

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:

ESTIMACIÓN DEL ALCANCE DE OLEAJES EN LA EXPLANADA AL TRASDÓS DEL DIQUE OESTE DE PUERTO DE VEGA, EN EL T.M. DE NAVIA, ASTURIAS, SEGÚN LOS NUEVOS CRITERIOS ESTABLECIDOS POR EL REAL DECRETO 668/2022, DE 1 DE AGOSTO, POR EL QUE SE MODIFICA EL REGLAMENTO GENERAL DE COSTAS, APROBADO POR REAL DECRETO 876/2014, DE 10 DE OCTUBRE

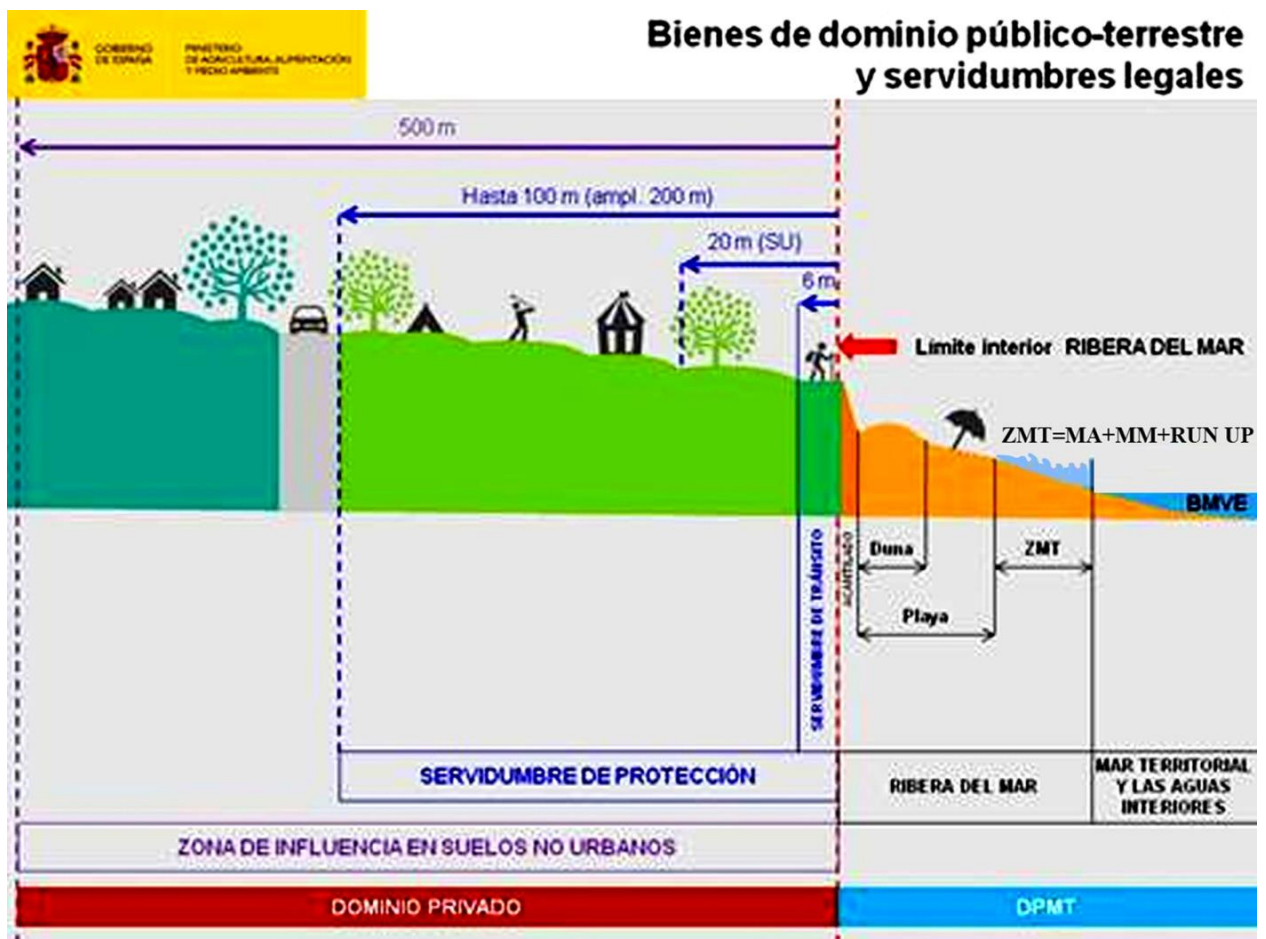


INDICE

1.	INTRODUCCIÓN: ZONA DE ESTUDIO Y ASPECTOS GENERALES DE LA METODOLOGÍA APLICADA	Pag. 1
2.	ANÁLISIS DE LOS DATOS DE LOS PUNTOS DE MEDICIÓN DE PUERTOS DEL ESTADO	Pag. 9
	2.1. ANÁLISIS DE DATOS DEL OLEAJE Y CLIMA MARÍTIMO	Pag. 9
	2.2. ANÁLISIS DE LOS MÁXIMOS NIVELES DEL MAR EN EL PERÍODO 1995-2023 (MÁXIMO PERÍODO DISPONIBLE DE NIVELES MAREALES)	Pag 24
3.	PROPAGACIÓN DEL OLEAJE	Pag 30
	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 30
	3.2. SEGUNDA FASE: DESDE PROFUNDIDADES INDEFINIDAS HASTA PIE DE COSTA	Pag 31
