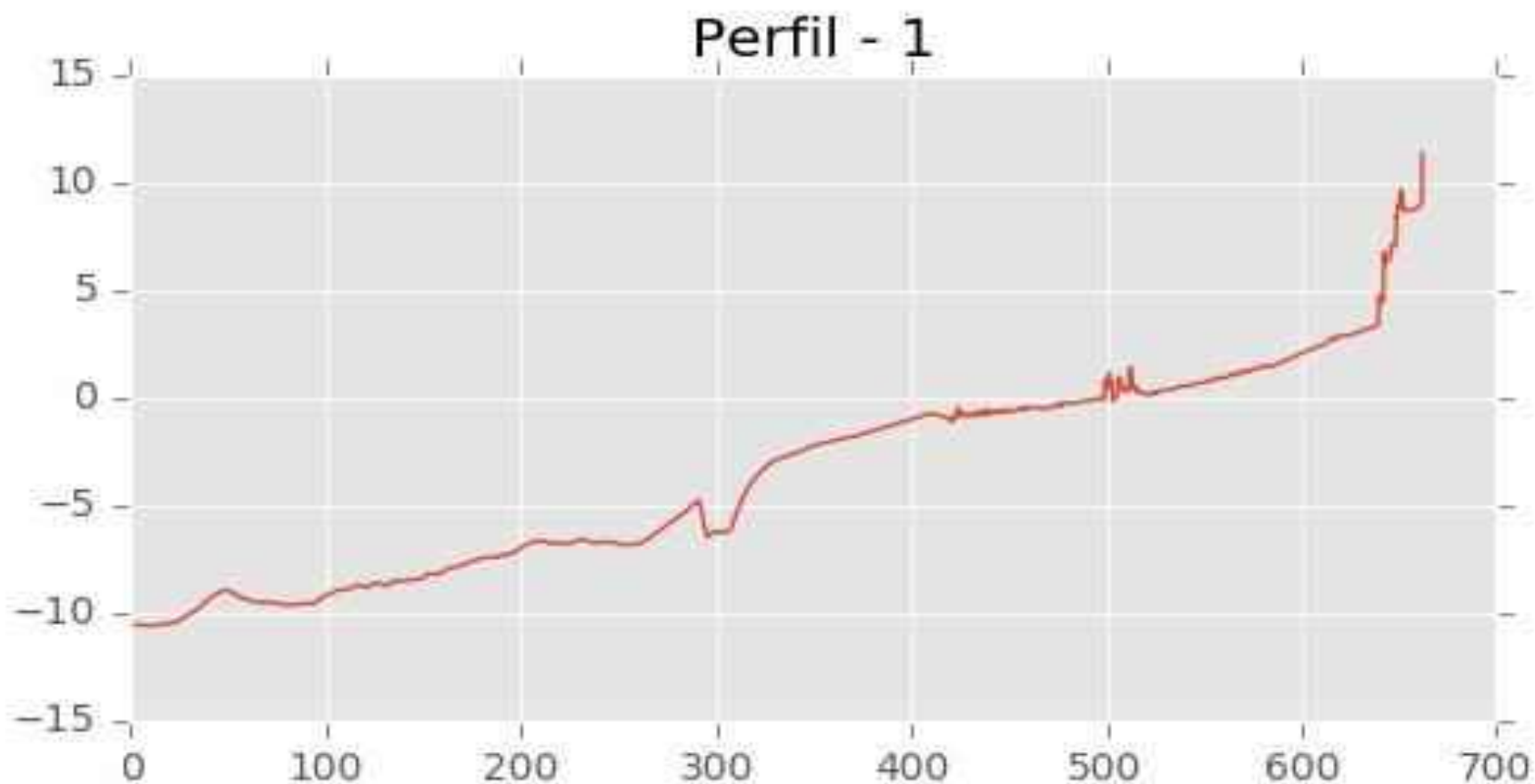
Tfno.: 918961731; Fax: 918903410; e-mail: idyma@idyma.es

Perfil - 30





COLECCIÓN DE CROQUIS DE PERFILES COMPLETOS, SEGÚN LA GEOMETRÍA REFLEJADA EN LOS PLANOS, INCLUYENDO LAS MORFOLOGÍAS ANTRÓPICAS QUE COMPRENDE LA EXTENSIÓN COMPLETA DE CADA PERFIL



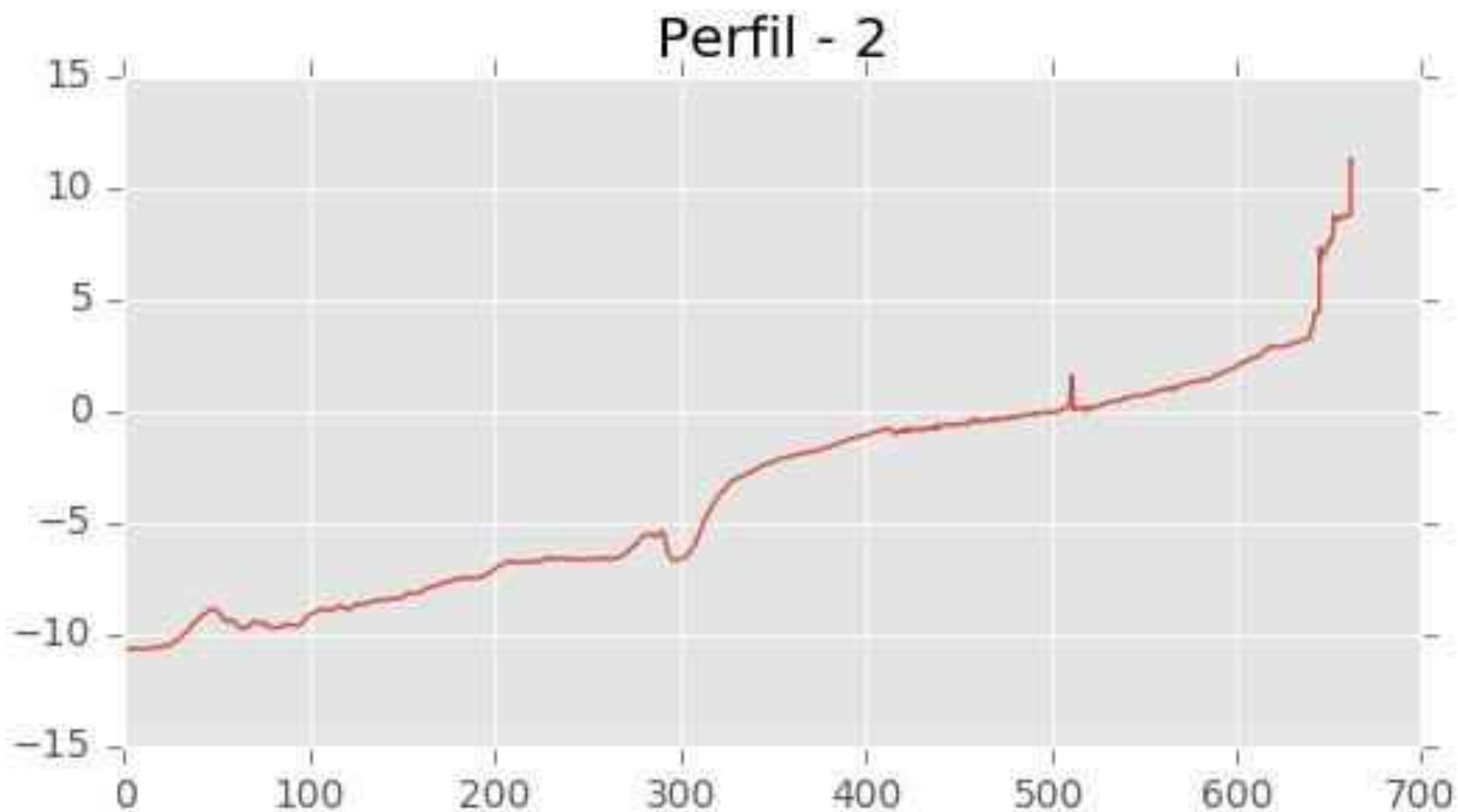


INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)

C/ Cañadilla 6, local 68, C. Comercial Coronado, Las Rozas de Madrid 28231, Madrid

Pza. de la Montañeta 4, entresuelo, 03001 Alicante

Tfno.: 918961731; Fax: 918903410; e-mail: idyma@idyma.es



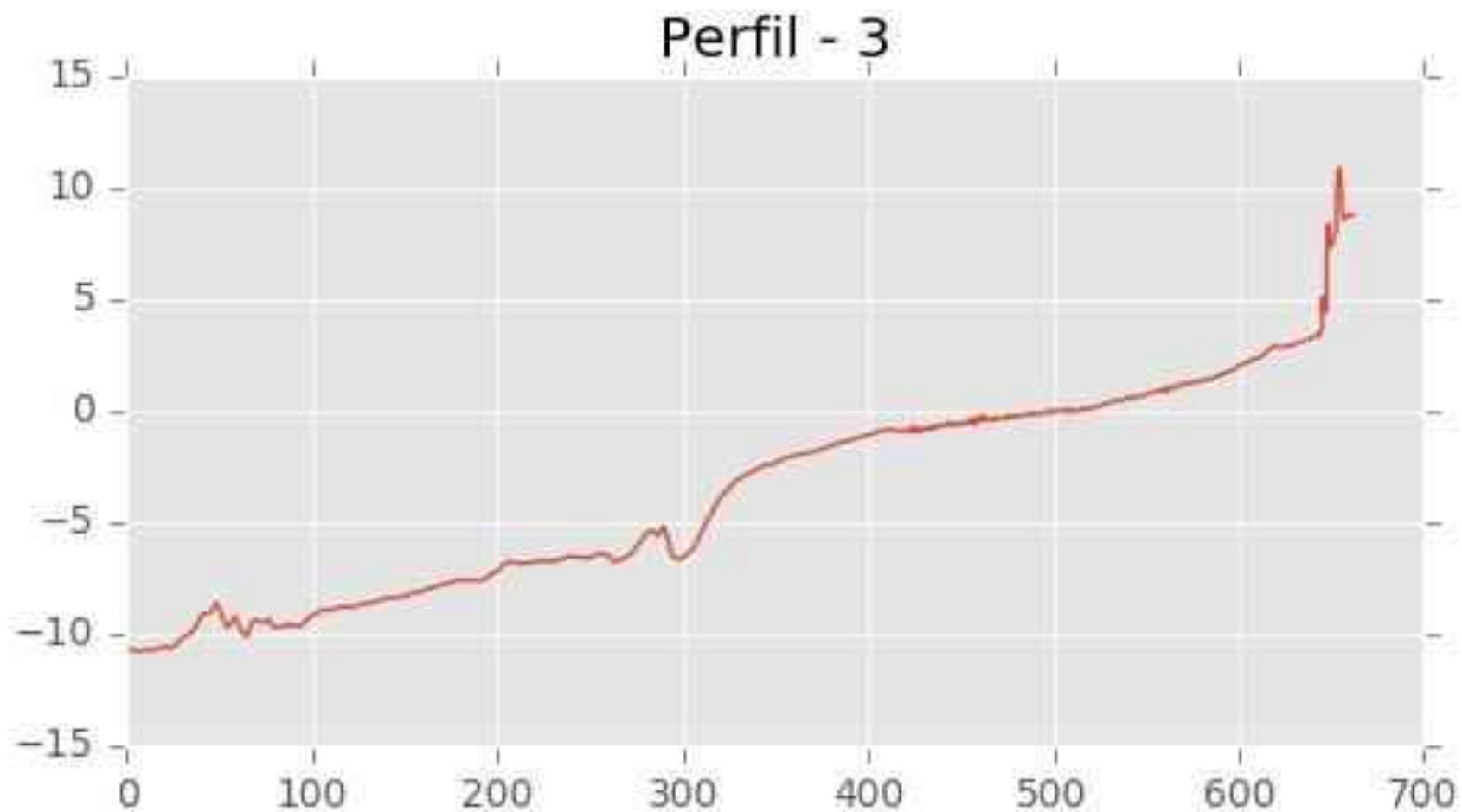


INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)

C/ Cañadilla 6, local 68, C. Comercial Coronado, Las Rozas de Madrid 28231, Madrid

Pza. de la Montañeta 4, entresuelo, 03001 Alicante

Tfno.: 918961731; Fax: 918903410; e-mail: idyma@idyma.es



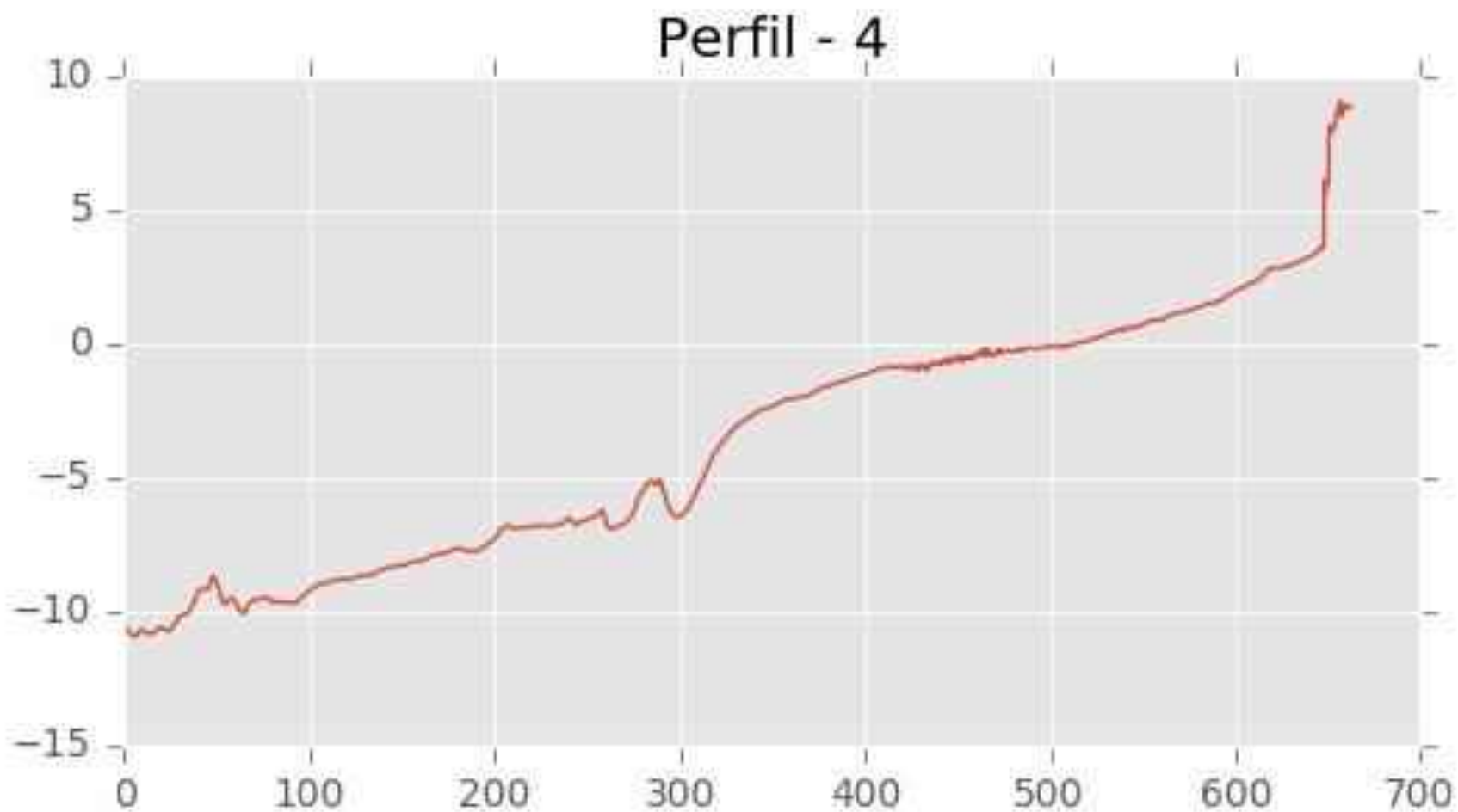


INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)

C/ Cañadilla 6, local 68, C. Comercial Coronado, Las Rozas de Madrid 28231, Madrid

Pza. de la Montañeta 4, entresuelo, 03001 Alicante

Tfno.: 918961731; Fax: 918903410; e-mail: idyma@idyma.es





INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)

C/ Cañadilla 6, local 68, C. Comercial Coronado, Las Rozas de Madrid 28231, Madrid

Pza. de la Montañeta 4, entresuelo, 03001 Alicante

Tfno.: 918961731; Fax: 918903410; e-mail: idyma@idyma.es



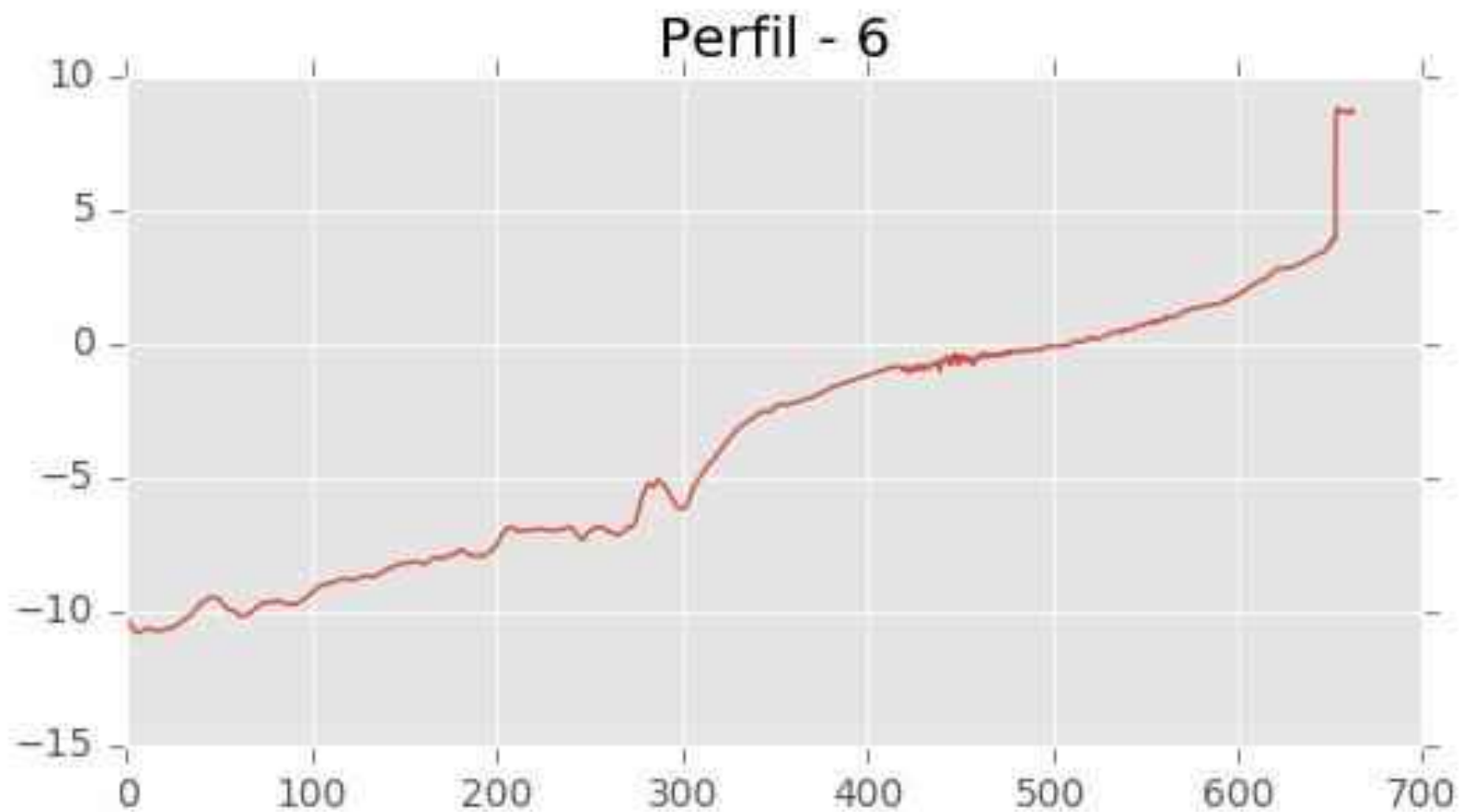


INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)

C/ Cañadilla 6, local 68, C. Comercial Coronado, Las Rozas de Madrid 28231, Madrid

Pza. de la Montañeta 4, entresuelo, 03001 Alicante

Tfno.: 918961731; Fax: 918903410; e-mail: idyma@idyma.es



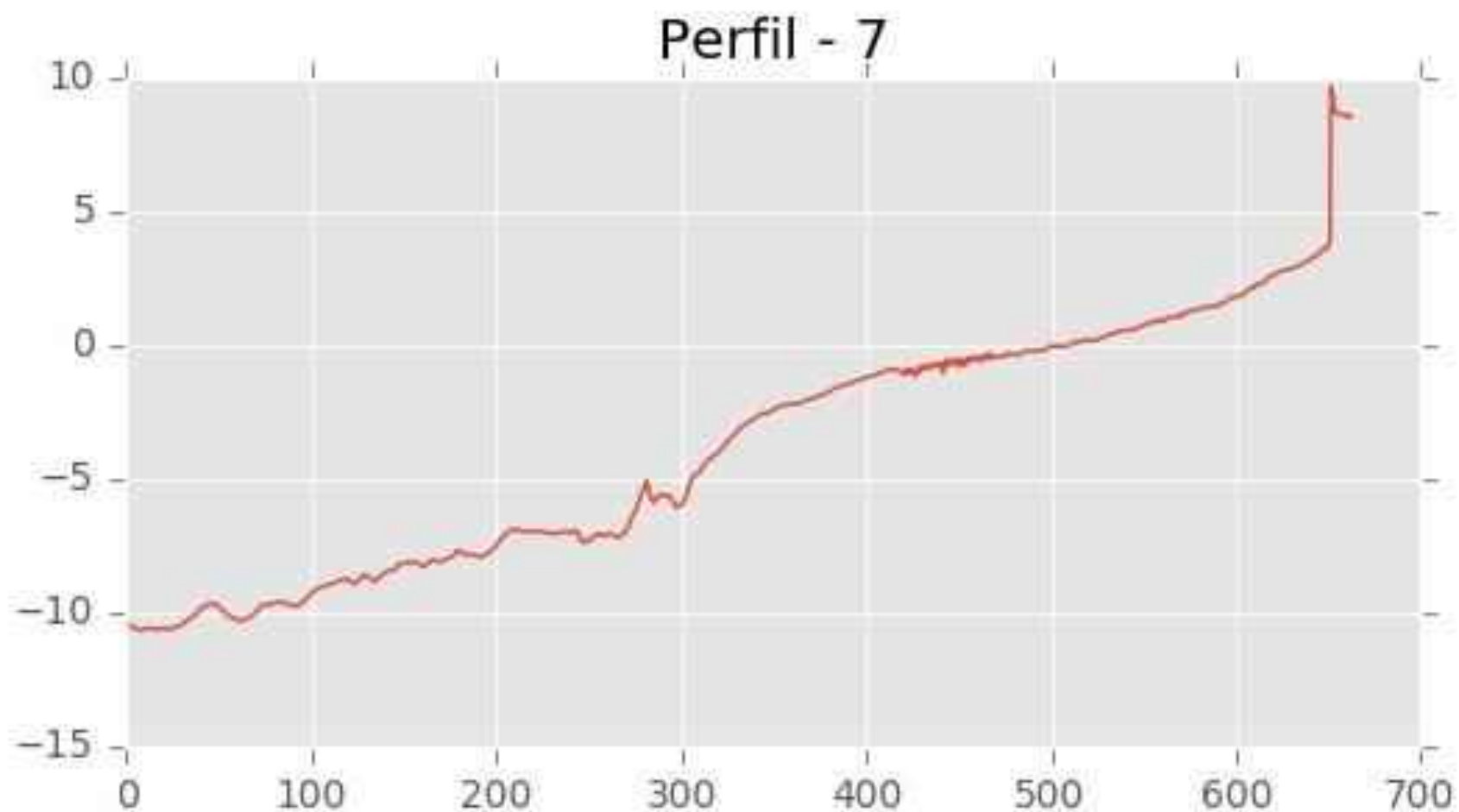


INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)