4.	CÁLCULOS DE RUN-UP Y REBASES DEL OLEAJE	Pag. 87
5.	VOLÚMENES DE REBASE DEL TEMPORAL QUE CUMPLE CON EL CRITERIO REGLAMENTARIO	Pag 96
6.	CALIBRACIÓN DE LA RELACIÓN VOLUMEN DE REBASE – SUPERFICIE DE INUNDACIÓN A PARTIR DEL TEMPORAL DE 10-03-2008	Pag 99
7.	SUPERFICIE DE INUNDACIÓN SEGÚN EL ESTADO DE MAR DE 03-03-2014 17:00 UTC, DE MÁXIMO POTENCIAL DE ALCANCE DE OLEAJES DEL PERÍODO ANALIZADO 1995-2023 (MÁXIMO PERÍODO DE DATOS SINCRONIZABLES DE OLEAJES Y MAREAS)	Pag 116
8.	BIBLIOGRAFIA	Pag 118

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 nuevos criterios establecidos en los artículos 4.1.a y 4.1.b del Reglamento General de Costas RD 876/2014 modificado por el Real Decreto 668/2022, de 1 de agosto, en la explanada al trasdós del dique oeste de Puerto de Vega, en el T.M. de Navia, Asturias, estimándose para ello la superficie de terrenos afectada por los rebases.





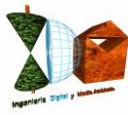
INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)

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



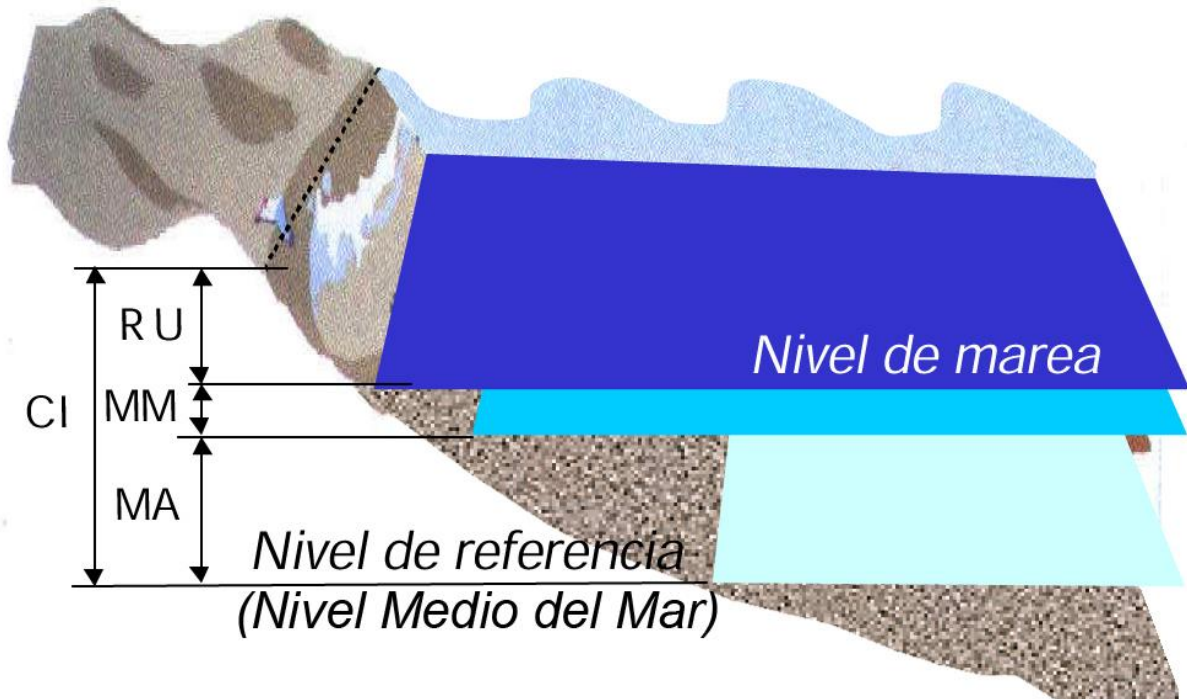


La determinación del nivel de alcance de oleajes en las distintas tipologías comunes de los frentes de costa por acción de la dinámica marina y meteorológica, resulta un procedimiento complejo, tanto por el gran número de elementos que intervienen en el proceso de inundación, como por la interacción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

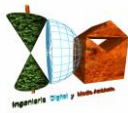
Sobre la base de los textos legales, Ley de Costas de 22/1988, de 28 de julio, modificada por la Ley 2/2013, de 29 de mayo, de protección y uso sostenible del litoral y de modificación de la Ley 22/1988, de 28 de julio, de Costas y del Reglamento General de Costas (Real Decreto 876/2014), modificado por el Real Decreto 668/2022, de 1 de agosto, 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 el tramo de costa del Puerto de Vega, T.M. de Navia, 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



- En el presente caso además, al tratarse de una zona de estudio que se encuentra en un tramo de costa con estructuras portuarias, en la que las formulaciones de run-up corresponden a los modelos de remonte sobre estructuras (dique en talud y escollera) que no incluyen en la cota calculada el set-up o sobreelevación del nivel medio del mar en la zona de rompientes, se deberá adicionar al nivel mareal y al run-up, el set-up correspondiente al estado de mar de cálculo, para la obtención la máxima elevación alcanzada por el oleaje, y en su caso los rebases de oleajes.



- Los alcances de los oleajes, se evaluarán a partir de los datos procedentes de medidas proporcionados por los instrumentos de medición de Puertos del Estado, de los mareógrafos pertenecientes a la Red REDMAR, de las boyas de la Red REDEXT o en su defecto de las más cercanas según la disposición de los instrumentos de medición de Puertos del Estado, así como de los datos de los Puntos Simar cuando se consideren más adecuados por lejanía de instrumentos de medición.
- 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 modificado por el Real Decreto 668/2022, de 1 de agosto, la determinación del límite interior de la zona marítimo terrestre, deberá realizarse conforme a los siguientes criterios técnicos especificados en la nueva redacción del artículo 4:
*“Artículo 4. Criterios técnicos para la determinación de la zona marítimo-terrestre y de la playa.
En la determinación de la zona marítimo-terrestre y de la playa, con arreglo a las definiciones contenidas en el artículo anterior, se tendrán en cuenta los siguientes criterios:
a) 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 desde que existan registros de boyas o satélites, o datos oceanográficos o meteorológicos. Para calcular el alcance de un temporal se utilizarán las máximas olas registradas o calculadas con esos datos.
b) Las variaciones del nivel del mar debidas a las mareas incluirán los efectos de las astronómicas y de las meteorológicas. No se tendrán en cuenta las ondas de mayor periodo de origen sísmico o de resonancia cuya presentación no se produzca de forma secuencial.”*
- Las anteriores determinaciones se realizarán a partir de los datos de oleajes de las boyas de la Red REDEXT y puntos Simar de mayor proximidad a la zona de estudio en Puerto de Vega, en el T.M. de Navia. Para la determinación del

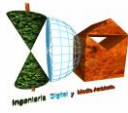


máximo nivel del mar (cota de máximo alcance) según los anteriores criterios reglamentarios, se realizarán los cálculos y estimaciones de run-up a partir del temporal de cálculo resultante con base en los mismos, a los que se sumarán los niveles mareales reales registrados por los mareógrafos de la Red REDMAR en dicho período, así como la sobreelevación media en zona de rompientes o set-up.