C/ Cañadilla 6, local 68, C. Comercial Coronado, Las Rozas de Madrid 28231, Madrid

Pza. de la Montañeta 4, entresuelo, 03001 Alicante

Tfno.: 918961731; Fax: 918903410; e-mail: idyma@idyma.es



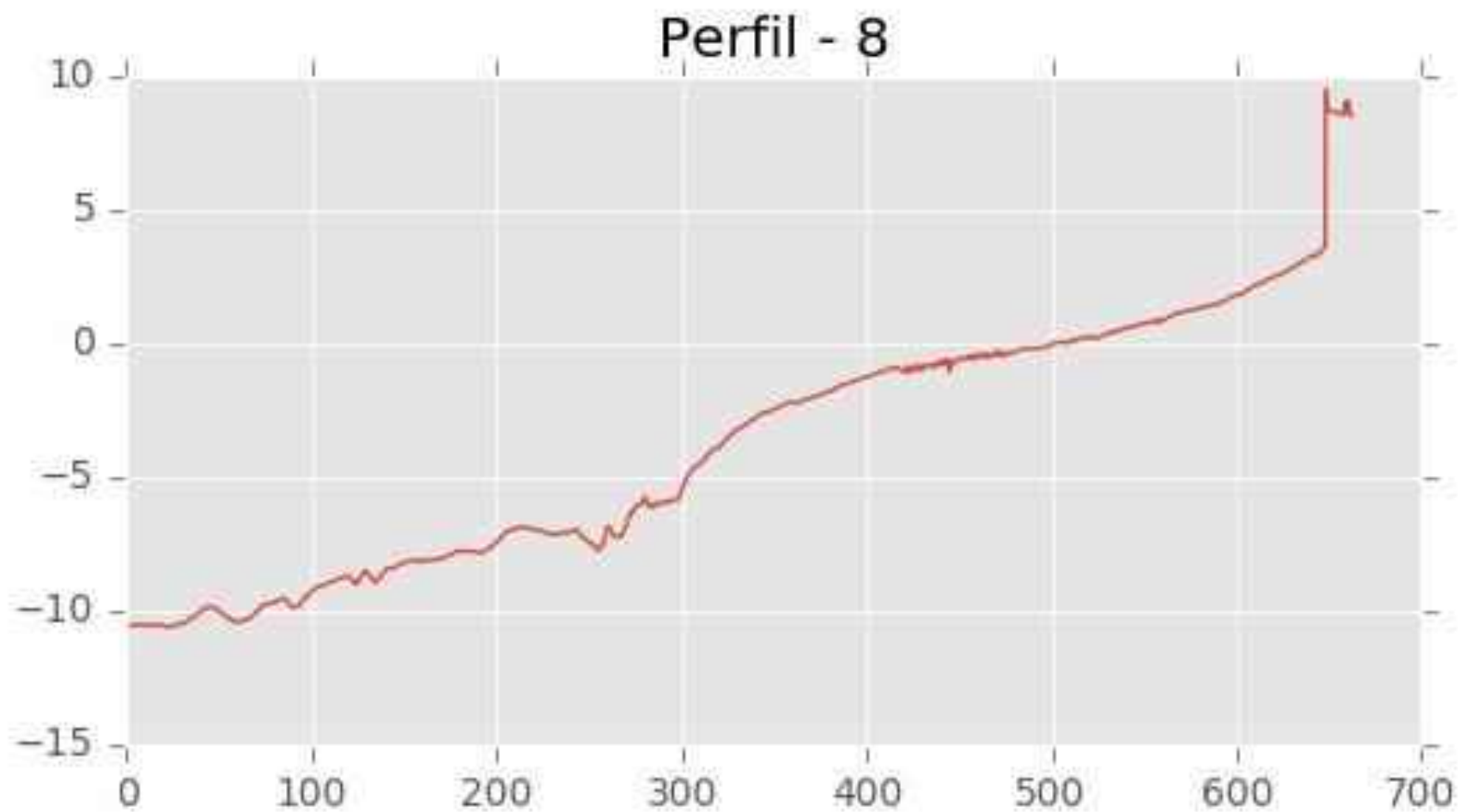


INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)

C/ Cañadilla 6, local 68, C. Comercial Coronado, Las Rozas de Madrid 28231, Madrid

Pza. de la Montañeta 4, entresuelo, 03001 Alicante

Tfno.: 918961731; Fax: 918903410; e-mail: idyma@idyma.es



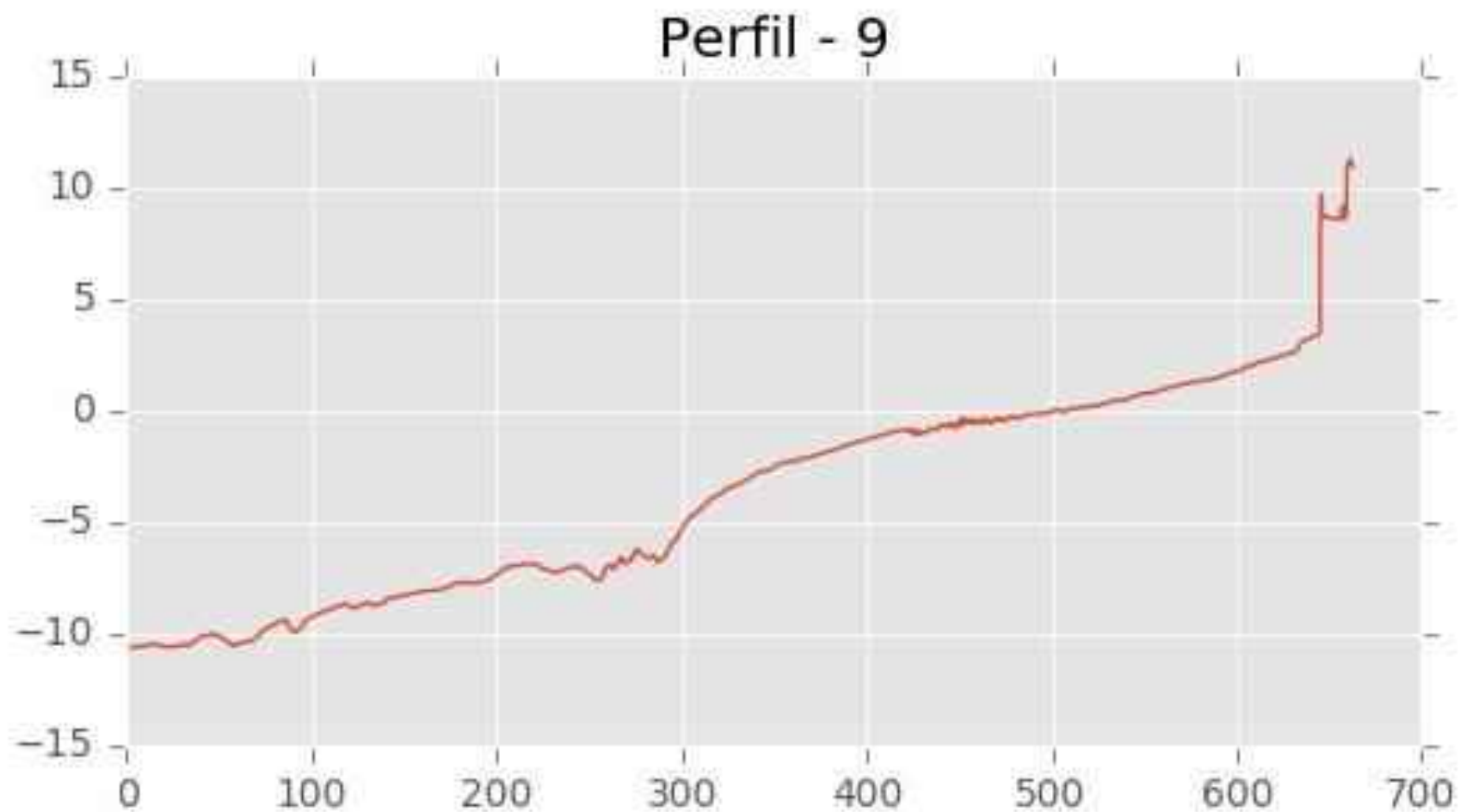


INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)

C/ Cañadilla 6, local 68, C. Comercial Coronado, Las Rozas de Madrid 28231, Madrid

Pza. de la Montañeta 4, entresuelo, 03001 Alicante

Tfno.: 918961731; Fax: 918903410; e-mail: idyma@idyma.es



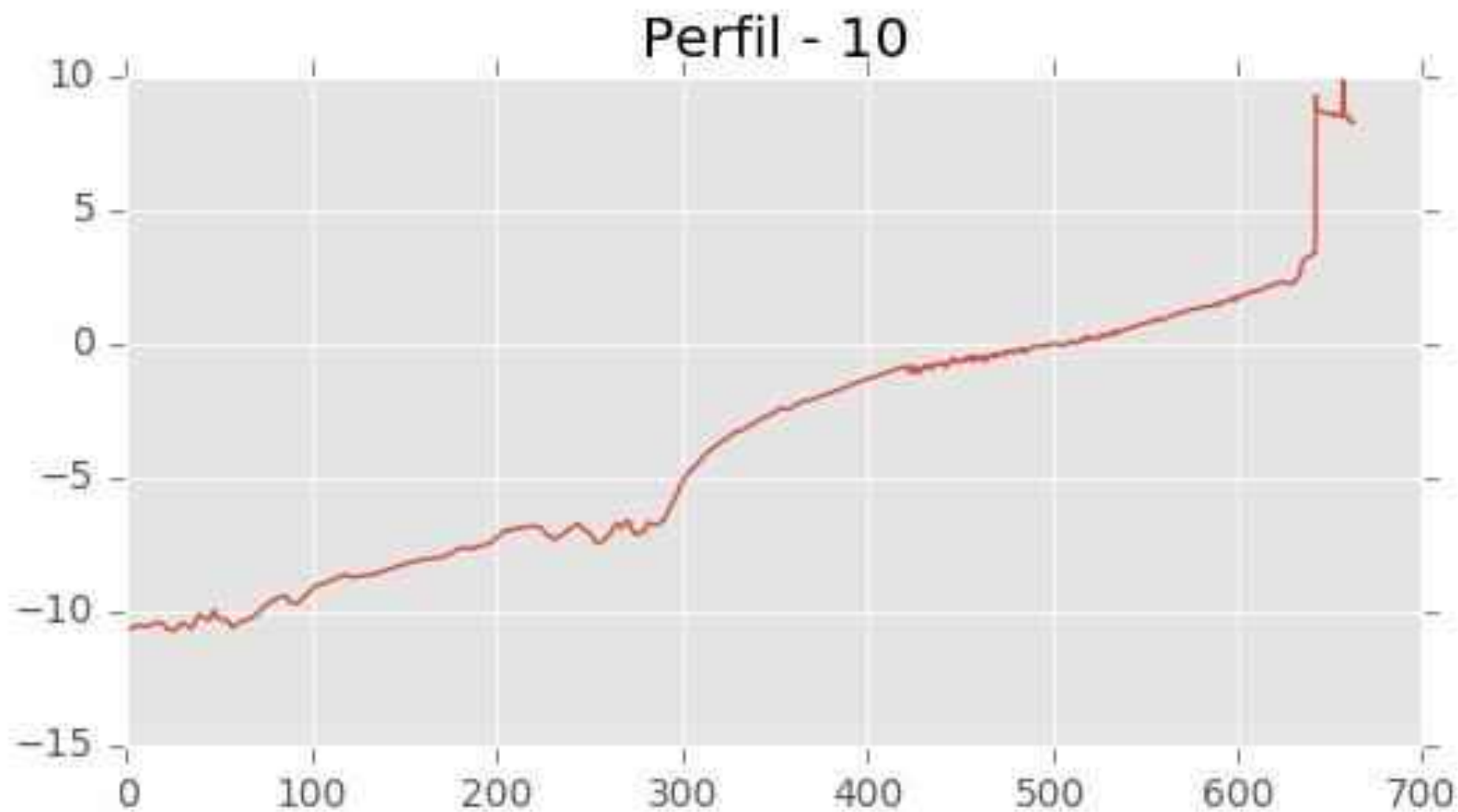


INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)

C/ Cañadilla 6, local 68, C. Comercial Coronado, Las Rozas de Madrid 28231, Madrid

Pza. de la Montañeta 4, entresuelo, 03001 Alicante

Tfno.: 918961731; Fax: 918903410; e-mail: idyma@idyma.es



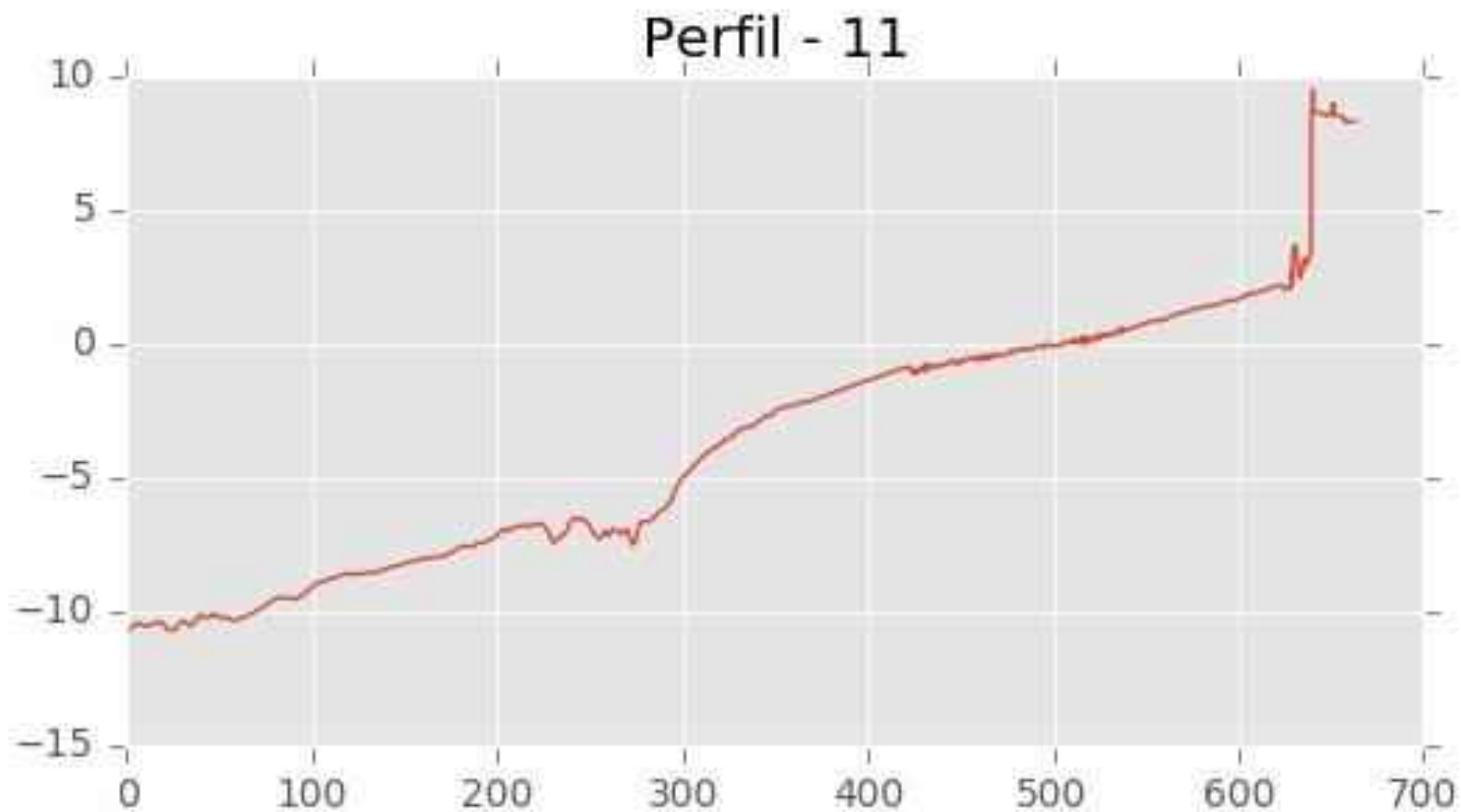


INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)

C/ Cañadilla 6, local 68, C. Comercial Coronado, Las Rozas de Madrid 28231, Madrid

Pza. de la Montañeta 4, entresuelo, 03001 Alicante

Tfno.: 918961731; Fax: 918903410; e-mail: idyma@idyma.es



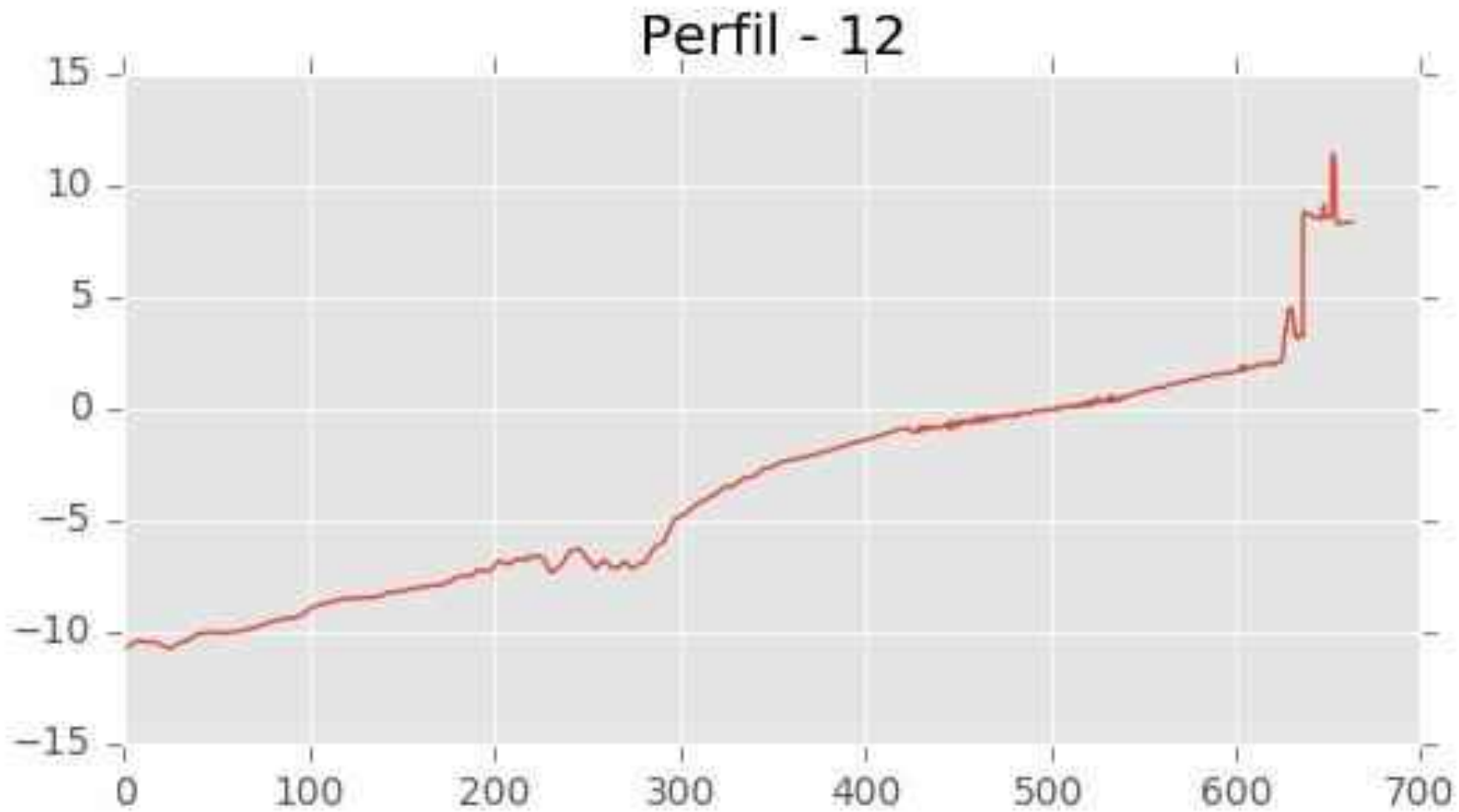


INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)

C/ Cañadilla 6, local 68, C. Comercial Coronado, Las Rozas de Madrid 28231, Madrid

Pza. de la Montañeta 4, entresuelo, 03001 Alicante

Tfno.: 918961731; Fax: 918903410; e-mail: idyma@idyma.es



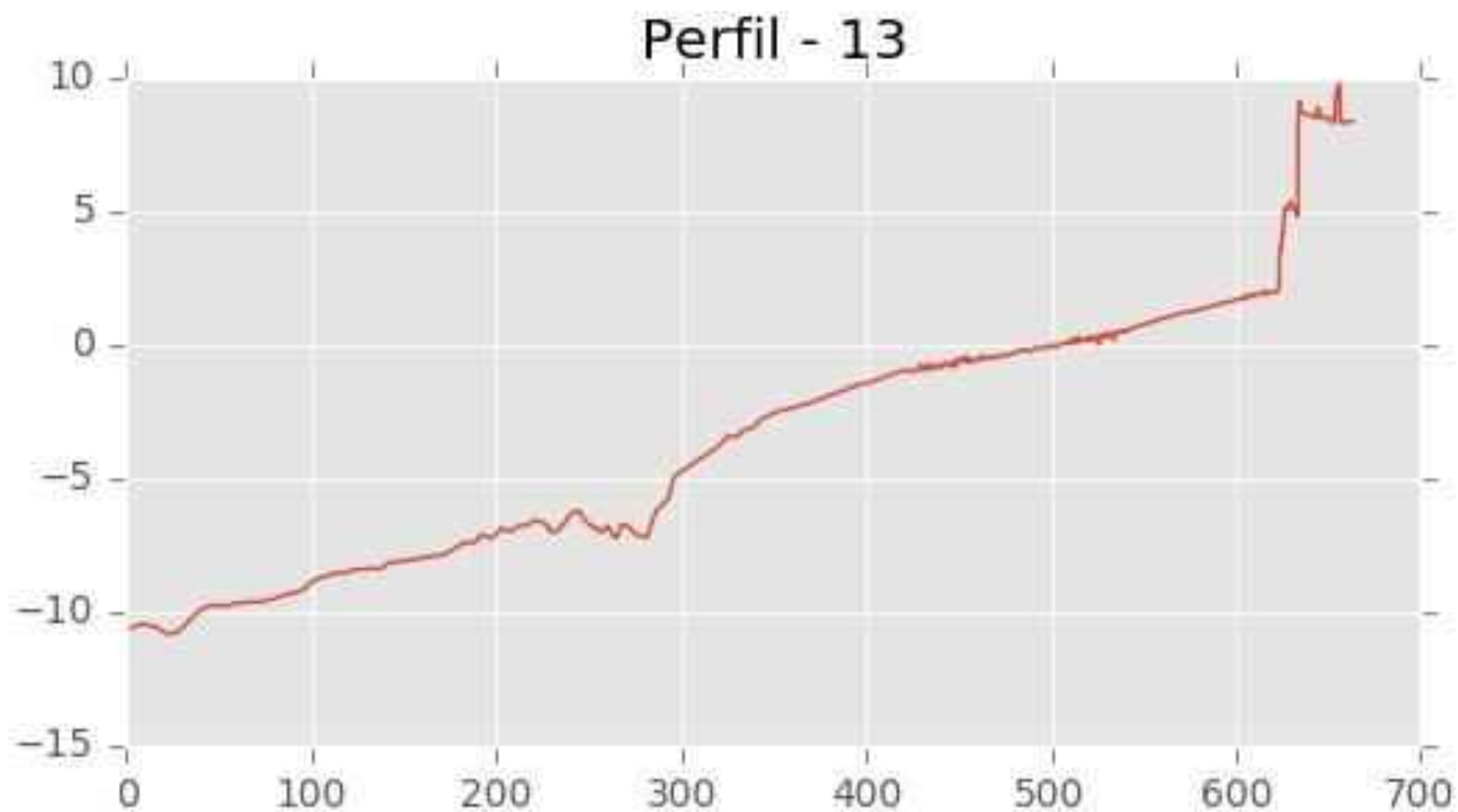


INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)

C/ Cañadilla 6, local 68, C. Comercial Coronado, Las Rozas de Madrid 28231, Madrid

Pza. de la Montañeta 4, entresuelo, 03001 Alicante

Tfno.: 918961731; Fax: 918903410; e-mail: idyma@idyma.es



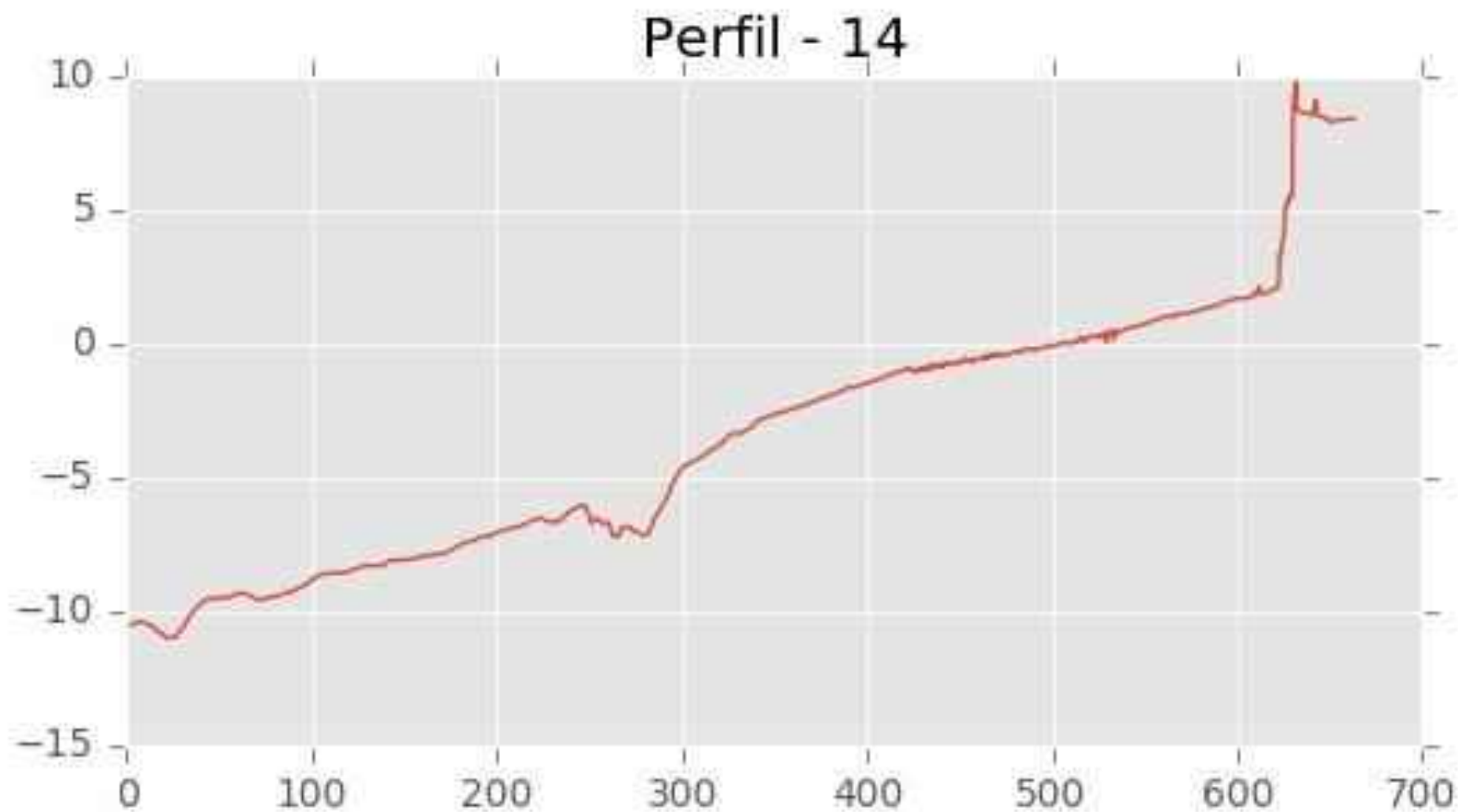


INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)

C/ Cañadilla 6, local 68, C. Comercial Coronado, Las Rozas de Madrid 28231, Madrid

Pza. de la Montañeta 4, entresuelo, 03001 Alicante

Tfno.: 918961731; Fax: 918903410; e-mail: idyma@idyma.es



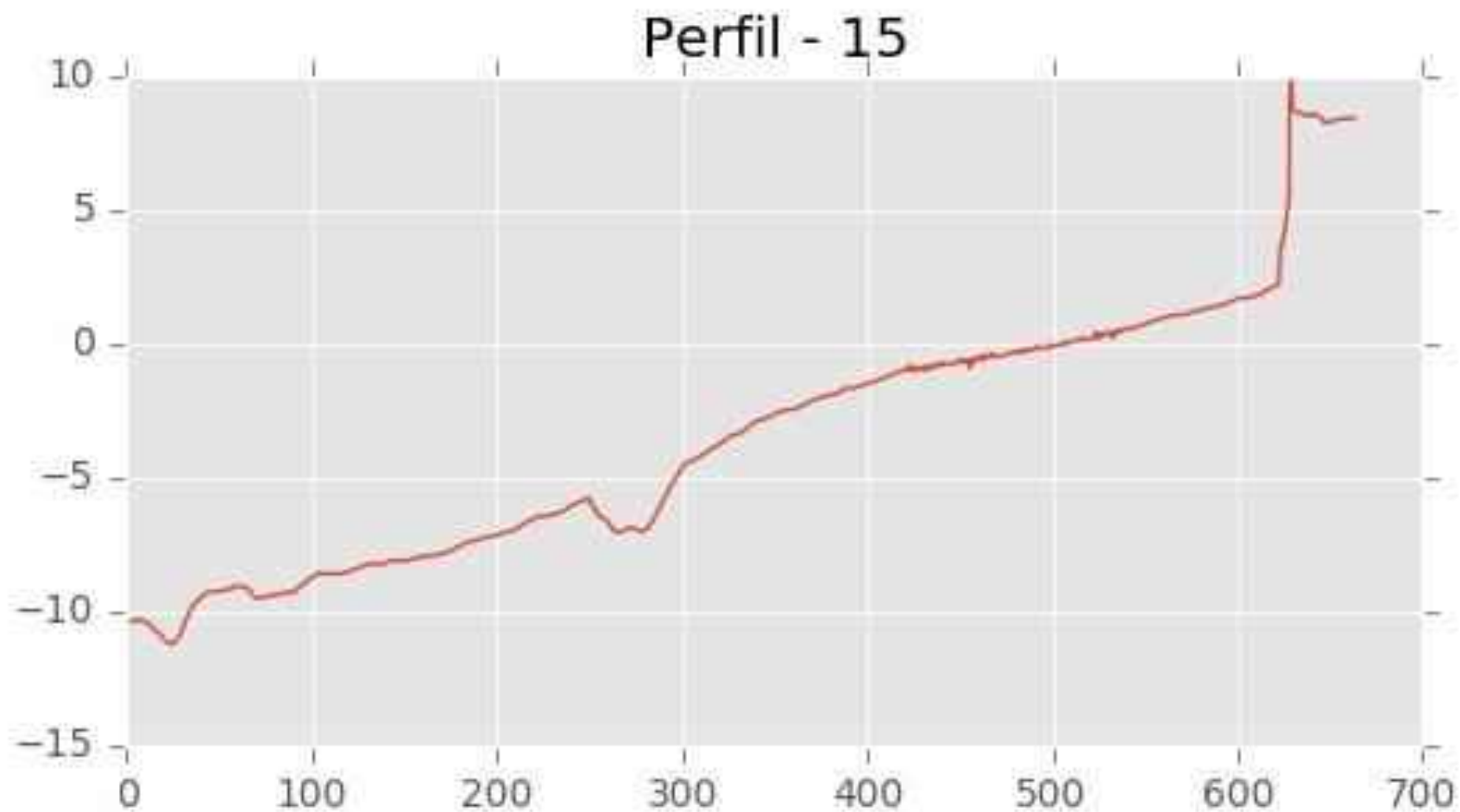


INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)

C/ Cañadilla 6, local 68, C. Comercial Coronado, Las Rozas de Madrid 28231, Madrid

Pza. de la Montañeta 4, entresuelo, 03001 Alicante

Tfno.: 918961731; Fax: 918903410; e-mail: idyma@idyma.es



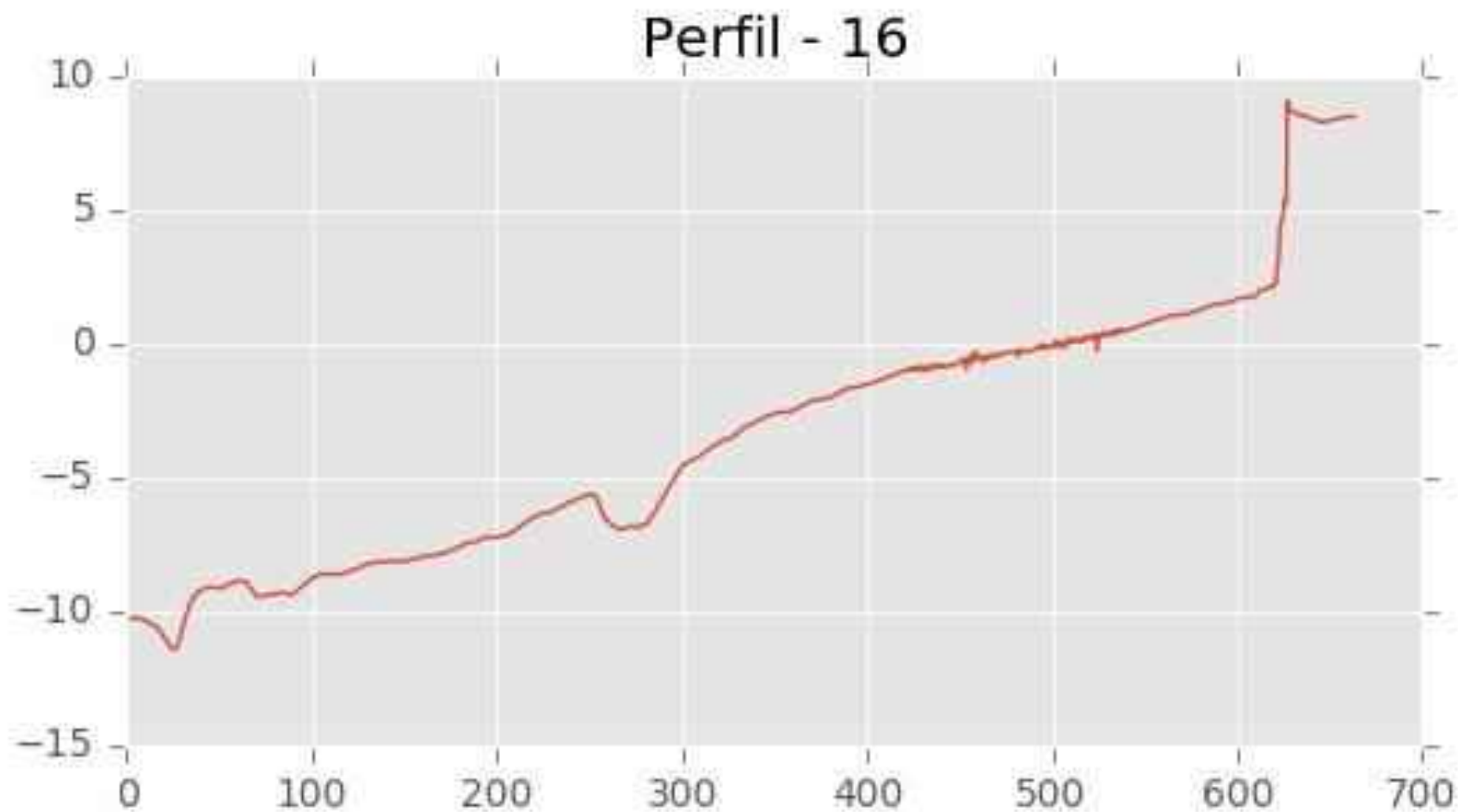


INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)

C/ Cañadilla 6, local 68, C. Comercial Coronado, Las Rozas de Madrid 28231, Madrid

Pza. de la Montañeta 4, entresuelo, 03001 Alicante

Tfno.: 918961731; Fax: 918903410; e-mail: idyma@idyma.es





INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)

C/ Cañadilla 6, local 68, C. Comercial Coronado, Las Rozas de Madrid 28231, Madrid

Pza. de la Montañeta 4, entresuelo, 03001 Alicante

Tfno.: 918961731; Fax: 918903410; e-mail: idyma@idyma.es



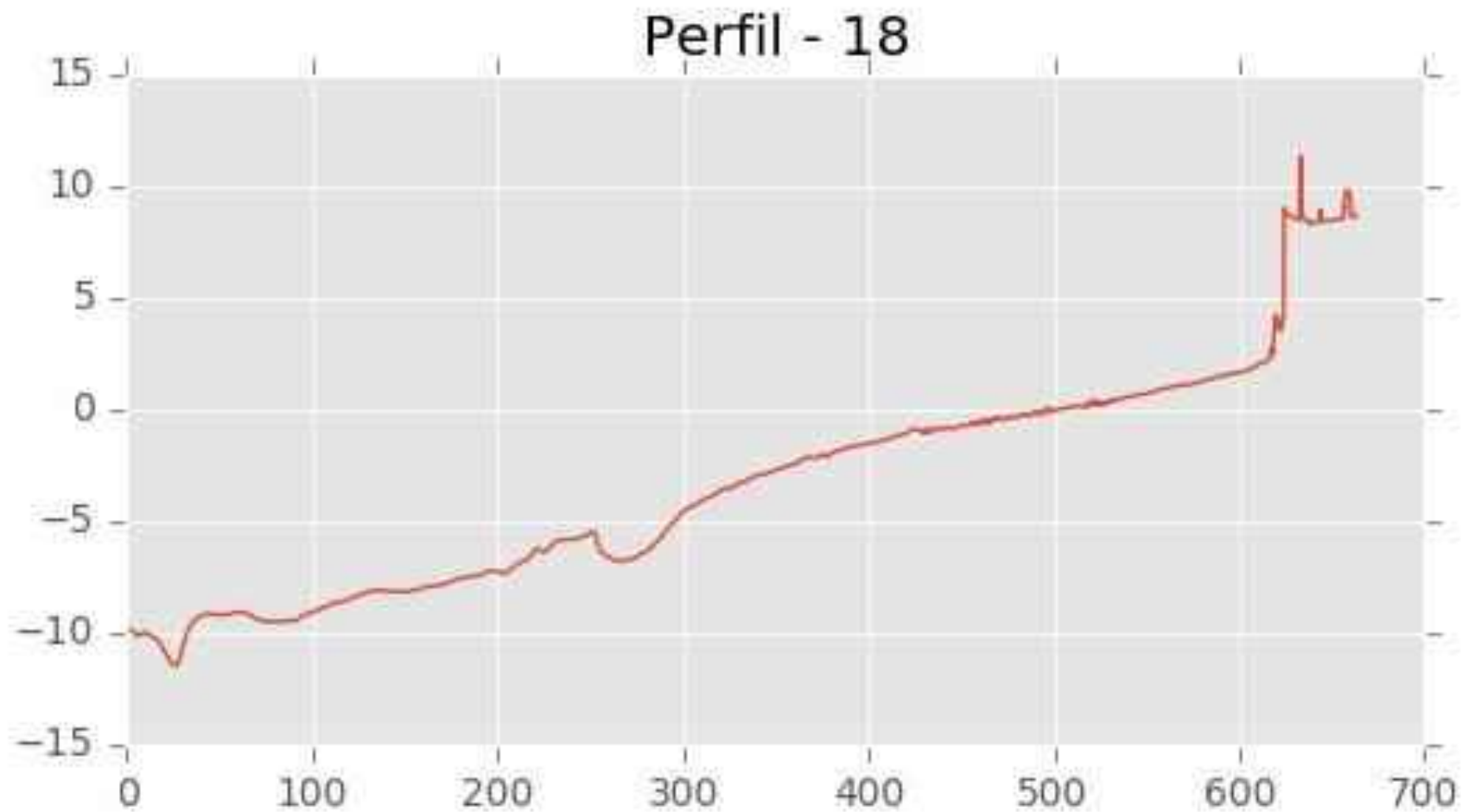


INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)

C/ Cañadilla 6, local 68, C. Comercial Coronado, Las Rozas de Madrid 28231, Madrid

Pza. de la Montañeta 4, entresuelo, 03001 Alicante

Tfno.: 918961731; Fax: 918903410; e-mail: idyma@idyma.es



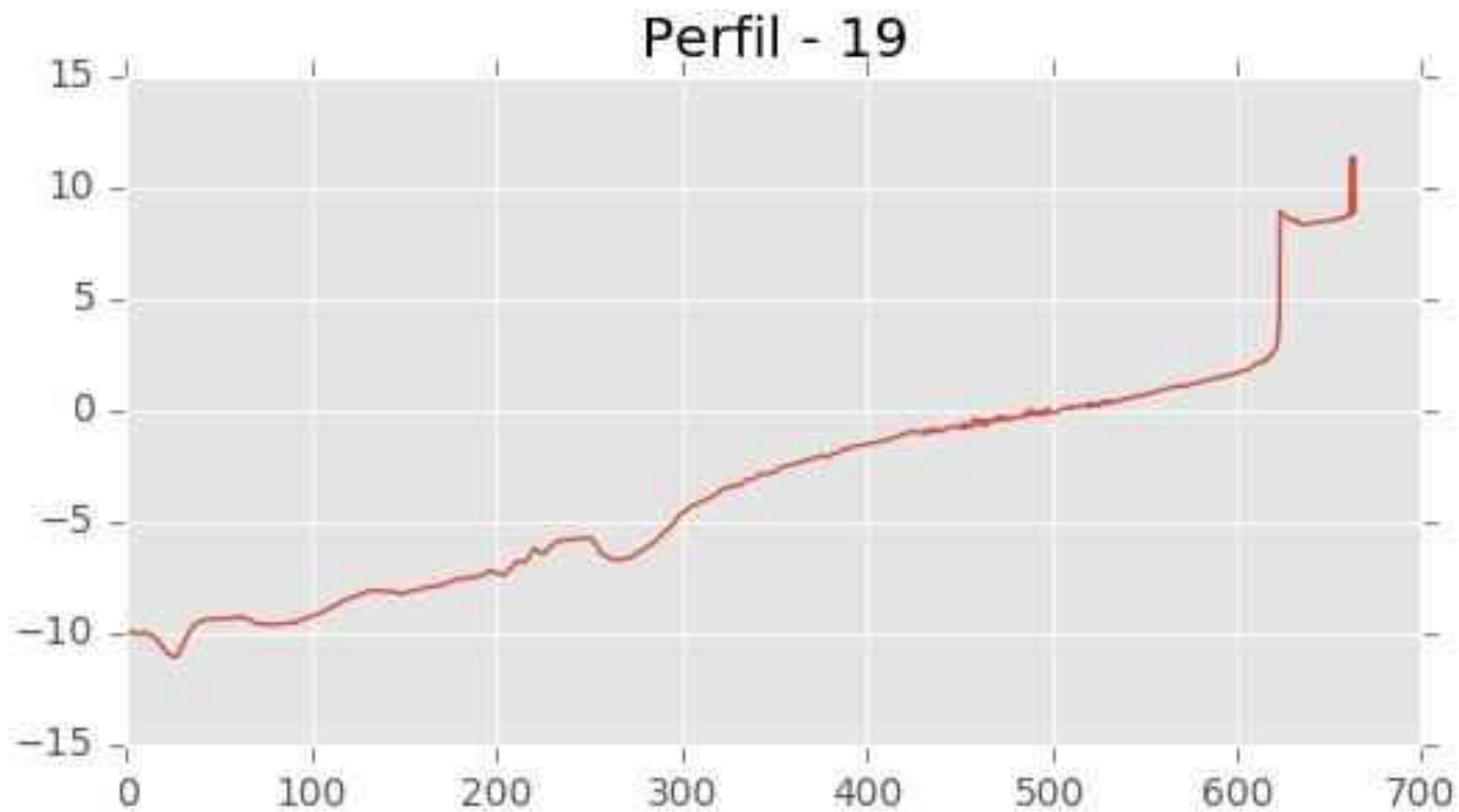


INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)