- La propagación del oleaje medido hasta pie de frente de costa se realizará en una única fase desde profundidades indefinidas, a partir de datos de boyas de la REDEXT o de Puntos Simar: 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, 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 espectral 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 del Puerto de Vega, en el Término Municipal de Navia, se tomarán los datos del Punto Simar 3068038, dada su ubicación respecto de la zona de estudio teniendo en cuenta las direcciones de procedencia de principal afectación entre los registros de los estados de mar seleccionados en el sector direccional 330°-340°, y la lejanía en este caso de las boyas de Puertos del estado.
 - 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 Lidar de alta densidad Lidar (0.5-1 punto cada m²) en la parte emergida, y a partir de la batimetría de equidistancia 0.5 m. de isobatas en el interior del Puerto de Vega y zona exterior próxima, proporcionada por la Demarcación de Costas en Asturias (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico), completada hacia profundidades indefinidas con batimetría de la serie SonarChart del proveedor Navionics, a partir de la cual el software de modelado realizará 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 costa y zona de rompientes, necesarios para los cálculos posteriores a las propagaciones basados en formulaciones semiempíricas de run-up.
 - Posteriormente, se obtendrán con modelos de ingeniería costera de autores contrastados, los volúmenes de rebase del oleaje sobre el dique oeste y escollera de protección en la zona de la explanada de Puerto de Vega, al objeto de la posterior justificación de las superficies de inundación en un rebase medio, estimado durante el espacio de tiempo correspondiente al período



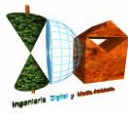
INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)

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

medio del estado de mar considerado, es decir, el rebase de un frente de ola en el período medio del oleaje, dado que no se ha considerado acumulación en la explanada, al poder evacuarse el agua por el trasdós del propio dique.



2. ANÁLISIS DE LOS DATOS DE LOS PUNTOS DE MEDICIÓN DE PUERTOS DEL ESTADO

Con el objetivo de cumplir con los nuevos preceptos legales establecidos en el nuevo Reglamento General de Costas modificado por el Real Decreto 668/2022, de 1 de agosto en relación a la definición del alcance de los mayores temporales conocidos en el frente de costa del Puerto de Vega, en el Término Municipal de Navia, Asturias, establecidos en su artículo 4 en cuanto a los criterios técnicos para la determinación de la zona marítimo-terrestre:

“Tres. El artículo 4 queda redactado como sigue:

«Artículo 4. Criterios técnicos para la determinación de la zona marítimo-terrestre y de la playa.

En la determinación de la zona marítimo-terrestre y de la playa, con arreglo a las definiciones contenidas en el artículo anterior, se tendrán en cuenta los siguientes criterios:

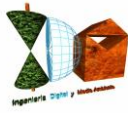
a) Para fijar el límite hasta donde alcanzan las olas en los mayores temporales conocidos, se considerarán las variaciones del nivel del mar debidas a las mareas y el oleaje desde que existan registros de boyas o satélites, o datos oceanográficos o meteorológicos. Para calcular el alcance de un temporal se utilizarán las máximas olas registradas o calculadas con esos datos.

b) Las variaciones del nivel del mar debidas a las mareas incluirán los efectos de las astronómicas y de las meteorológicas. No se tendrán en cuenta las ondas de mayor periodo de origen sísmico o de resonancia cuya presentación no se produzca de forma secuencial.”

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 de Gijón 3108 situado en el Puerto de Gijón de la Red REDMAR, así como de datos del Punto Simar 3068038, ambos de Puertos del Estado, para la obtención del máximo temporal según los preceptos reglamentarios, que será objeto de propagación y cálculo del alcance de oleajes.