C/ Cañadilla 6, local 68, C. Comercial Coronado, Las Rozas de Madrid 28231, Madrid

Pza. de la Montañeta 4, entresuelo, 03001 Alicante

Tfno.: 918961731; Fax: 918903410; e-mail: idyma@idyma.es



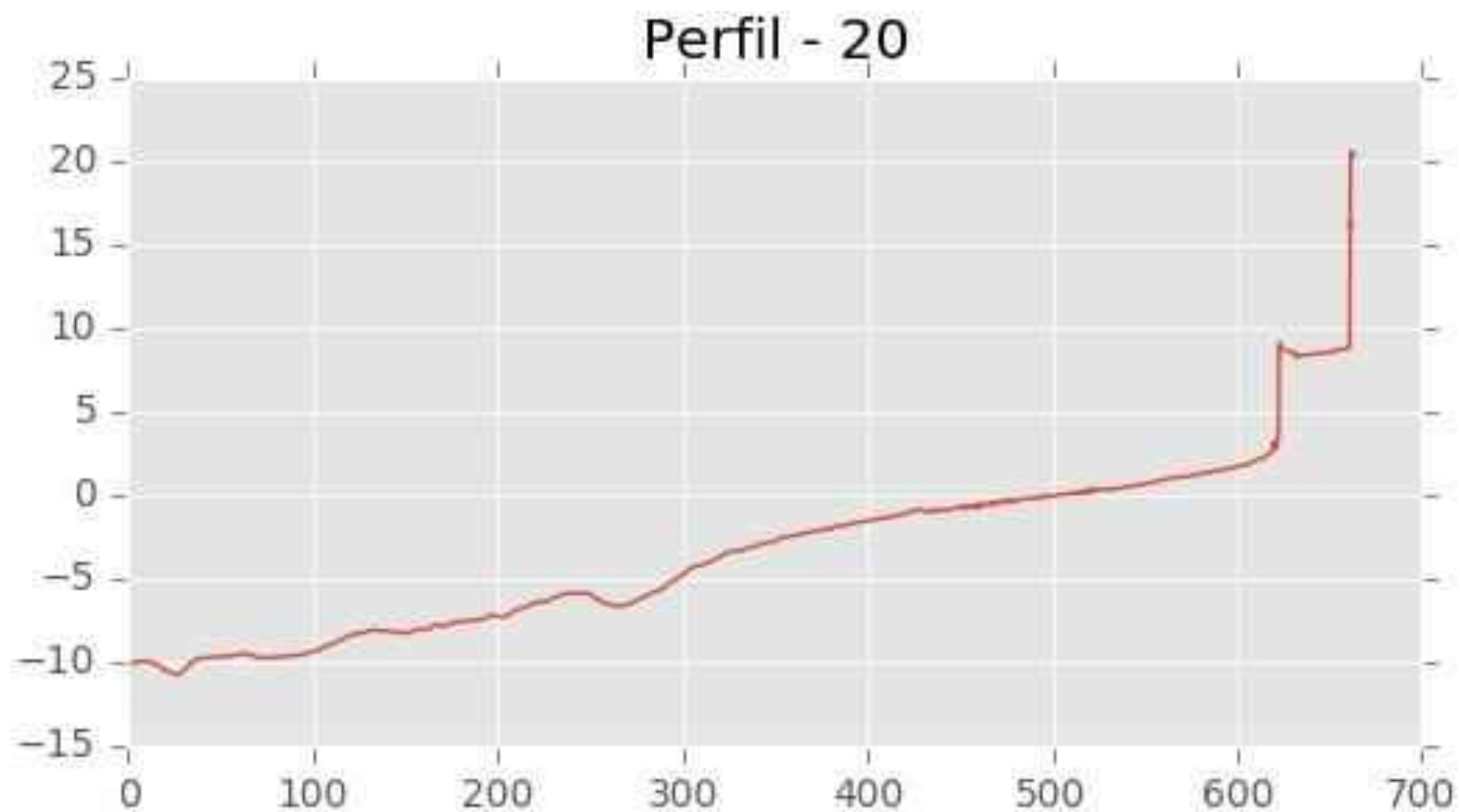


INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)

C/ Cañadilla 6, local 68, C. Comercial Coronado, Las Rozas de Madrid 28231, Madrid

Pza. de la Montañeta 4, entresuelo, 03001 Alicante

Tfno.: 918961731; Fax: 918903410; e-mail: idyma@idyma.es



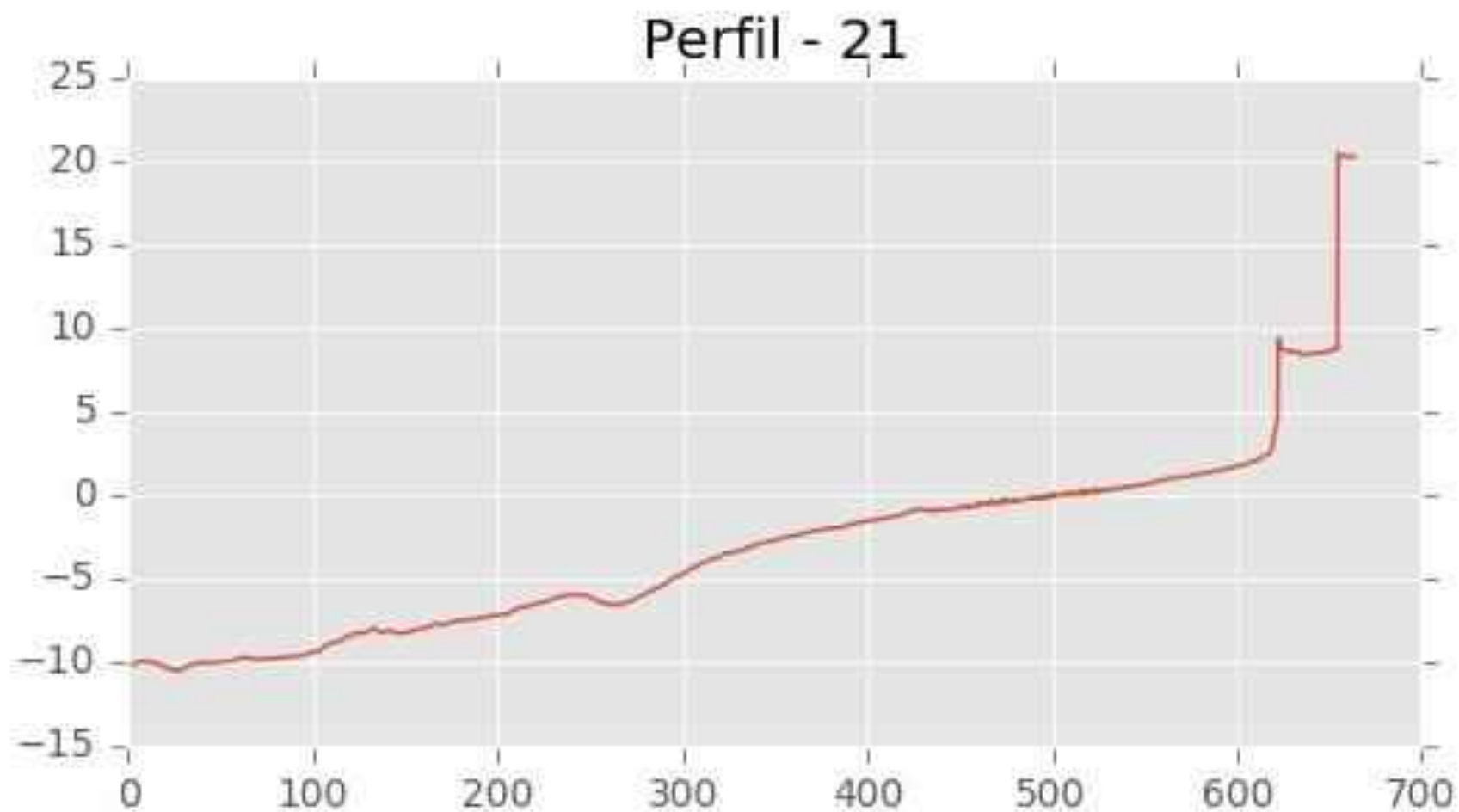


INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)

C/ Cañadilla 6, local 68, C. Comercial Coronado, Las Rozas de Madrid 28231, Madrid

Pza. de la Montañeta 4, entresuelo, 03001 Alicante

Tfno.: 918961731; Fax: 918903410; e-mail: idyma@idyma.es





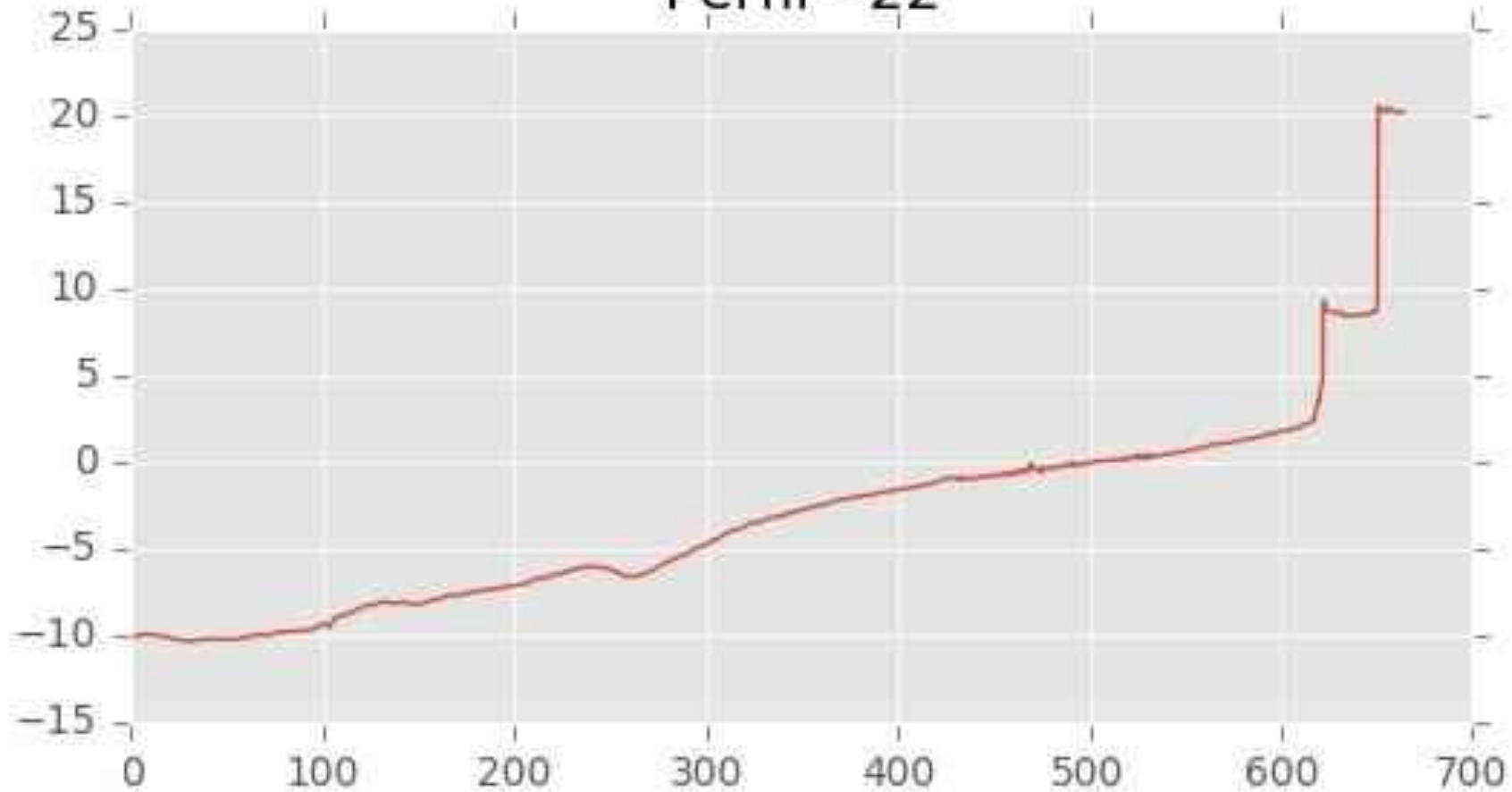
INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)

C/ Cañadilla 6, local 68, C. Comercial Coronado, Las Rozas de Madrid 28231, Madrid

Pza. de la Montañeta 4, entresuelo, 03001 Alicante

Tfno.: 918961731; Fax: 918903410; e-mail: idyma@idyma.es

Perfil - 22



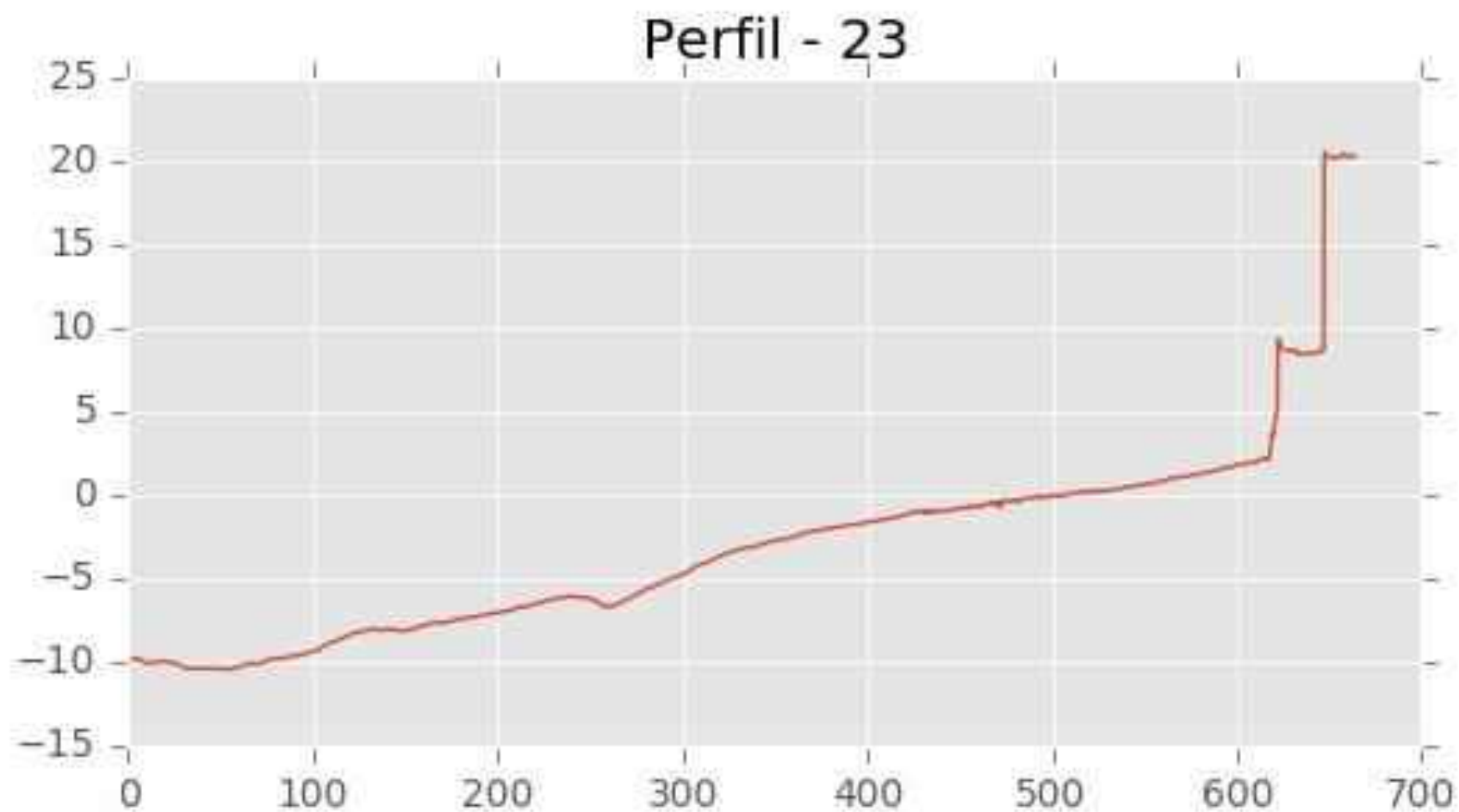


INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)

C/ Cañadilla 6, local 68, C. Comercial Coronado, Las Rozas de Madrid 28231, Madrid

Pza. de la Montañeta 4, entresuelo, 03001 Alicante

Tfno.: 918961731; Fax: 918903410; e-mail: idyma@idyma.es



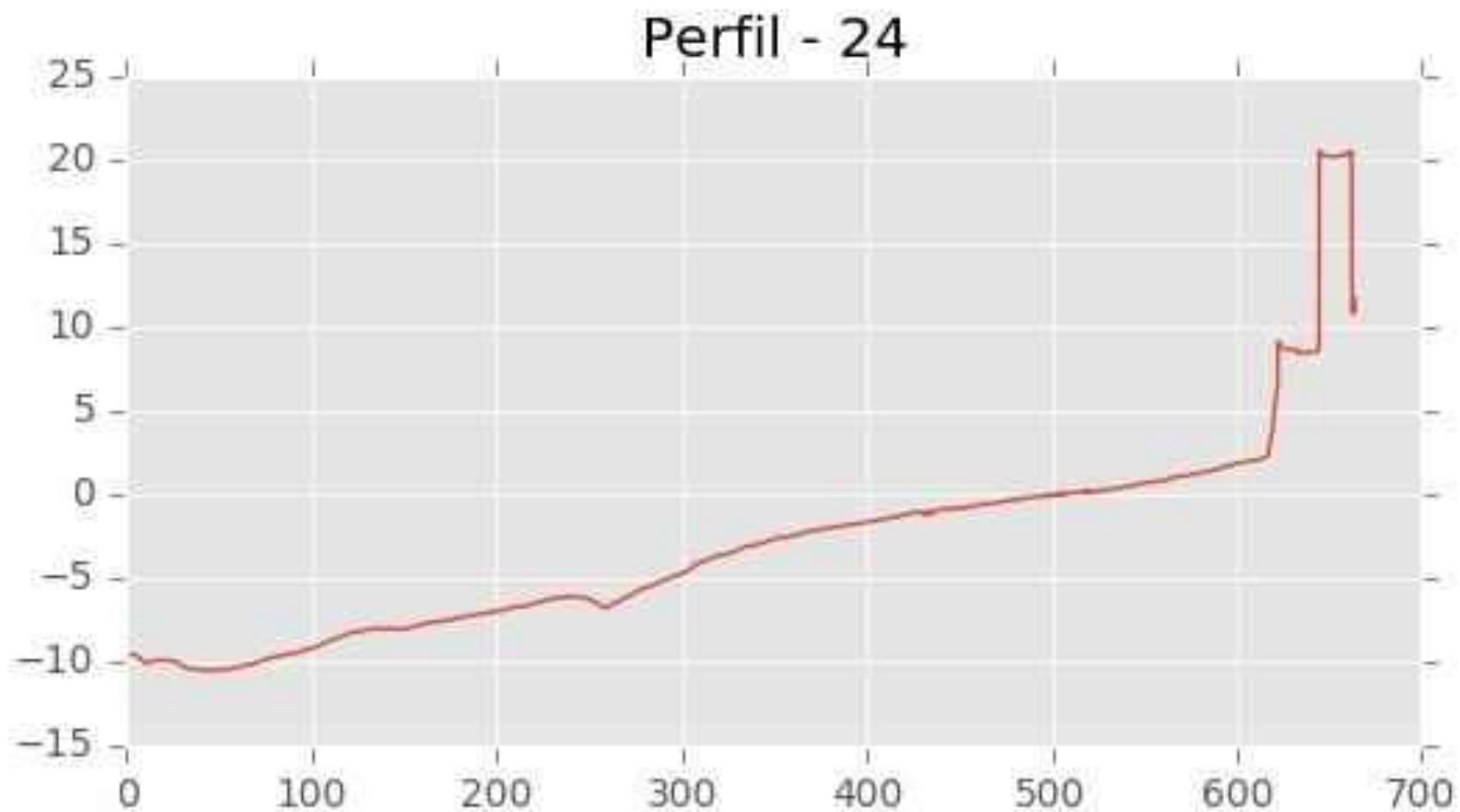


INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)

C/ Cañadilla 6, local 68, C. Comercial Coronado, Las Rozas de Madrid 28231, Madrid

Pza. de la Montañeta 4, entresuelo, 03001 Alicante

Tfno.: 918961731; Fax: 918903410; e-mail: idyma@idyma.es



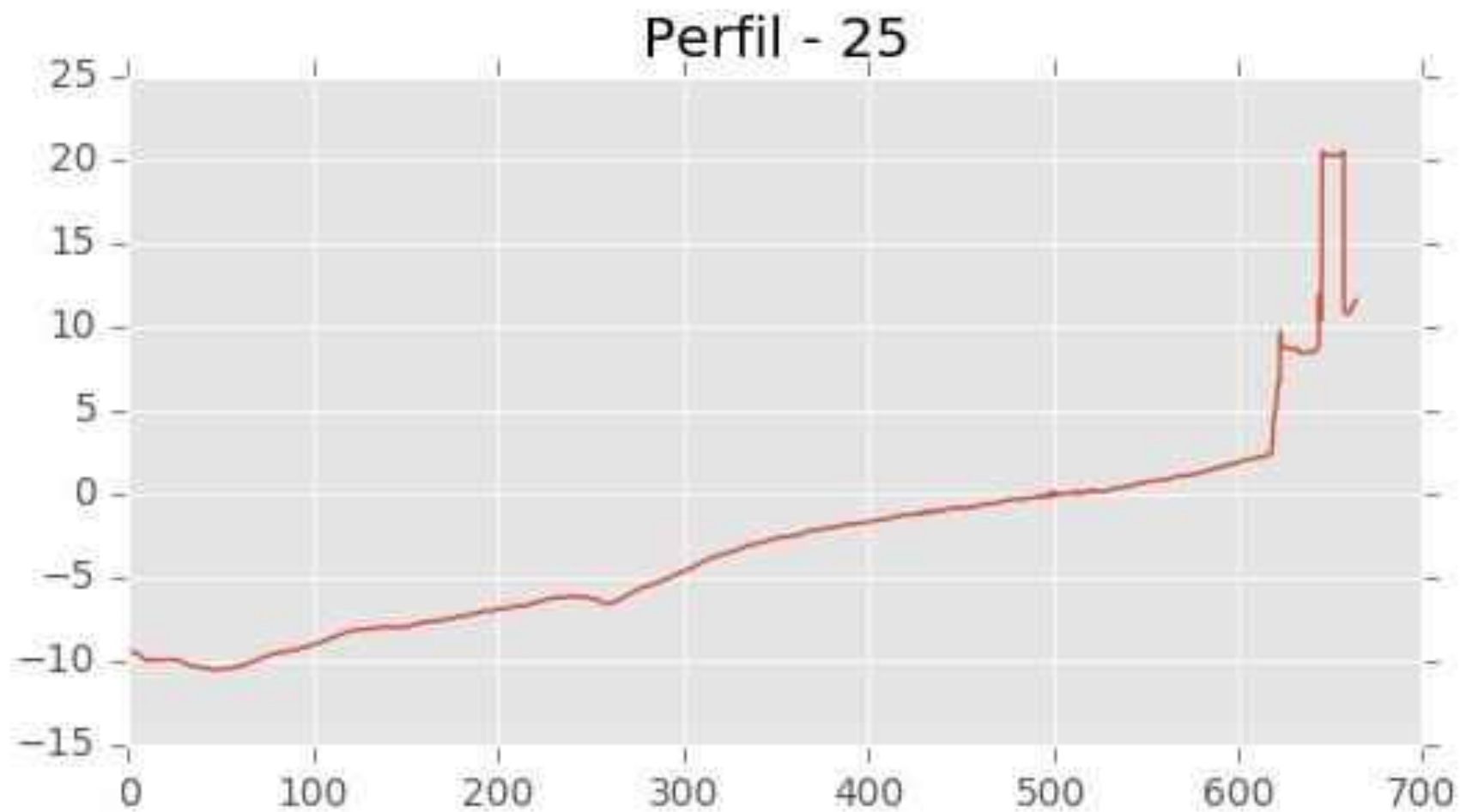


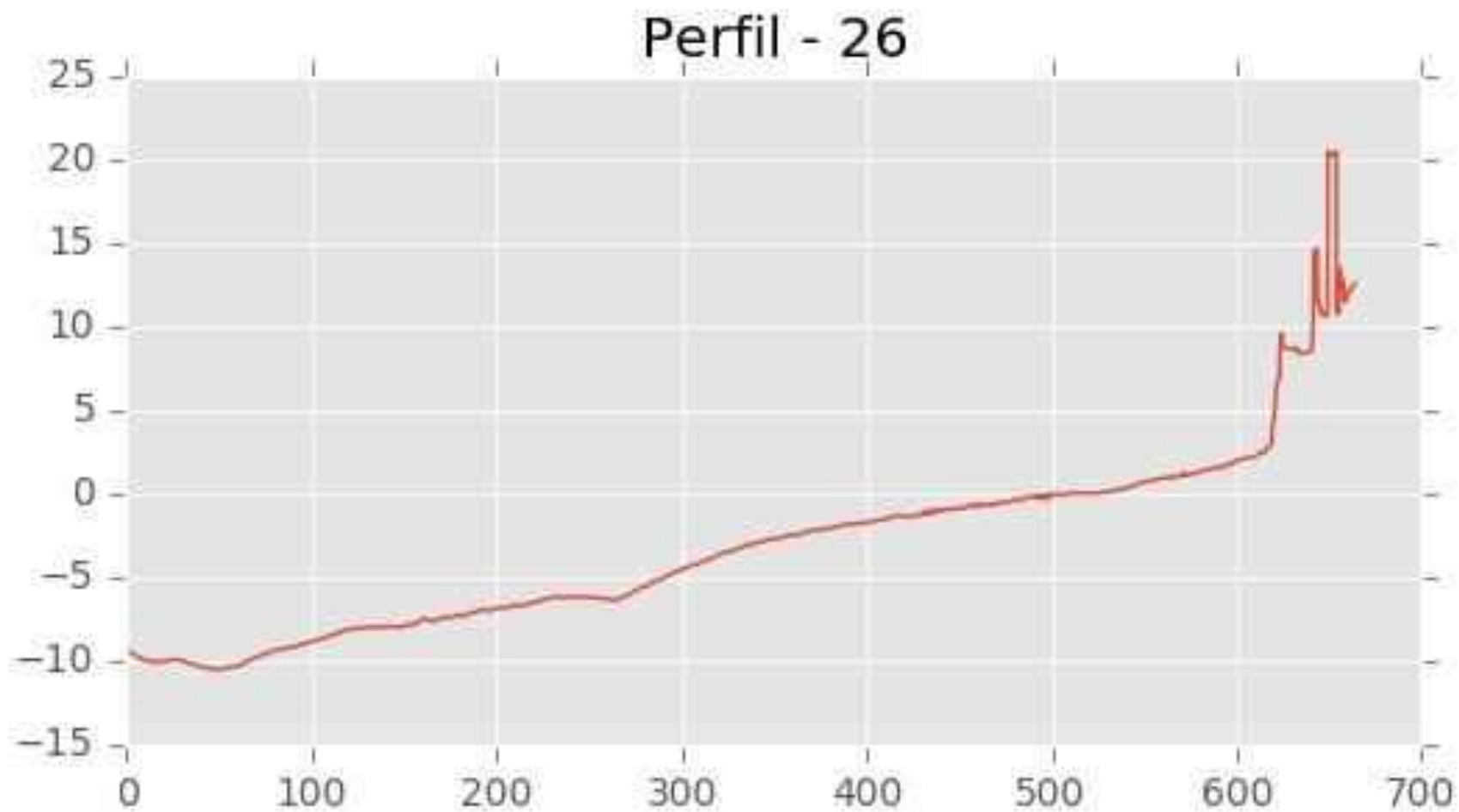
INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)

C/ Cañadilla 6, local 68, C. Comercial Coronado, Las Rozas de Madrid 28231, Madrid

Pza. de la Montañeta 4, entresuelo, 03001 Alicante

Tfno.: 918961731; Fax: 918903410; e-mail: idyma@idyma.es





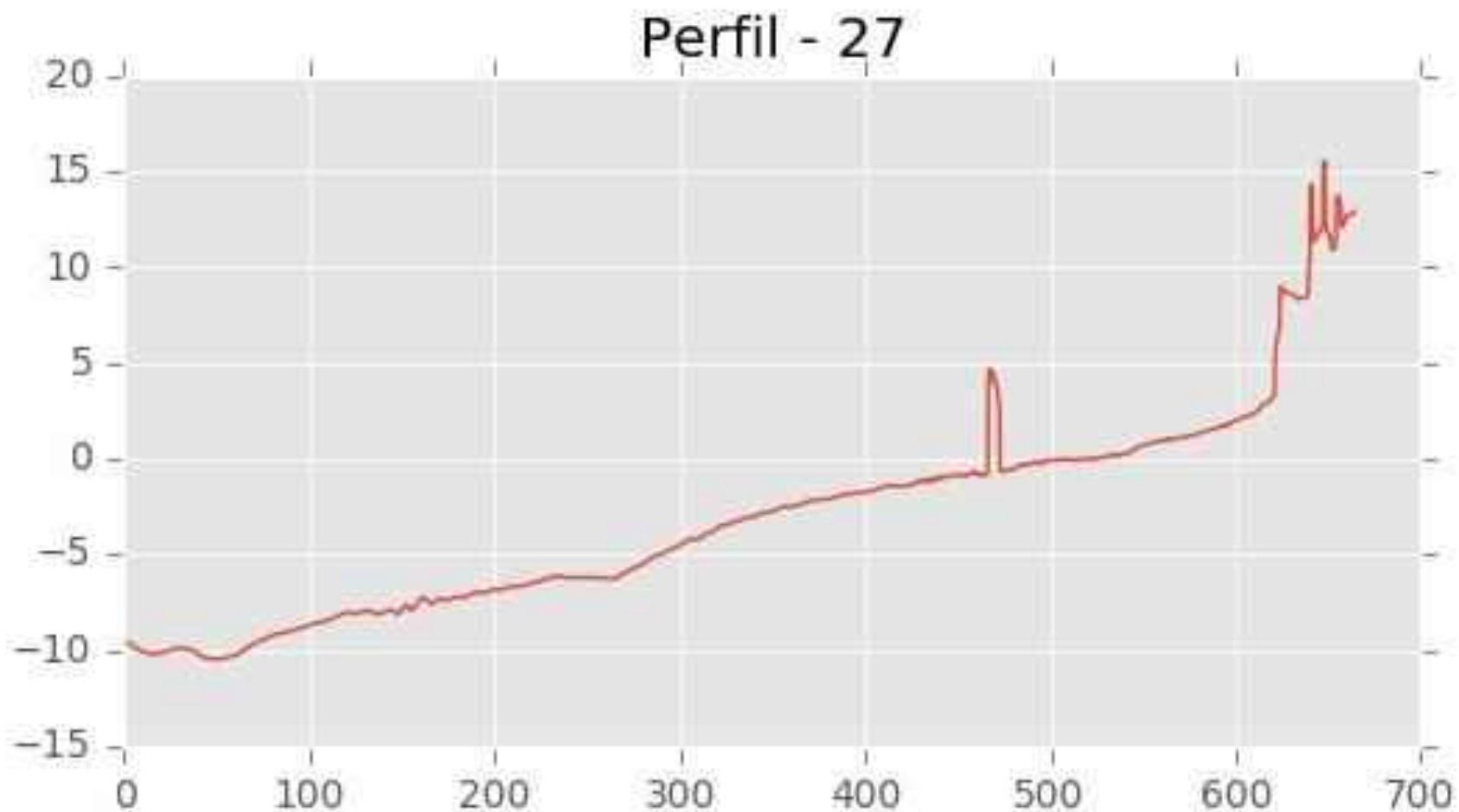


INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)

C/ Cañadilla 6, local 68, C. Comercial Coronado, Las Rozas de Madrid 28231, Madrid

Pza. de la Montañeta 4, entresuelo, 03001 Alicante

Tfno.: 918961731; Fax: 918903410; e-mail: idyma@idyma.es



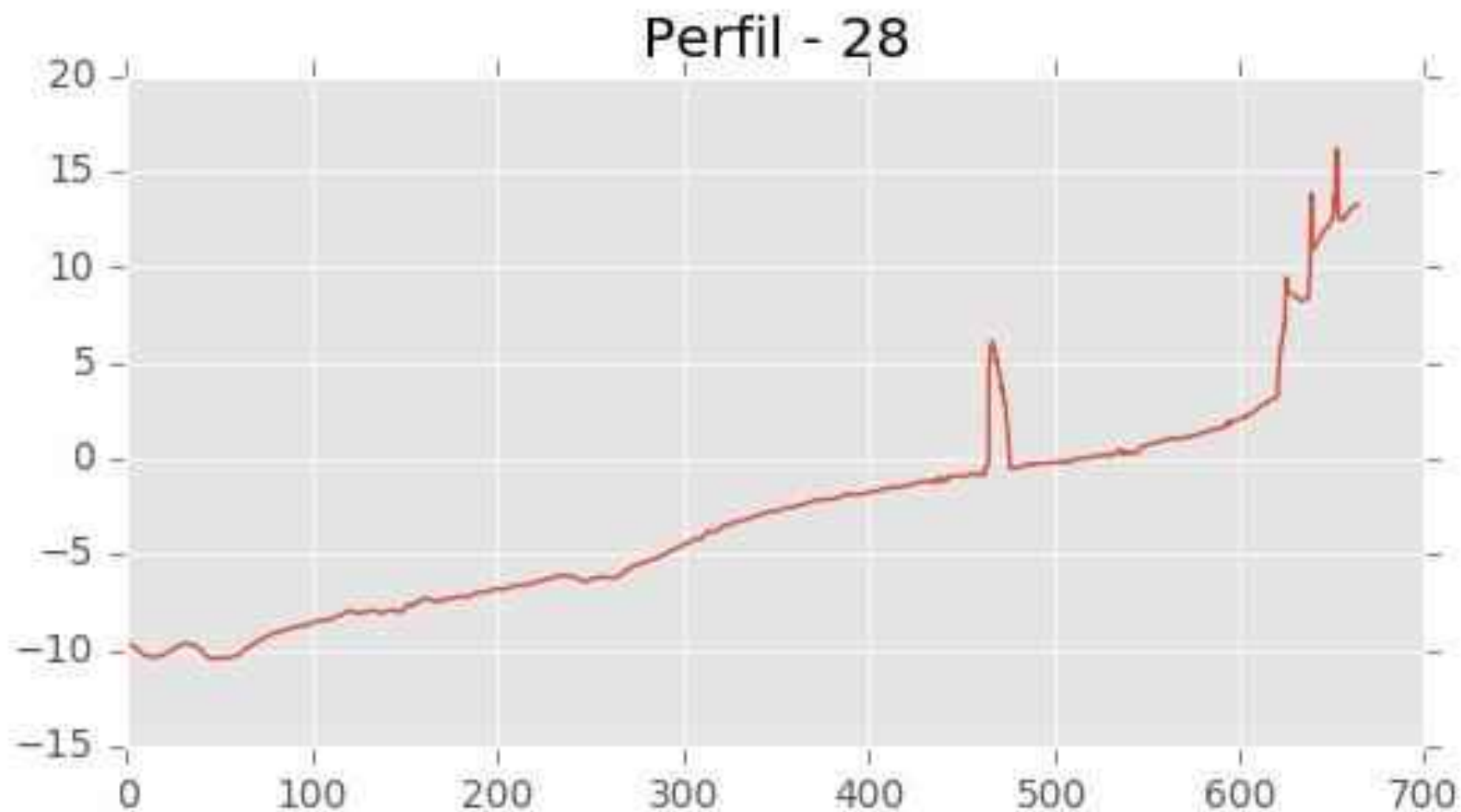


INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)

C/ Cañadilla 6, local 68, C. Comercial Coronado, Las Rozas de Madrid 28231, Madrid

Pza. de la Montañeta 4, entresuelo, 03001 Alicante

Tfno.: 918961731; Fax: 918903410; e-mail: idyma@idyma.es



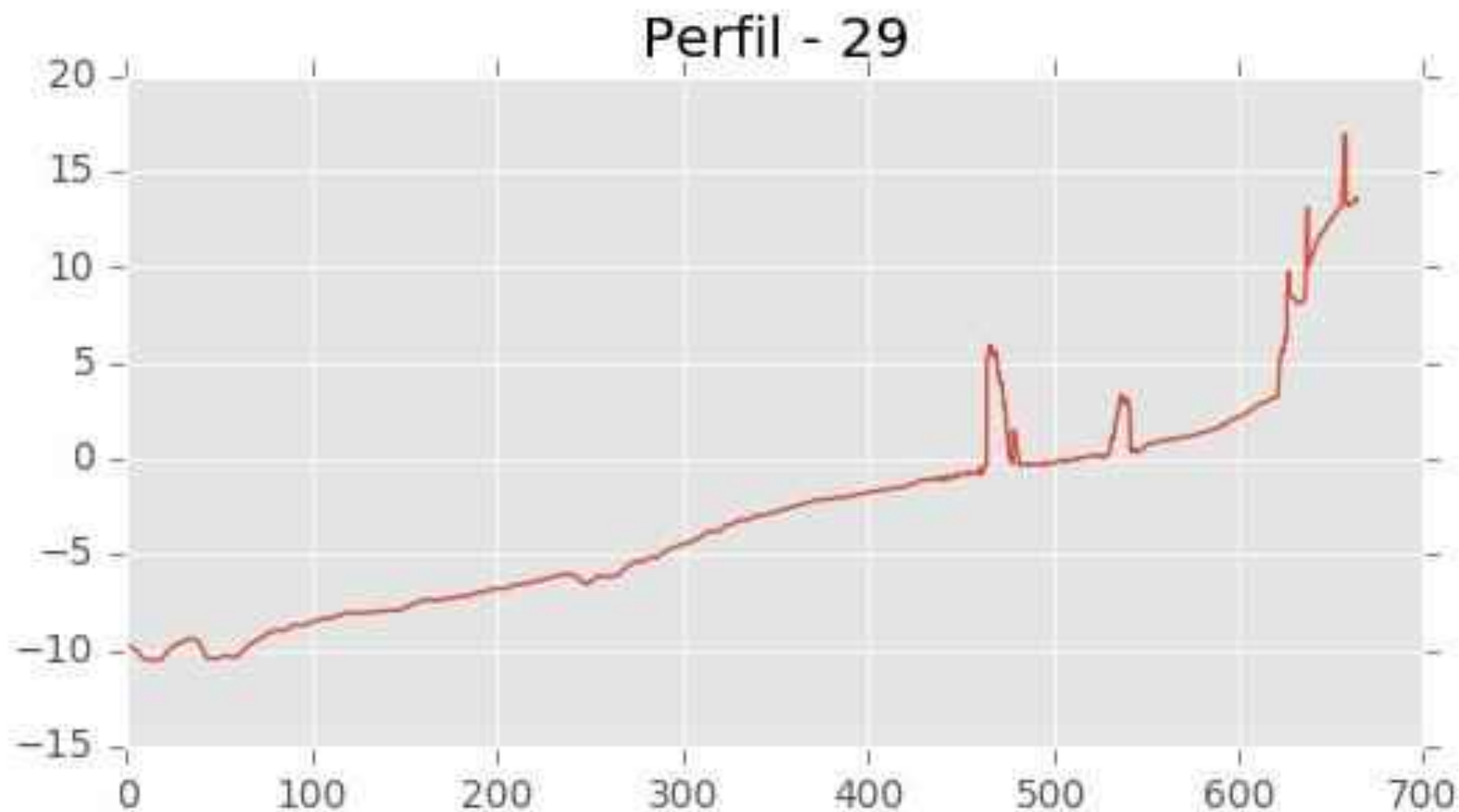


INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)

C/ Cañadilla 6, local 68, C. Comercial Coronado, Las Rozas de Madrid 28231, Madrid

Pza. de la Montañeta 4, entresuelo, 03001 Alicante

Tfno.: 918961731; Fax: 918903410; e-mail: idyma@idyma.es



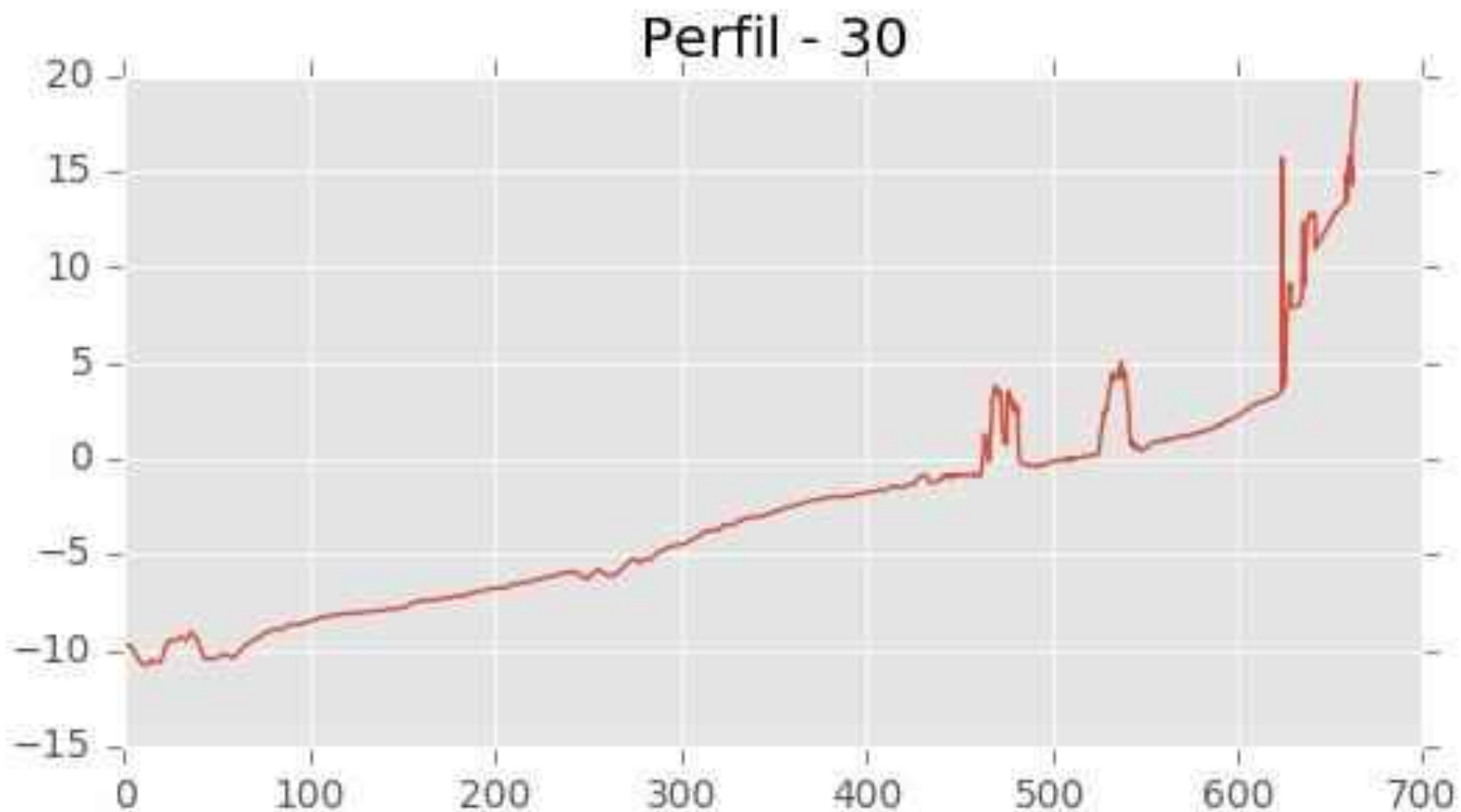


INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)