2.1. ANÁLISIS DE DATOS DEL OLEAJE Y CLIMA MARÍTIMO

Dada las largas distancias de la Boya más próxima de la red de Puertos del Estado a la zona de estudio, la de Cabo de Peñas 2242 a 42,8 km., por las notables desviaciones tanto longitudinales como latitudinales, se han tomado los datos del Punto Simar 3068038 situado a 2,3 km. de distancia del tramo y posicionamiento noroeste en relación al tramo, con lo cual cuenta con una ubicación idónea para valorar los oleajes de procedencia del sector direccional



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

en el entorno de NNO, que incidirán sobre el frente de costa del tramo de estudio de Puerto de Vega, como fuentes de los parámetros de los estados de mar que se estudiarán.



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



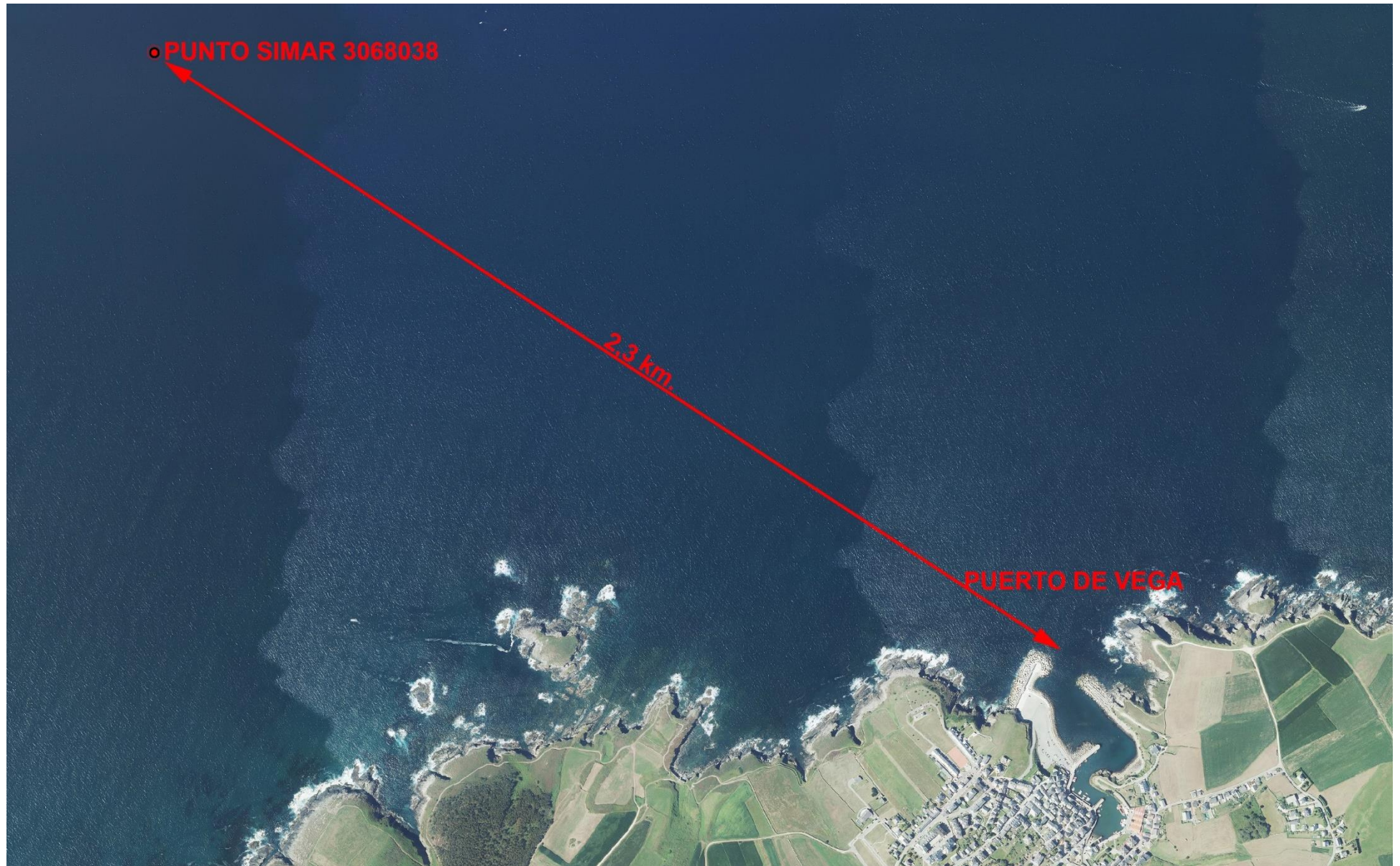


INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)

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





Los datos de identificación del Punto Simar son los siguientes:

Punto Simar 3068038	
Longitud	6.67° O
Latitud	43.58° N
Coordenadas U.T.M., ETRS89, H31	X=688121, Y= 4827864
Código modelo	3068038
Cadencia	60 min
Malla	AIB
Conjunto de datos	PUNTO SIMAR

En función de la orientación del frente de costa de estudio de Puerto de Vega y fundamentalmente de su dique oeste, y de la batimetría en la zona de propagación, se debe realizar un análisis de las direcciones de procedencia del oleaje que incidirán en el punto de estudio, y en función de las mismas proceder al análisis de los datos de parámetros de temporales considerando los sectores direccionales con mayor incidencia en los mismos, del máximo período de estudio posible, a cuyo efecto se ha recabado de Puertos del Estado los ficheros de bases de datos con los estados de mar desde el 29 de junio de 1995 hasta la actualidad a marzo de 2023, con un estudio sobre un total de 243.281 estados de mar caracterizados por sus parámetros de oleaje, al objeto de un análisis previo antes de propagación para la determinación del 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 obtener el responsable del máximo alcance de los oleajes de dicho período de estudio, en cumplimiento de los nuevos criterios del Reglamento General de Costas.

La extensión temporal de este período histórico de análisis de datos históricos de estados de mar horarios, ha sido determinada por la disponibilidad de datos de los incrementos mareales, que es función del inicio de medidas del mareógrafo del Puerto de Gijón, que en este caso se correspondió con el día 29 de junio de 1995, por lo que es desde esta fecha desde cuando es posible sincronizar datos horarios de las bases de datos de Puertos del Estado, de estados de mar de oleajes, con sus correspondientes incrementos mareales.



La selección previa de temporales se ha llevado a cabo mediante el criterio de máximo alcance de los resultados de run-up + mareas + set-up (antes de propagación) de forma previa, simplemente para evaluar la efectividad de la combinación de los parámetros del oleaje con su respectivo estado mareal, sincronizando cada estado de mar con su registro de nivel de mar correspondiente (apartado 2.2) mediante iteraciones de run-up con el modelo de Ahrens para el run-up y de set-up de Longuet-Higgins, al objeto de considerar el estado de mar que por sus magnitudes de inundación estimadas antes de propagación sobre los 243.281 estados de mar, pudieran ser responsable del máximo alcances de inundación, que se obtendrá de forma detallada y específica tras realizar las propagaciones del mismo.

Para dichas iteraciones previas para calibrar los parámetros de los temporales en cuanto a su potencial de inundación, se ha aplicado el modelo de Ahrens y Titus (1985) en diques en talud para superficies lisas (dado que los resultados son solo para determinar el orden de los temporales en cuanto a su magnitud antes de propagación), tiene una estructura algo más complicada que otras formulaciones de este tipo, siendo su expresión matemática válida para roturas de tipo oscilación, colapso y voluta, en función de los parámetros de los estados de mar seleccionados y de la morfología y pendientes de las superficies de incidencia del talud del dique, siendo el run-up es proporcional a la altura de ola incidente, con una constante de proporcionalidad que varía según el tipo de rotura de que se trate: en roturas tipo voluta toma valores proporcionales al número de Iribarren; en las de tipo oscilación, es una función de diversos parámetros de la onda, desarrollándose mediante las siguientes expresiones matemáticas:

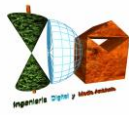
$$R_u = C \cdot H_i ;$$

R_u = run-up sobre la morfología acantilada

H_i = altura de ola incidente en superficie emergida (propagada a pie de frente de costa)

C = parámetro que se calcula mediante una serie de expresiones que dependen del número de Iribarren (Ahrens, 1985)

$$I_{r_{op}} = \frac{\tan \theta}{\sqrt{\frac{H_i}{L_0}}}$$



Si $I_{rop} \leq 2$; $C = C_p = 1,002 \cdot I_{rop}$

Si $2 < I_{rop} < 3,5$; $C = \left(\frac{3,5 - I_{rop}}{1,5}\right) \cdot C_p + \left(\frac{3,5 - I_{rop}}{1,5}\right) \cdot C_{\pi b}$