C/ Cañadilla 6, local 68, C. Comercial Coronado, Las Rozas de Madrid 28231, Madrid

Pza. de la Montañeta 4, entresuelo, 03001 Alicante

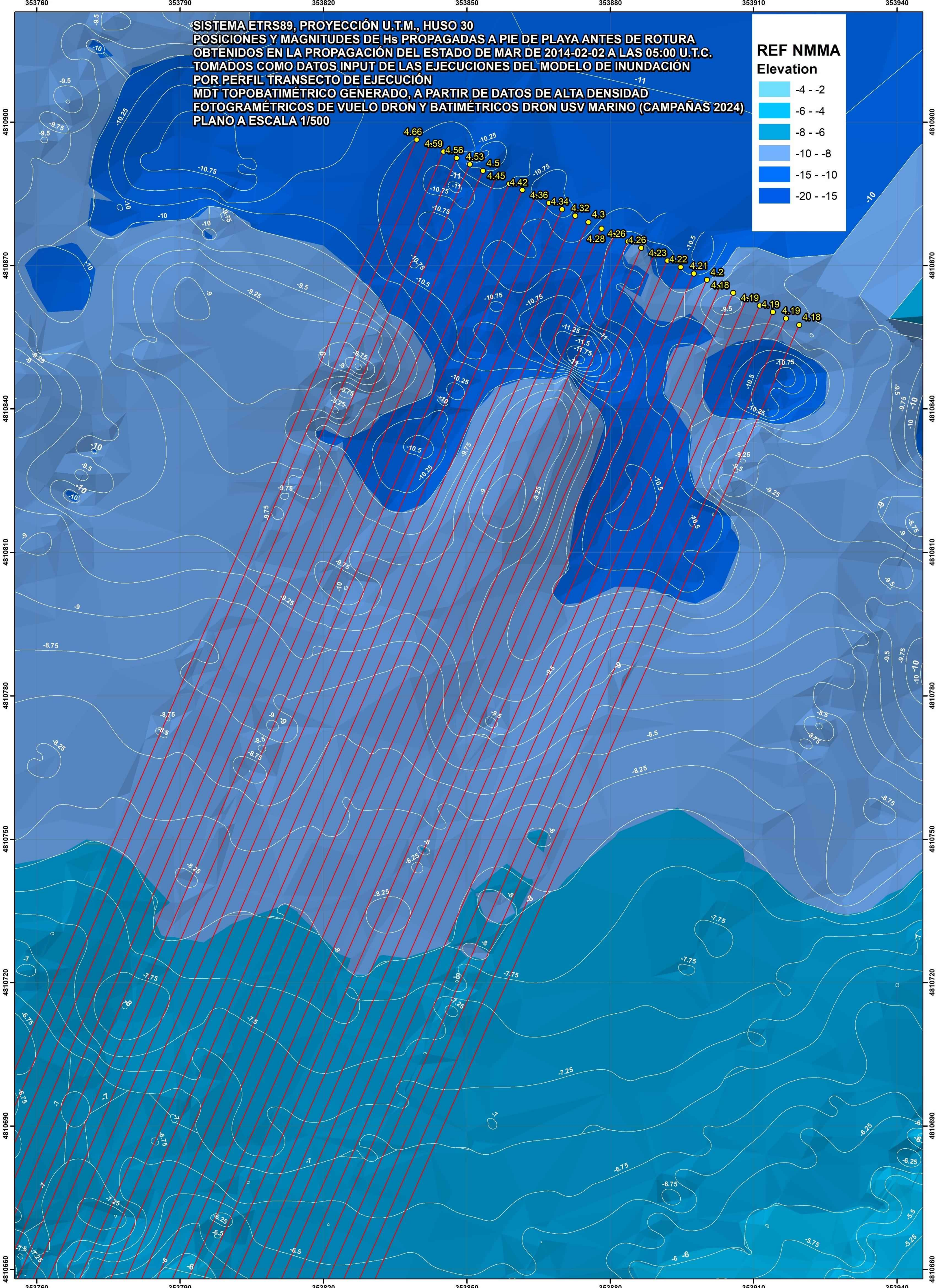
Tfno.: 918961731; Fax: 918903410; e-mail: idyma@idyma.es

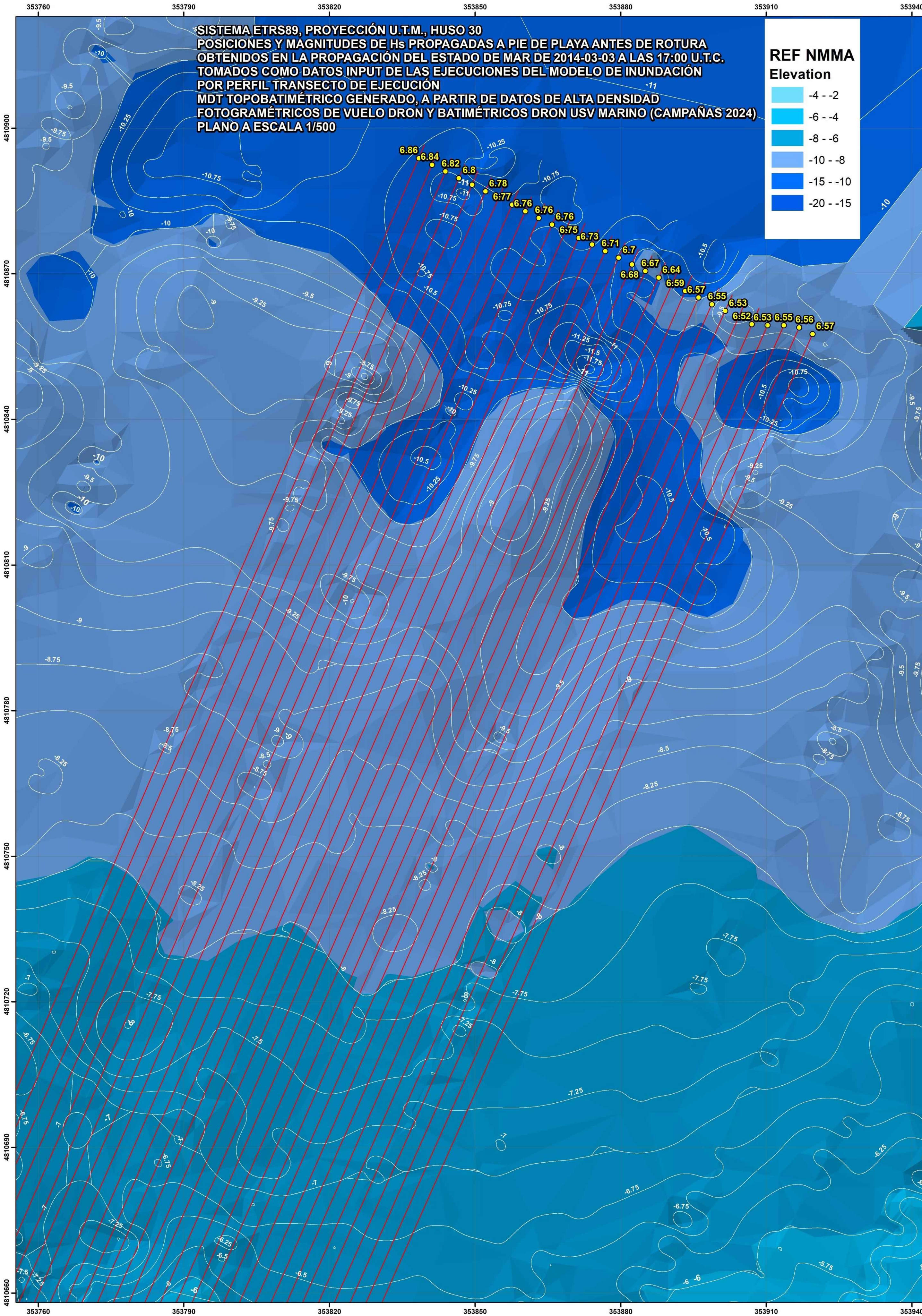


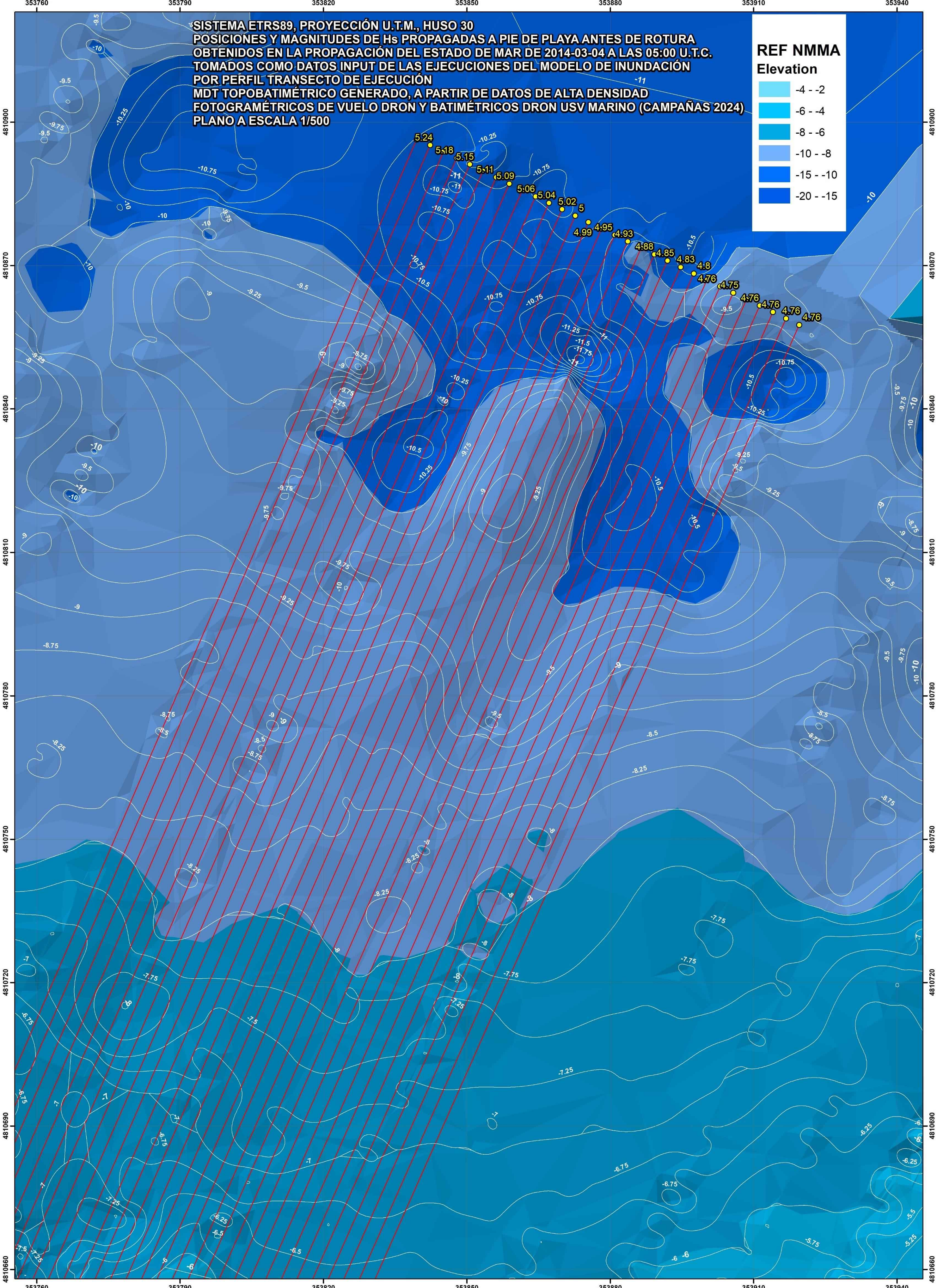


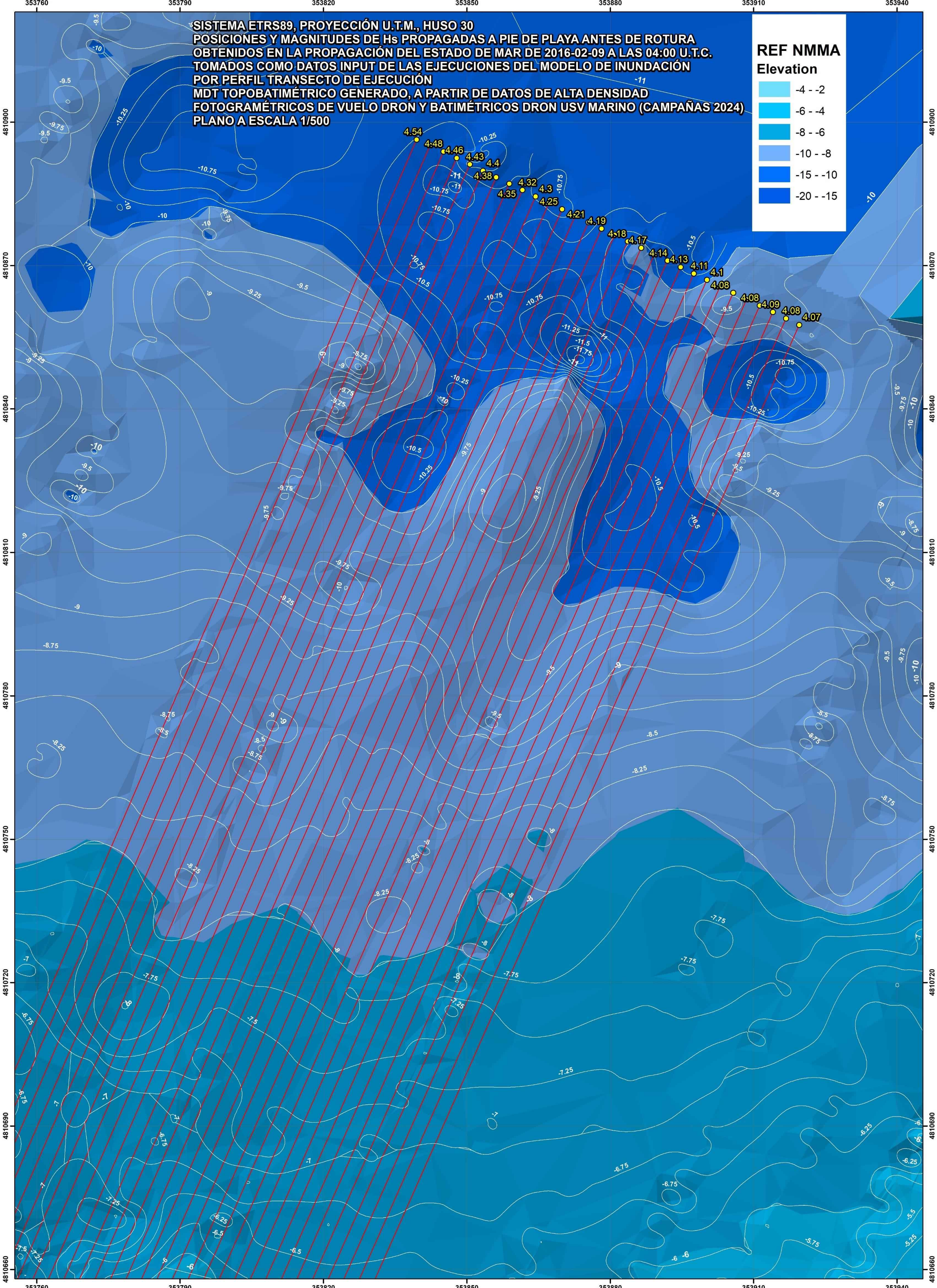
A partir de los resultados de propagación exportados en una malla de detalle de nodos extendida hasta los subtramos con morfología de playa (reflejados en los planos del apartado anterior, en cada uno de los cuales el software Oluca-SP espectral proporcionó los valores de los parámetros del oleaje hasta la posición de cada nodo), se seleccionaron los nodos en playa sumergida antes del inicio de la franja de rompientes sobre cada uno de los perfiles/transectos de ejecución con los valores de altura de ola propagada antes del inicio de la rotura a lo largo de una franja que comprende los 30 perfiles-transectos respectivamente para cada uno de los 5 estados de mar seleccionados del Punto Simar 3108040 (máximos de un período de 5 años comprendido entre 2014 y 2018), sobre los cuales se ha ejecutado el modelo de Nielsen y Hanslow con los factores de corrección (en el presente estudio unitarios).

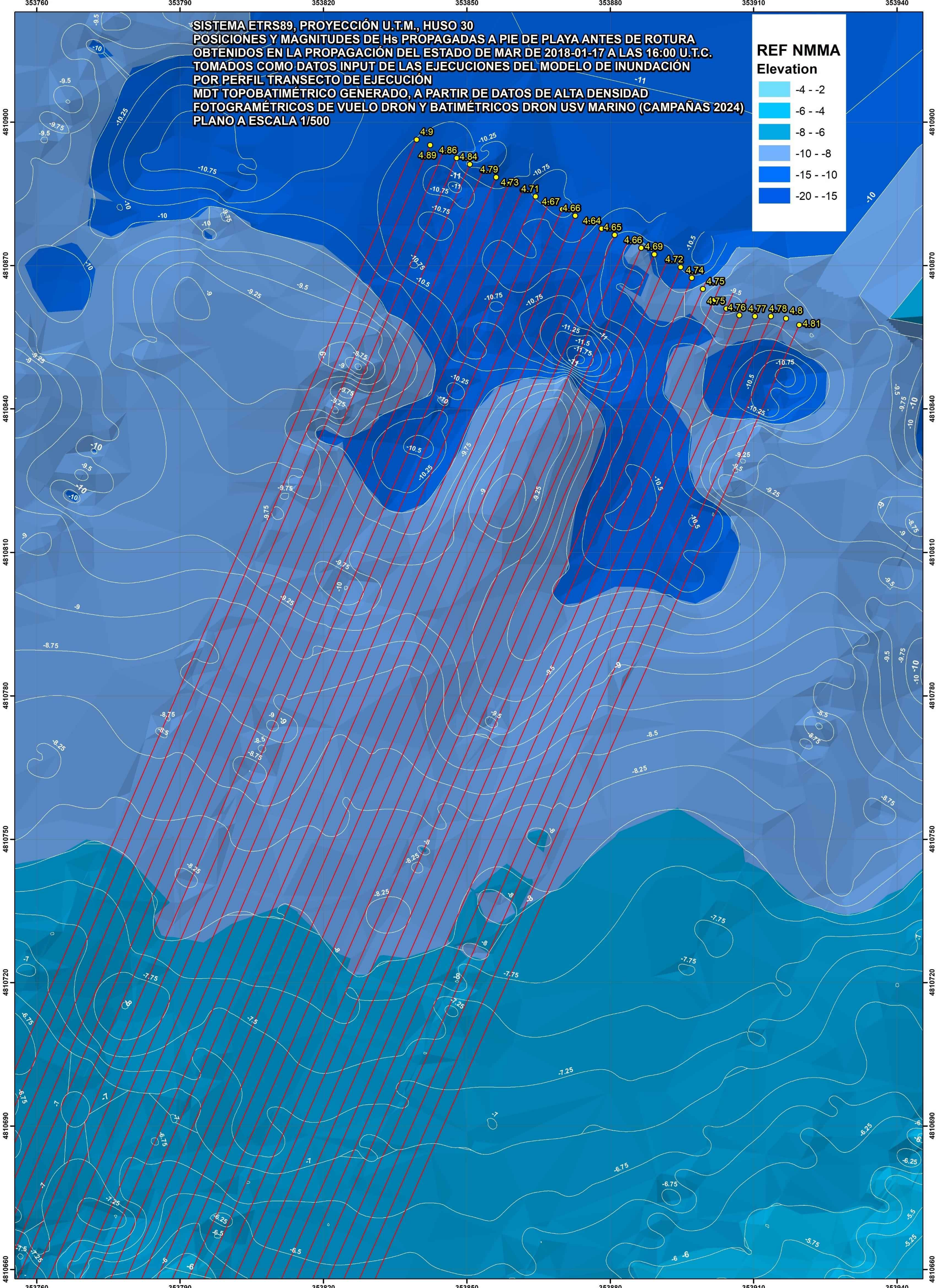
En los siguientes planos a escala 1/500 se recogen sobre el MDT batimétrico de alta densidad (equidistancia de curvado de 0,25 m.) obtenido con tecnología dron USV (equipos RTK-GNSS de precisión centimétrica acoplados con ecosonda monohaz tri-frecuencia) en campaña de campo de marzo de 2024, los puntos de oleaje propagado a pie de playa que conecta con cada perfil/transecto de ejecución de los cálculos de CI antes de rotura, con indicación de los valores de Hs propagados por cada uno de los estados de mar hasta las posiciones indicadas por perfil/transecto.

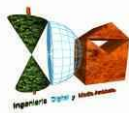












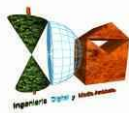
Todos los procesos de selección de los puntos de propagación con los valores propagados hasta esas posiciones antes de rotura (planos anteriores con los valores de propagación imput para cada perfil de ejecución), así como la ejecución de los cálculos del modelo de inundación descrito por perfil y por estado de mar para cada uno de los perfiles/transectos de ejecución realizando los cálculos y capturando datos a partir de la caracterización a escala de detalle de alta densidad del MDT topo-batimétrico generado, incluyendo la selección por perfil/transecto del 5º valor de CI, se han llevado a cabo mediante una aplicación informática diseñada y programada en plataforma GIS que comprende un paquete de herramientas interactivas que aplicarán dicho modelo semiempírico para el cálculo de las líneas de inundación sobre el MDT de alta resolución, realizando las siguientes operaciones:

1. Cálculo de la pendiente del frente de playa sobre el MDT topobatimétrico de cada uno de los 30 perfiles de playa respectivamente (playa sumergida y emergida), obtenida como la pendiente de la recta ajustada a los puntos de cada perfil por el método de mínimos cuadrados.
2. A partir de una línea previa de rotura semiempírica que calcula la aplicación con los modelos-criterios de Sunamura y Horikawa (1974) y Sunamura (1980), (con H_b = altura de ola en rotura, d_b = profundidad de rotura, L_0 longitud de onda en aguas profundas y m = pte. del frente de playa)

$$\frac{H_b}{H_0} = m^{0.2} \left(\frac{H_0}{L_0} \right)^{-0.25} \quad \frac{H_b}{h_b} = 1.1 m^{1/6} \left(\frac{H_0}{L_0} \right)^{-1/12}$$

que comprenderá la extensión de los perfiles,

la aplicación seleccionará los nodos más próximos de la malla de propagación de detalle sobre la franja batimétrica previa a la línea de rotura inicialmente estimada, con las mayores alturas de ola propagada frente a cada perfil antes de rotura, para tomar los valores de H_s propagados por el Oluca-SP espectral, que serán datos imput para la ejecución de los cálculos de run-up (reflejado en los planos anteriores a escala 1/500).



3. Ejecución de los cálculos de run-up sobre cada uno de los 30 perfiles-transectos respectivamente para cada uno de los 5 temporales seleccionados como los máximos responsables de inundación tras el análisis de los estados de mar horarios del período 1995-2014 y propagación de 7 estados de mar.
4. Adición del nivel mareal sincronizado correspondiente al horario de cada estado de mar, al resultado de run-up, obteniendo una cota de inundación en cada uno de los 30 perfiles para cada uno de los 5 temporales seleccionados como los máximos responsables de inundación de sus respectivos sectores de oleajes de procedencia.
5. Cálculo de la intersección de la cota de inundación obtenida sobre cada perfil con el MDT emergido, generando una cobertura de puntos con sus coordenadas de georreferenciación x, y, z=cota de inundación, en el sistema ETRS89, Huso 30 en cada uno de los 5 temporales.
6. Generación de la geometría de los puntos de inundación solución por cada estado de mar, resultantes en el MDT sobre cada uno de los perfiles en cada uno de los estados de mar calculados para cada uno de los perfiles, que posibilitarán la elección máximo valor entre los 5 obtenidos por perfil.
7. Selección de los puntos solución de inundación según los criterios del R.G.C. (art. 4.1.a y 4.1.b), como los puntos cuya cota de inundación se corresponden con los quintos valores en magnitud de entre los 5 temporales seleccionados a partir de los datos del Punto Simar de cota de inundación sobre cada uno de los 30 perfiles, (quinto valor de CI sobre cada perfil). La discretización de la morfología de la costa en los 30 perfiles (equidistancia de 2,82 m. entre perfiles) implica que podrán ser distintos estados de mar los causantes del quinto valor dependiendo de la ubicación de los perfiles.
8. Generación de la poligonal solución sobre el MDT, a partir de las series de puntos de CI obtenidos para cada estado de mar (calculados a su vez a partir de los datos del Punto Simar propagados hasta pie de playa), como la unión de los puntos CI de cada perfil que han resultado los quintos valores en magnitud CI de los 5 estados de mar propagados y calculados por perfil.



En las tablas siguientes, se incluyen los resultados finales de la cota de inundación CI sobre la playa de Palombina del oleaje, que constituyen las cotas altimétricas debidas al run-up incrementadas con sus respectivos niveles mareales con las que el oleaje incide sobre la estructura vertical del muro de hormigón sobre el que se sustenta la zona de estacionamiento de vehículos en su plataforma superior, resultantes sobre cada perfil como el quinto valor de los 5 temporales finalmente seleccionados, especificándose en la misma el valor de la altura de ola propagada a pie de playa por perfil Hspp antes de rotura, que se ha tomado para los cálculos de run-up e inundación para cada perfil correspondientes a los estados de mar seleccionados por sus máximos potenciales de inundación según el análisis e iteraciones previas sobre las series horarias completas en el período de cinco años seleccionado entre 2014-2018 (inicialmente desde 1995 a la actualidad, y tras el análisis concretado en el período de 5 años 2014-2018), con sincronización de estados de mar horarios y niveles mareales, obtenidos sobre los nodos de la malla de detalle sobre la zona de estudio con los resultados de alturas de ola y vectores direccionales propagados (fichas y planos adjuntos en apartado 3.2.1.4), simulados por el modelo numérico de simulación Oluca-SP espectral, así como los resultados de la aplicación del modelo de Nielsen-Hanslow para el run-up en playas, y el resto de parámetros que intervienen en el modelo de inundación, como las pendientes de playa (modelo de Nielsen-Hanslow), número de Iribarren, etc..., incluyéndose asimismo el nivel mareal y la cota total de inundación (playa) y de alcance de oleajes (cantil) por perfil de ejecución correspondientes a los estados de mar generadores del quinto valor por perfil. Se proporcionan los valores de CI (cota de inundación) por run-up en la superficie emergida de la playa que incide sobre el muro del fondo de playa que sustenta la zona de estacionamiento en su plataforma superior, quinta en magnitud por perfil de entre las 5 máximas, que se corresponden con los valores finalmente intersecados sobre el terreno y en consecuencia con una geometría dada por sus coordenadas x,y,z sobre el MDT de alta densidad generado.

A tenor de los resultados de CI en la playa de Palombina por perfil/transecto de ejecución, que superan en todos los perfiles las cotas altimétricas del fondo de playa en su límite con la estructura vertical correspondiente al muro de hormigón sobre el que se sustenta la zona de estacionamiento de vehículos en su plataforma superior (entorno de +3,36 m. a +3,6 m. NMMA), en un entorno de CI promedio de los 30 perfiles cercano a la cota altimétrica +5,90 NMMA, la masa de agua que asciende por la superficie de la playa alcanzará e impactará dicha estructura vertical con energía todavía no disipada evidenciada en la diferencia potencial entre las cotas altimétricas de +3,6 a +5,90, de forma que se transformará en un ascenso vertical por la misma que se valorará mediante el modelo de Goda.



INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)

C/ Cañadilla 6, local 68, C. Comercial Coronado, Las Rozas de Madrid 28231, Madrid

Pza. de la Montañeta 4, entresuelo, 03001 Alicante

Tfno.: 918961731; Fax: 918903410; e-mail: idyma@idyma.es

Nº PERFIL	Fecha/Hora UTC	H0 (m.)	Hs (m.)	Tp (seg.)	Nivel Mareal (m. NMMA)	Z_Hs (m. NMMA)	Pendiente	Ir	RunUp (m.)	Alcance (m. NMMA)
1	2018-01-17 16:00:00	7.48	4.90	19.51	1.67	-10.51	0.0226	0.2631	4.27	5.94
2	2018-01-17 16:00:00	7.48	4.89	19.51	1.67	-10.59	0.0227	0.2619	4.27	5.94
3	2018-01-17 16:00:00	7.48	4.88	19.51	1.67	-10.62	0.0227	0.2620	4.26	5.93
4	2018-01-17 16:00:00	7.48	4.86	19.51	1.67	-10.50	0.0228	0.2614	4.25	5.92
5	2018-01-17 16:00:00	7.48	4.84	19.51	1.67	-10.23	0.0229	0.2626	4.25	5.92
6	2018-01-17 16:00:00	7.48	4.82	19.51	1.67	-10.28	0.0230	0.2625	4.23	5.90
7	2018-01-17 16:00:00	7.48	4.79	19.51	1.67	-10.36	0.0230	0.2652	4.22	5.89
8	2018-01-17 16:00:00	7.48	4.76	19.51	1.67	-10.50	0.0231	0.2687	4.21	5.88
9	2018-01-17 16:00:00	7.48	4.73	19.51	1.67	-10.63	0.0230	0.2727	4.20	5.87
10	2018-01-17 16:00:00	7.48	4.71	19.51	1.67	-10.78	0.0229	0.2727	4.19	5.86
11	2018-01-17 16:00:00	7.48	4.68	19.51	1.67	-10.84	0.0227	0.2740	4.17	5.84
12	2018-01-17 16:00:00	7.48	4.67	19.51	1.67	-10.86	0.0225	0.2765	4.17	5.84
13	2018-01-17 16:00:00	7.48	4.66	19.51	1.67	-10.69	0.0223	0.2784	4.16	5.83
14	2018-01-17 16:00:00	7.48	4.65	19.51	1.67	-10.56	0.0222	0.2785	4.16	5.83
15	2018-01-17 16:00:00	7.48	4.64	19.51	1.67	-10.43	0.0220	0.2776	4.16	5.83

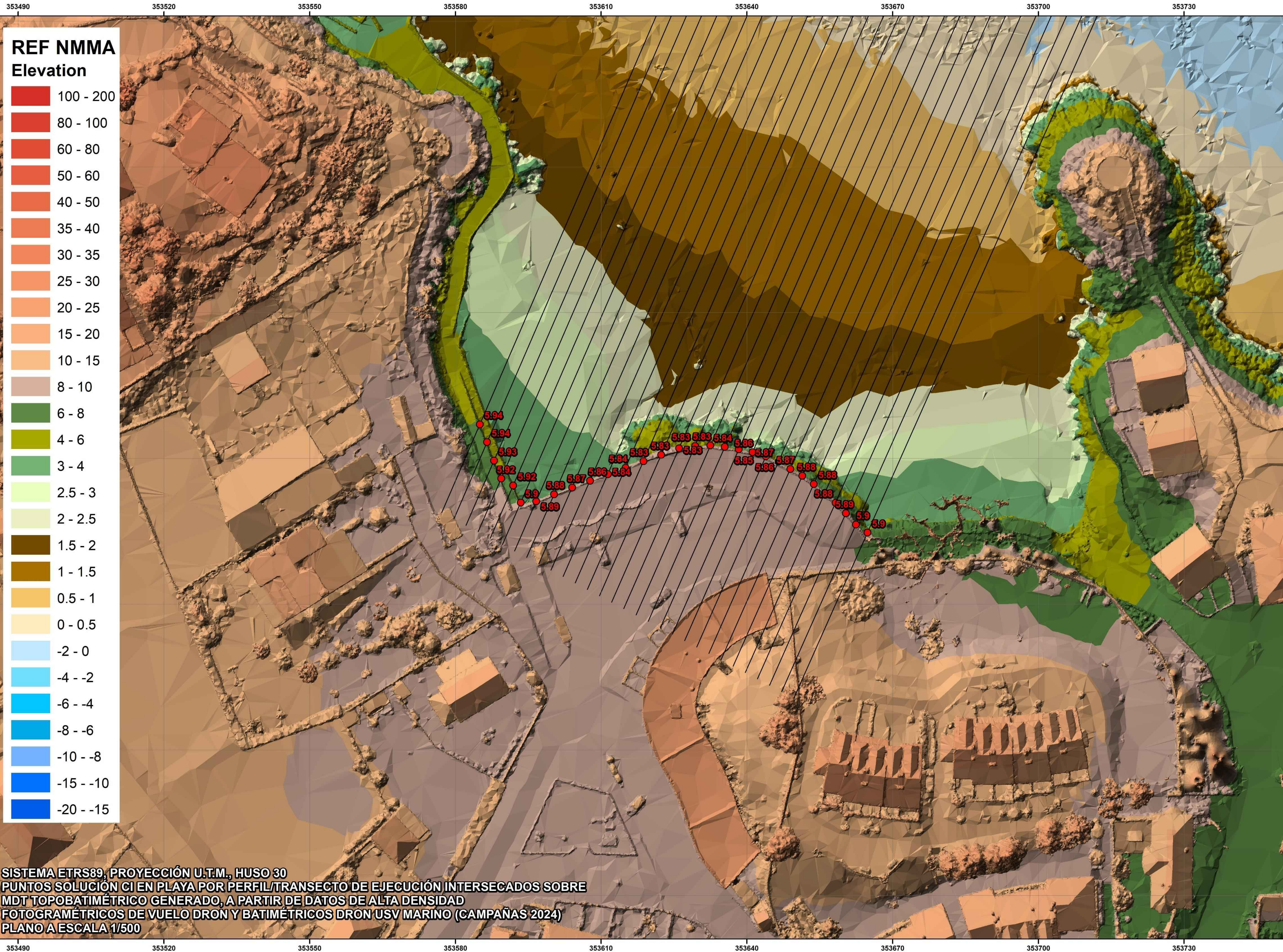


Nº PERFIL	Fecha/Hora UTC	H0 (m.)	Hs (m.)	Tp (seg.)	Nivel Mareal (m. NMMA)	Z_Hs (m. NMMA)	Pendiente	Ir	RunUp (m.)	Alcance (m. NMMA)
16	2018-01-17 16:00:00	7.48	4.65	19.51	1.67	-10.26	0.0219	0.2771	4.16	5.83
17	2018-01-17 16:00:00	7.48	4.66	19.51	1.67	-10.06	0.0218	0.2779	4.16	5.83
18	2018-01-17 16:00:00	7.48	4.66	19.51	1.67	-9.86	0.0219	0.2801	4.17	5.84
19	2018-01-17 16:00:00	7.48	4.69	19.51	1.67	-10.03	0.0221	0.2806	4.18	5.85
20	2018-01-17 16:00:00	7.48	4.71	19.51	1.67	-10.15	0.0222	0.2859	4.19	5.86
21	2018-01-17 16:00:00	7.48	4.72	19.51	1.67	-10.26	0.0223	0.2987	4.19	5.86
22	2018-01-17 16:00:00	7.48	4.74	19.51	1.67	-10.19	0.0223	0.3061	4.20	5.87
23	2018-01-17 16:00:00	7.48	4.75	19.51	1.67	-9.88	0.0223	0.3116	4.20	5.87
24	2018-01-17 16:00:00	7.48	4.75	19.51	1.67	-9.53	0.0222	0.3126	4.21	5.88
25	2018-01-17 16:00:00	7.48	4.75	19.51	1.67	-9.45	0.0220	0.3031	4.21	5.88
26	2018-01-17 16:00:00	7.48	4.76	19.51	1.67	-9.56	0.0218	0.2950	4.21	5.88
27	2018-01-17 16:00:00	7.48	4.77	19.51	1.67	-9.64	0.0220	0.2911	4.21	5.88
28	2018-01-17 16:00:00	7.48	4.78	19.51	1.67	-9.67	0.0221	0.2927	4.22	5.89
29	2018-01-17 16:00:00	7.48	4.80	19.51	1.67	-9.64	0.0225	0.2948	4.23	5.90
30	2018-01-17 16:00:00	7.48	4.81	19.51	1.67	-9.62	0.0227	0.2980	4.23	5.90



En función de los resultados obtenidos del las CI sobre la playa y de la morfología de la misma en la que se encuentra el fondo de playa limitado por la estructura vertical del muro de hormigón, que interseca la playa en cotas altimétricas inferiores a las CI calculadas por perfil, la línea de inundación sobre el fondo de playa obtenida con los criterios establecidos en el R.G.C. de 2014, quedaría definida en su geometría por la propia geometría de dicho muro, al no permitir el avance de la masa de agua actuando como un contorno sobre el que se proyectaría la misma (dado que las CI por perfil superan las cotas altimétricas de la playa en su intersección con el muro vertical) y en consecuencia definiendo la propia geometría del alcance de la inundación de la playa, si bien como se ha argumentado anteriormente, habrá de estimarse con otras formulaciones apropiadas (modelo de Goda) los incrementos de nivel al incidir sobre la estructura vertical del muro de la masa de agua que ha ascendido por la playa alcanzándolo con energía todavía no disipada por completo (el muro impide que alcance su cota final CI calculada).

En los siguientes planos a escala 1/500, sobre el MDT de alta densidad y sobre la ortofotografía de alta resolución generados a partir de los trabajos topográficos y fotogramétricos de enero y marzo de 2024, se refleja la geometría de la línea de inundación por run-up en la pendiente de la playa interrumpida por la estructura vertical que en consecuencia condiciona la geometría del alcance de la misma a su propia geometría.



SISTEMA ETRS89, PROYECCIÓN U.T.M., HUSO 30
PUNTOS SOLUCIÓN CI EN PLAYA POR PERFIL/TRANSECTO DE EJECUCIÓN INTERSECADOS SOBRE
MDT TOPOBATIMÉTRICO GENERADO, A PARTIR DE DATOS DE ALTA DENSIDAD
FOTOGRAMÉTRICOS DE VUELO DRON Y BATIMÉTRICOS DRON USV MARINO (CAMPAÑAS 2024)
PLANO A ESCALA 1/500





4.2. CÁLCULO DEL ASCENSO POR LA ESTRUCTURA VERTICAL DEL OLEAJE INCIDENTE SOBRE EL MURO DEL FONDO DE PLAYA

Utilizando los resultados de CI sobre la playa anteriores calculados en cumplimiento de los criterios del R.G.C. de 2014 (quinto valor de inundación del período determinado entre 2014 y 2018), se ha realizado un análisis de la incidencia del estado de mar responsable de los valores solución de las CI, todos correspondientes al estado de mar de 2018-01-17 a las 16:00 horas U.T.C., para valorar si tras alcanzar el fondo de playa con las CI solución anteriores calculadas, el ascenso de nivel que tiene lugar en la masa de agua del oleaje al incidir sobre el muro vertical del fondo de playa sobre el que se sustenta la zona de estacionamiento de vehículos en su plataforma superior, se produce un incremento hasta la cota superior de coronación en cuyo caso tendría lugar el rebase de la misma y el consecuente alcance de los oleajes en la plataforma de la zona de estacionamiento, o por el contrario el incremento de nivel sobre dicha estructura vertical no alcanza la cota superior de la plataforma superior por perfil/transecto de ejecución, quedándose restringido y limitado su alcance al paramento vertical de la estructura de hormigón, en cuyo caso la geometría y coordenadas del alcance de oleajes describirían por perfil/transecto la propia geometría de dicho muro.

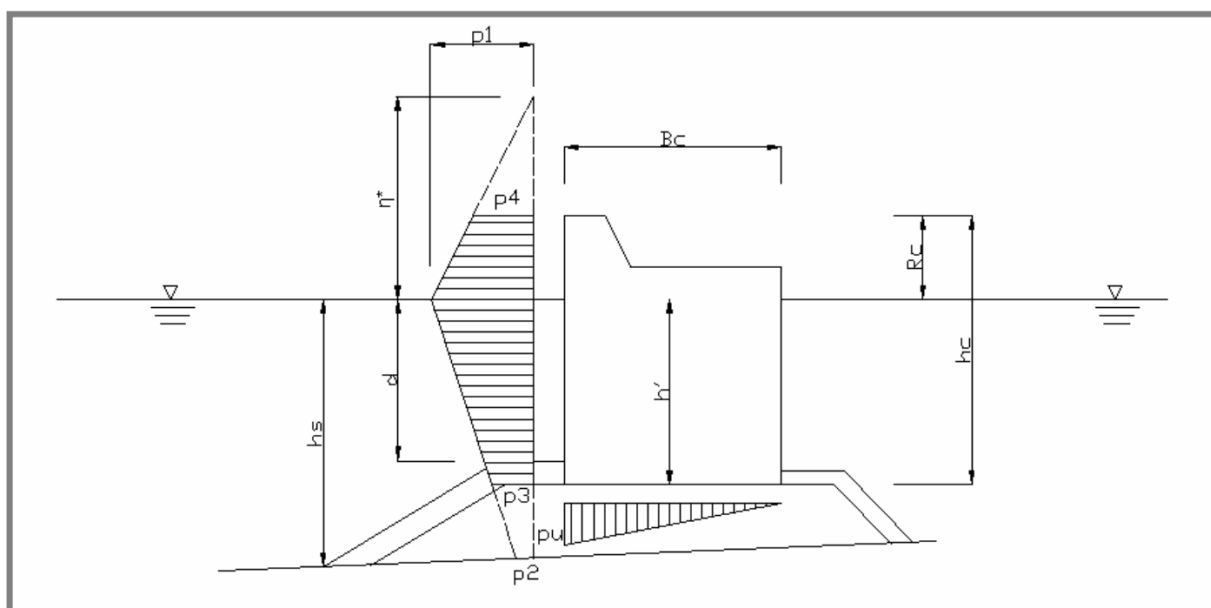
Como las CI solución obtenidas por perfil superan las cotas altimétricas de la playa en su límite con el muro vertical, lo que se traducirá en el alcance e impacto de la masa de agua de los oleajes tras la rotura y ascenso por la pendiente de la playa contra la estructura vertical, resultará por ello necesario aplicar una formulación que estime el incremento de nivel de la masa de agua por el paramento vertical y en su caso el posible rebase de la estructura vertical al incidir el oleaje sobre el paramento de la misma, con una formulación que estime este fenómeno como la del modelo de Goda.

Del citado modelo de Goda (1974), tomaremos la expresión para estimar la elevación sobre el nivel del mar del oleaje al incidir sobre una estructura vertical cuya expresión simplificada es la siguiente:

$$\eta^{*}_{\text{Goda}} = 0,75 \cdot (1 + \cos \beta_i) \cdot H_i$$

Donde η^{*}_{Goda} es la elevación sobre el nivel del mar, H_i es la altura de ola incidente frente a la estructura, y donde β_i es la oblicuidad relativa de ataque del oleaje respecto de la normal de alineación de la estructura.

Las bases del modelo de Goda (Goda, 1985) realmente aluden a una distribución de presiones sobre la cara expuesta de la estructura vertical tal que al ser integradas sobre la cara frontal e inferior resulten las fuerzas de deslizamiento equivalentes, que incluye en su desarrollo y formulaciones la expresión anterior para el cálculo de la sobreelevación al incidir la masa de agua sobre la estructura vertical junto con el cálculo de la distribución de presiones, tomada en su forma simplificada. En el siguiente gráfico se refleja la distribución de presiones sobre la estructura vertical según el modelo de Goda, y el ascenso η sobre el paramento vertical vinculado a las mismas.



Debe indicarse que no debemos tomar las CI calculadas en el apartado anterior en la inundación de la playa a partir de los incrementos calculados de run-up en playa sumado a los incrementos mareales, como valores de altura incidente H_i para el cálculo del ascenso o incremento vertical sobre la estructura con el modelo de Goda, dado que dichas CI se corresponden con la cota alcanzada por el ascenso de la masa de agua sobre la pendiente de la playa, que tiene unos valores determinados (consignados en las tablas del apartado anterior), y por consiguiente no podemos considerar que esos valores de CI son alcanzados sobre un paramento vertical, o dicho de otra forma, no podemos extrapolar la cota de ascenso de la masa de agua por una pendiente promedio en el entorno de $m=0,022$ (pendiente



promedio de las distintas pendientes calculadas sobre el MDT topo-batimétrico de alta densidad) que se alcanzaría si continuara el fondo de playa ilimitadamente como playa infinita (en el entorno del promedio de +5,90 m. NMMA), al nivel que alcanza el oleaje al incidir en el muro. En este sentido, las CI calculadas sobre la playa en el apartado anterior, nos dan la información de que la masa de agua tras rotura y ascenso por run-up sobre la playa podría alcanzar el valor de la cota alimétrica sobre playa infinita sin acotamiento de +5,90 m., pero como la playa está limitada y acotada en su extensión interior en la zona de estudio por una estructura vertical materializada por un muro de hormigón, la masa de agua no completará su ascenso por una pendiente de 0,025 hasta dicha cota alimétrica, produciéndose en su lugar un ascenso η^{*Goda} por la estructura vertical al incidir con energía no disipada sobre la misma (no disipada porque tan solo le es permitido alcanzar la cota alimétrica en el entorno de +3,4 NMMA que es la limitada sobre la playa sobre el muro), debiéndose calcular la misma mediante un modelo como el de Goda.