Si $I_{rop} \geq 3,5 \Rightarrow$ Ahrens y Burke (ACES),

$$\Rightarrow C_{\pi b} = 1,087 \sqrt{\frac{\pi}{2 \tan \theta}} + 0,775 \cdot D ;$$

Siendo:

$$D = \frac{\frac{H_i}{L}}{(\tanh)^3\left(\frac{2\pi h}{L}\right)}$$

L_0 =longitud de onda en aguas profundas

L =longitud de onda a pie de talud

h = profundidad a pie de morfología emergida dada por el punto de ola propagada a pie de frente de costa, teniendo en cuenta la marea $Tr=50 + \text{set-up}$.

θ = ángulo de la pendiente del talud del dique (manto)

Este modelo está respaldado por amplias series de ensayos de laboratorio y verificadas en multitud de estructuras reales.

El modelo para la estimación del set-up del estado de mar viene dado por la formulación de Longuet-Higgins y Stewart (1963-1964), que determina que el flujo de momento de las olas, es el responsable del fenómeno del set-up, habiéndose verificado por ensayos de campo y detallados ensayos de laboratorio, llegándose a la ecuación para la obtención del mismo mediante la siguiente expresión:

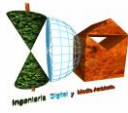
$$\text{Set up max} = \eta_{\max} = 0,15 \cdot h_b - \frac{g^{1/2}(H_0)^2 T}{64 \cdot \pi \cdot h_b}$$

η_{\max} =set-up por oleaje en nivel de rompientes

h_b =profundidad de rotura

T =período de la ola

H_0 =altura de ola en profundidades indefinidas



Dicho proceso de selección se ha realizado mediante una primera fase de tratamiento de las bases de datos con filtros de selección compuestos (teniendo en cuenta tres parámetros), y en una segunda fase en combinación con iteraciones previas de inundación para estimar las combinaciones paramétricas del oleaje ($H_s-T_p-\alpha$) que tendrán mayores efectos de inundación en el tramo de estudio, realizadas con las formulaciones semiempíricas de los modelos de los citados autores.

Las tablas adjuntas incluyen los distintos parámetros de caracterización del oleaje y su valoración previa con los modelos de Ahrens con estimación de la potencia de inundación antes de propagación del oleaje con base en el mareógrafo de Gijón para la zona de estudio. 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, para la determinación del temporal/temporales y estados de mar que pueden generar los mayores niveles de inundación y alcance de oleajes en el tramo de estudio, según sus valores antes de propagación, en el período de registros horarios analizado de 1995 a 2023 antes de efectuar las propagaciones.

Realizados los procesos e iteraciones anteriores, los 100 estados de mar seleccionados tras el análisis de las series de datos de 243.281 estados de mar del Punto Simar 3068038 de Puertos del Estado del período comprendido entre 1995-2023 con mayor potencial de alcance, determinan un sector direccional con principal afectación al tramo de estudio en el entorno de la dirección de procedencia ONO-NNO, que se tomarán como presuntos responsables de los máximos alcances de oleajes en el período de 28 años, los cuales tienen los siguientes parámetros:



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

100 ESTADOS DE MAR CON MAYOR ALCANCE DE OLEAJE SEGÚN ESTIMACIONES PREVIAS ANTES DE PROPAGACIONES (CON PARÁMETROS DEL DIQUE SUPUESTOS SÓLO A EFECTOS DE ESTAS ESTIMACIONES PREVIAS), SOBRE LOS REGISTROS HORARIOS ENTRE 1995-2023