Por tanto las CI calculadas en el apartado anterior sobre la playa, sí nos sirven para asegurar que en el episodio de temporal caracterizado por el estado de mar de 2018-01-17 a las 16:00 horas U.T.C., el oleaje alcanzará, por los distintos incrementos calculados sobre la morfología de playa caracterizada por el MDT topo-batimétrico, la estructura vertical del muro y además dicho alcance se producirá con una energía todavía no disipada, por lo que se producirá además un ascenso vertical por el muro de valor η^{*Goda} correspondiente al incremento calculado por el criterio de Goda, pero dichas CI no pueden considerarse como las H_i que deben ser tomadas a pie de la estructura vertical como inputs del modelo de Goda, porque en ese punto la masa de agua no ha podido (ha sido impedido por el muro vertical) alcanzar la cota correspondiente a la CI (entorno promedio de +5,90 NMMA) que alcanzaría en una playa infinita de pendiente $m=0,022$.

Sin embargo, sí podemos tomar como alturas de olas incidentes a pie de la estructura vertical para la aplicación del modelo de Goda, las alturas de ola y vectores direccionales propagados en puntos sobre la playa próximos a la estructura vertical, calculados por el simulador computacional del oleaje Oluca SP sobre el MDT topo-batimétrico de alta densidad generado y reflejados en los planos del apartado 3.2.14, a partir de los cuales tendremos los valores de H_i y de β_i , inputs necesarios para el cálculo del incremento vertical η del modelo de Goda, dado que el simulador los ha calculado teniendo en cuenta los distintos fenómenos de interacción del oleaje con el MDT topo-batimétrico y los incrementos mareales del suceso representado por el estado de mar en su simulación hasta el mismo pie de la estructura vertical.

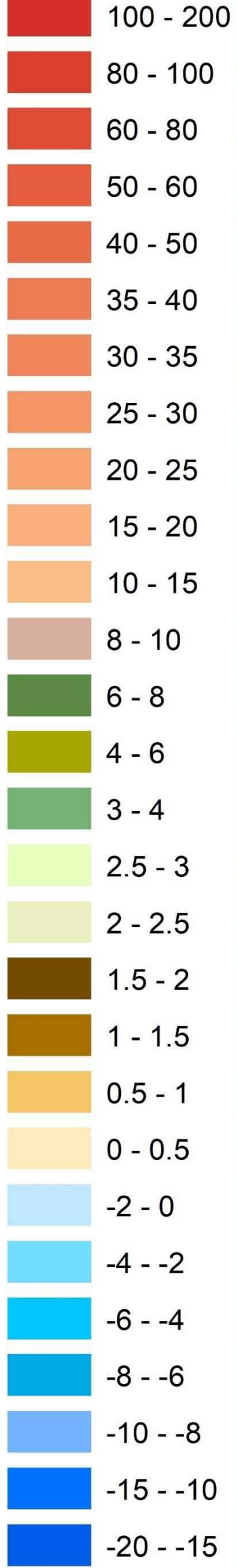


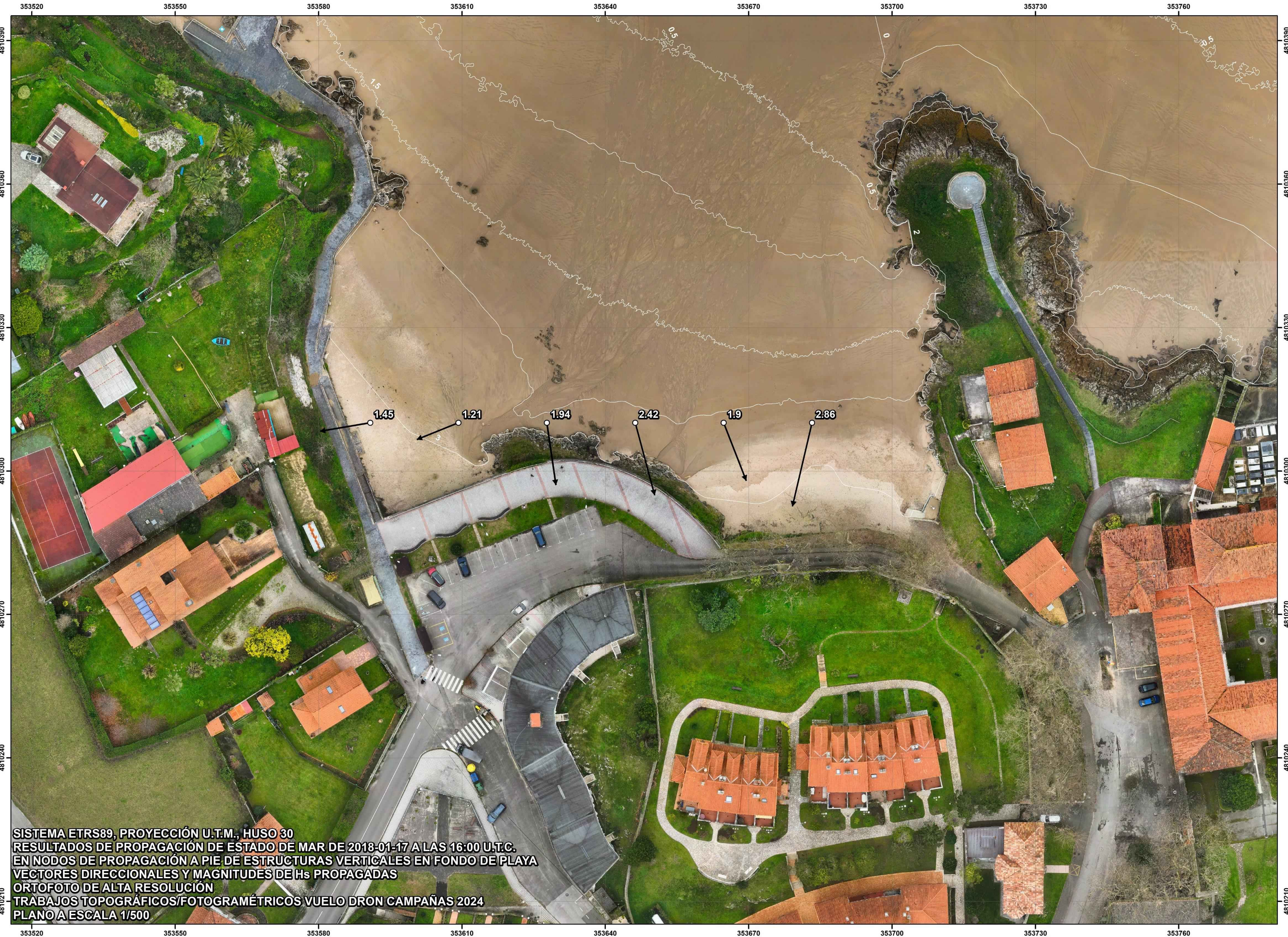
De esta manera, retomaremos las alturas de ola H_i propagadas a pie de la estructura vertical y los ángulos β_i los obtendremos también a partir de los ángulos propagados por el simulador tridimensional MOPLA que proporciona los vectores direccionales del oleaje propagado a pie del muro que se visualizan en los planos con los vectores de propagación en el MDT topo-batimétrico, a partir del estado de mar que ha generado las CI sobre la playa según el criterio reglamentario (R.G.C. 2014), es decir, los vectores de propagación α_i en el MDT topo-batimétrico, permiten obtener los ángulos β_i de dichos vectores respecto a la normal a la estructura vertical (muro del estacionamiento de vehículos sobre la playa) tomada en distintos puntos de su geometría curva.

La simulación del oleaje sobre la playa en las condiciones mareales y con los parámetros del estado de mar de 2018-01-17 sincronizados a las 16:00 hora U.T.C., proporciona los valores de H_s propagada y dirección del oleaje a pie de las estructuras verticales del fondo de playa (obtenidas de los nodos de propagación de la última malla de propagación del citado estado de mar a pie de las estructuras) en la zona de estudio, que se visualizan en los siguientes planos a escala 1/500 sobre el MDT topo-batimétrico de alta densidad y ortofoto de alta resolución generados (datos capturados en campañas de enero y marzo de 2024).

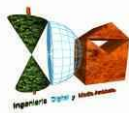
SISTEMA ETRS89, PROYECCIÓN U.T.M., HUSO 30
RESULTADOS DE PROPAGACIÓN DE ESTADO DE MAR DE 2018-01-17 A LAS 16:00 U.T.C.
EN NODOS DE PROPAGACIÓN A PIE DE ESTRUCTURAS VERTICALES EN FONDO DE PLAYA
VECTORES DIRECCIONALES Y MAGNITUDES DE Hs PROPAGADAS
MDT TOPOBATIMÉTRICO GENERADO, A PARTIR DE DATOS DE ALTA DENSIDAD
FOTOGRAMÉTRICOS DE VUELO DRÓN Y BATIMÉTRICOS DRÓN USV MARINO (CAMPAÑAS 2024)
PLANO A ESCALA 1/500

REF NMMA
Elevation





SISTEMA ETRS89, PROYECCIÓN U.T.M., HUSO 30
RESULTADOS DE PROPAGACIÓN DE ESTADO DE MAR DE 2018-01-17 A LAS 16:00 U.T.C.
EN NODOS DE PROPAGACIÓN A PIE DE ESTRUCTURAS VERTICALES EN FONDO DE PLAYA
VECTORES DIRECCIONALES Y MAGNITUDES DE Hs PROPAGADAS
ORTOFOTO DE ALTA RESOLUCIÓN
TRABAJOS TOPOGRÁFICOS/FOTOGRAMÉTRICOS VUELO DRON CAMPAÑAS 2024
PLANO A ESCALA 1/500



Tenemos a pie de la estructura vertical de estudio correspondiente al muro vertical de hormigón en el fondo de la playa de Palombina que sustenta la zona de estacionamiento de vehículos en su plataforma superior, datos de altura de ola y vectores direccionales que inciden sobre dicha estructura de $H_{i1}=1,94$ m. y de $H_{i2}=2,42$ m. (en dos nodos/puntos de cálculo que notaremos respectivamente como 1 y 2), incidiendo H_{i1} con una dirección que se puede considerar perpendicular a la geometría de la estructura y por tanto $\beta_{i1}=0^\circ$, e incidiendo H_{i2} con un ángulo de 45° respecto a la perpendicular a la geometría de la estructura por lo que $\beta_{i2}=45^\circ$.

Por tanto, volviendo a la ecuación del modelo de Goda para la obtención de la elevación sobre el nivel del mar $\eta *_{Goda}$ a consecuencia de la incidencia de la masa marina sobre la estructura vertical (muro), se tendrá que:

$\eta 1 *_{Goda} = 0,75*(1+\cos 0^\circ)*1,94 = 2,91$ m. de ascenso sobre el nivel del mar en ese momento por la energía del oleaje que alcanza la estructura en el punto de cálculo 1, todavía no disipada en la rotura y en el run-up sobre la playa. Del mismo modo:

$\eta 2 *_{Goda} = 0,75*(1+\cos 45^\circ)*2,42 = 3,09$ m. de ascenso sobre el nivel del mar en ese momento por la energía del oleaje que alcanza la estructura en el punto de cálculo 2, todavía no disipada en la rotura y en el run-up sobre la playa

Por tanto las cotas altimétricas finales Δ_{T1} y Δ_{T2} alcanzadas en los dos puntos de cálculo (determinados por los dos nodos de propagación a pie de la estructura vertical) serán:

Nivel total 1 (en suceso de oleaje, alcanzado sobre el muro vertical) en punto de cálculo 1= Δ_{T1}

Δ_{T1} = cota a pie de talud vertical (entre nodo de propagación 1 y muro vertical) + $\eta 1 *_{Goda}$

Se

$\Delta_{T1}= 3,15 + 2,91= \mathbf{6,06 \text{ m. sobre N.M.M.A.}}$

Nivel total 2 (en suceso de oleaje, alcanzado sobre el muro vertical) en punto de cálculo 2= Δ_{T2}

Δ_{T2} = cota a pie de talud vertical (entre nodo de propagación 2 y muro vertical) + $\eta 2 *_{Goda}$

$\Delta_{T2}= 3,32 + 3,09= \mathbf{6,41 \text{ m. sobre N.M.M.A.}}$



Las cotas de la plataforma superior correspondientes a un paseo con barandilla junto a la zona de estacionamiento de vehículos correspondiente a la franja más exterior sobre el muro en talud vertical sobre el fondo de playa, se sitúan en valores de +8,7 m. NMMA en función del MDT de alta densidad, circunstancia por la que no se producirá rebase en el episodio temporal caracterizado por el estado de mar de 2018-01-17 a las 16:00 hora U.T.C., responsable del 5º máximo nivel de inundación en la playa en el período de estudio determinado entre los años 2014 y 2018, y por tanto según los criterios del R.G.C. de 2014, quedando las cotas de máximo alcance del oleaje sobre el muro vertical del fondo de playa sobre el que se asienta en su plataforma superior la zona de estacionamiento de vehículos (con franja de paseo entre los estacionamientos y el paramento vertical del muro de hormigón), por lo que la geometría de la línea solución de máximos alcances de oleaje que cumple con los criterios establecidos en la legislación y Reglamento vigentes de Costas, queda definida por el límite exterior del citado muro.

En consecuencia, los resultados finales de la línea de inundación en el tramo de costa correspondiente a la zona analizada de la playa de Palombina, en la ensenada de Celorio, en el T.M. de Llanes, Asturias, han sido obtenidos en cumplimiento de lo establecido en la Ley 2/2013, de 29 de mayo, de Protección y Uso Sostenible del Litoral y de Modificación de la Ley 22/1988, de 28 de julio, de Costas y con el artículo 4 a del Reglamento General de Costas (Real Decreto 876/2014), con la base metodológica y teórica desarrollada anteriormente, con las formulaciones descritas, con los paquetes y herramientas informáticas de SMC versión 2.5 desarrolladas por el GIOC de la Universidad de Cantabria y el anterior Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente para la simulación de la propagación del oleaje mediante modelos numéricos computacionales (MOPLA, Oluca-SP espectral), así como con modelos hidráulicos y de ingeniería de costas (Nielsen-Hanslow, IH Cantabria, modelo de Goda del oleaje sobre estructuras verticales), en combinación con aplicaciones informáticas que operan en plataforma GIS sobre el MDT topobatimétrico, aplicando los modelos descritos tanto para morfología de playas como para los incrementos de niveles al incidir el oleaje sobre estructuras verticales, proporcionando la línea de inundación solución, que en el presente estudio con su morfología particular combinada de playa limitada por estructura antrópica en paramento vertical de muro de hormigón, ha quedado definida por la geometría del límite exterior del citado muro, dado que no se produce el rebase del mismo, tal y como se ha comprobado mediante los cálculos desarrollados.



5. PLANOS DE LOS RESULTADOS

Se adjuntan los planos con los resultados finales del estudio a escala 1/500, en coordenadas del sistema ETRS89, elipsoide GRS80, Proyección U.T.M., Huso 30, referencia altimétrica al N.M.M.A., en los que se refleja la línea solución obtenida tras la aplicación de la metodología desarrollada basada en la aplicación en primera instancia de un modelo de inundación en la playa, y una vez comprobados los alcances hasta la estructura vertical sobre la que se asienta la zona de estacionamiento de vehículos y franja limítrofe de paseo sobre su plataforma superior, de la masa de agua tras la rotura por el fenómeno de run-up o ascenso por la pendiente de la playa, según los criterios técnicos establecidos en la vigente legislación de Costas, para, con posterioridad, aplicar el modelo de Goda de incrementos de nivel y distribución de presiones al incidir el oleaje sobre una estructura vertical, mediante el cual se ha comprobado que no se produce rebase sobre la estructura vertical del muro de hormigón alcanzando la plataforma superior, quedando de esta forma confinada la masa de agua a la geometría que describe dicho paramento vertical.

La línea solución de máxima inundación así obtenida, en cumplimiento de los criterios reglamentarios, se ha representado sobre el MDT de alta densidad y ortofotografía de alta resolución, ambos generados a partir de los datos topográficos, fotogramétricos y batimétricos capturados en campañas de campo de enero y marzo de 2024.

MADRID, ABRIL DE 2024, LA EMPRESA CONSULTORA

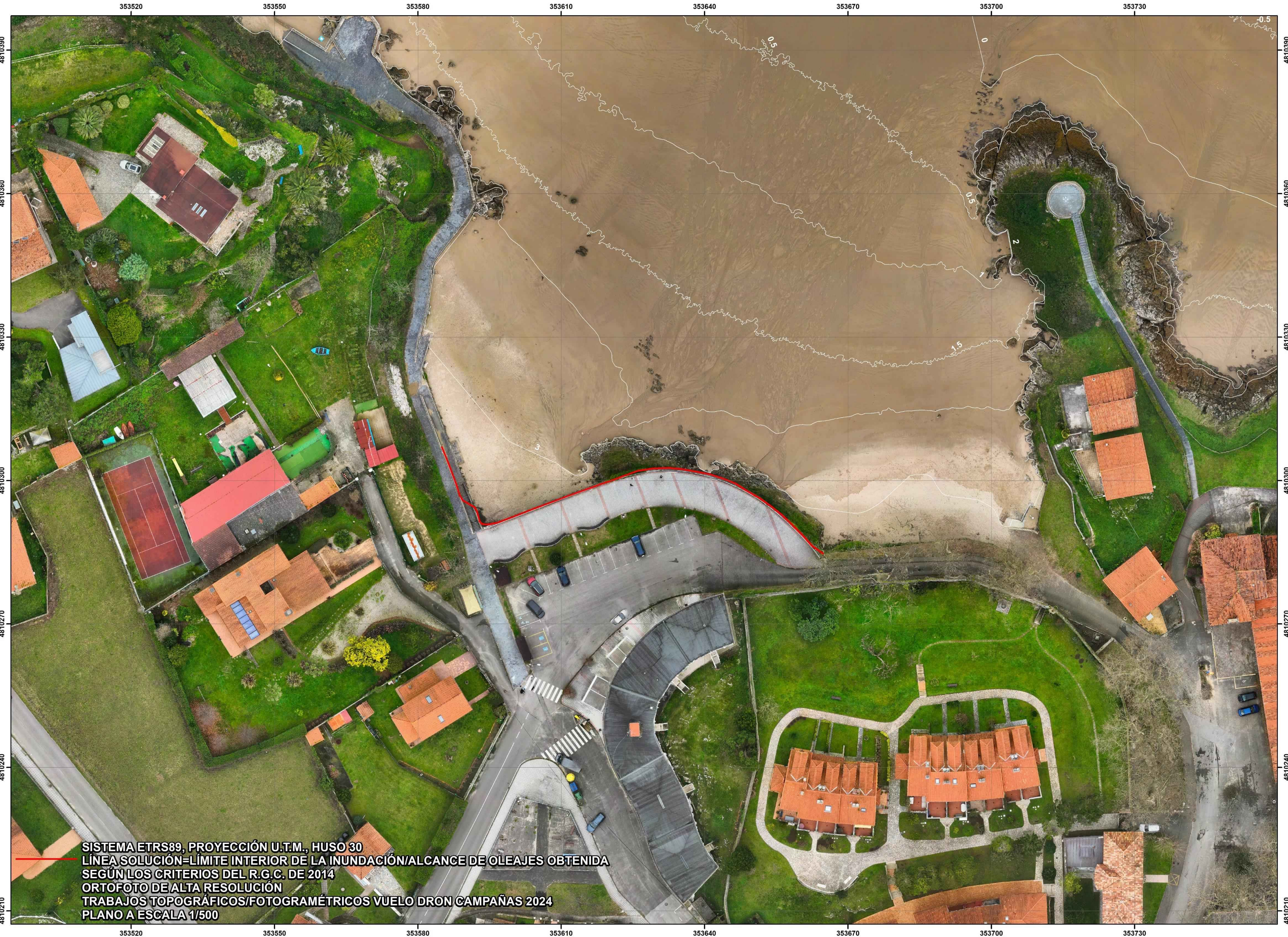
IDYMA
INGENIERIA DIGITAL Y
MEDIO AMBIENTE S.L.
CIF: B83278283

INGENIERÍA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)



REF NMMA	
Elevation	
	100 - 200
	80 - 100
	60 - 80
	50 - 60
	40 - 50
	35 - 40
	30 - 35
	25 - 30
	20 - 25
	15 - 20
	10 - 15
	8 - 10
	6 - 8
	4 - 6
	3 - 4
	2.5 - 3
	2 - 2.5
	1.5 - 2
	1 - 1.5
	0.5 - 1
	0 - 0.5
	-2 - 0
	-4 - -2
	-6 - -4
	-8 - -6
	-10 - -8
	-15 - -10
	-20 - -15

SISTEMA ETRS89, PROYECCIÓN U.T.M., HUSO 30
LÍNEA SOLUCIÓN=LÍMITE INTERIOR DE LA INUNDACIÓN/ALCANCE DE OLEAJES OBTENIDA
SEGÚN LOS CRITERIOS DEL R.G.C. DE 2014
MDT TOPOBATIMÉTRICO GENERADO, A PARTIR DE DATOS DE ALTA DENSIDAD
FOTOGRAMÉTRICOS DE VUELO DRÓN Y BATIMÉTRICOS DRÓN USV MARINO (CAMPAÑAS 2024)
PLANO A ESCALA 1/500



SISTEMA ETRS89, PROYECCIÓN U.T.M., HUSO 30
LÍNEA SOLUCIÓN=LÍMITE INTERIOR DE LA INUNDACIÓN/ALCANCE DE OLEAJES OBTENIDA
SEGÚN LOS CRITERIOS DEL R.G.C. DE 2014
ORTOFOTO DE ALTA RESOLUCIÓN
TRABAJOS TOPOGRÁFICOS/FOTOGRAMÉTRICOS VUELO DRON CAMPAÑAS 2024
PLANO A ESCALA 1/500