FECHA/HORA	INCREM. MAREAL (m.)	DIR (°sex.)	H0 (m.)	Tp (seg.)	L0 (m.)	Ir	db (m.)	Ls ROTURA (m.)	PROF. ESTIMACIÓN PIE DIQUE (m. NMMA)	PTE. PROMEDIO PARA EXTIMACIÓN	ALCANCE OLEAJES Ahrens
2014-03-03 17:00:00	2.488	335	8.39	18.55	536.70	2.5114	14.68	196.44	12	0.31448	25.29
2014-03-03 16:00:00	2.272	334	8.38	18.64	541.92	2.5251	14.68	197.44	12	0.31448	25.18
2014-03-03 18:00:00	2.215	335	8.34	18.48	532.66	2.5094	14.58	195.67	12	0.31448	24.84
2014-03-03 15:00:00	1.607	334	8.35	18.73	547.17	2.5418	14.66	198.44	12	0.31448	24.59
2014-03-03 19:00:00	1.498	335	8.19	18.42	529.21	2.5241	14.35	195.00	12	0.31448	23.79
2018-01-17 16:00:00	1.67	332	7.44	19.51	593.69	2.8049	13.50	207.09	12	0.31448	23.69
2018-01-17 15:00:00	1.531	332	7.44	19.51	593.69	2.8049	13.50	207.09	12	0.31448	23.55
2014-03-03 14:00:00	0.643	333	8.16	18.86	554.79	2.5891	14.42	199.88	12	0.31448	23.46
2018-01-17 17:00:00	1.466	332	7.4	19.51	593.69	2.8125	13.44	207.09	12	0.31448	23.38
2010-11-09 06:00:00	2.354	338	7.49	18.15	513.81	2.6007	13.25	192.00	12	0.31448	23.09
2010-11-09 05:00:00	2.57	338	7.36	18.12	512.11	2.6192	13.06	191.67	12	0.31448	23.02
2020-12-28 15:00:00	1.887	330	8.03	17.74	490.86	2.4550	13.94	187.44	12	0.31448	23.02
2018-01-17 14:00:00	1.082	332	7.4	19.51	593.69	2.8125	13.44	207.09	12	0.31448	23.00
2020-12-28 14:00:00	1.891	330	8.01	17.74	490.86	2.4580	13.91	187.44	12	0.31448	23.00
2020-12-28 13:00:00	1.59	330	8.07	17.74	490.86	2.4489	14.00	187.44	12	0.31448	22.78
2020-12-28 16:00:00	1.587	330	8.03	17.74	490.86	2.4550	13.94	187.44	12	0.31448	22.72
2018-01-17 18:00:00	0.939	332	7.32	19.51	593.69	2.8278	13.32	207.09	12	0.31448	22.66
2010-11-09 07:00:00	1.775	338	7.54	18.12	512.11	2.5878	13.32	191.67	12	0.31448	22.57
2010-11-09 04:00:00	2.38	338	7.23	18.1	510.98	2.6397	12.86	191.45	12	0.31448	22.56
2007-12-09 16:00:00	1.657	338	7.36	18.47	532.08	2.6698	13.14	195.55	12	0.31448	22.48


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	INCREM. MAREAL (m.)	DIR (°sex.)	H0 (m.)	Tp (seg.)	L0 (m.)	Ir	db (m.)	Ls ROTURA (m.)	PROF. ESTIMACIÓN PIE DIQUE (m. NMMA)	PTE. PROMEDIO PARA EXTIMACIÓN	ALCANCE OLEAJES Ahrens
2007-12-09 17:00:00	1.226	338	7.54	18.48	532.66	2.6392	13.41	195.67	12	0.31448	22.42
2014-03-03 20:00:00	0.47	335	7.98	18.37	526.34	2.5501	14.03	194.44	12	0.31448	22.34
2020-12-28 17:00:00	1.039	330	8.06	17.74	490.86	2.4504	13.98	187.44	12	0.31448	22.22
2020-12-28 12:00:00	1.061	330	8.01	17.74	490.86	2.4580	13.91	187.44	12	0.31448	22.17
2018-01-17 13:00:00	0.413	332	7.33	19.51	593.69	2.8259	13.34	207.09	12	0.31448	22.16
2007-12-09 18:00:00	0.586	339	7.73	18.49	533.24	2.6080	13.69	195.78	12	0.31448	22.15
2007-12-09 15:00:00	1.697	337	7.18	18.46	531.51	2.7016	12.87	195.44	12	0.31448	22.13
2014-03-03 13:00:00	-0.391	332	7.78	19.01	563.65	2.6727	13.89	201.55	12	0.31448	21.87
2010-11-09 08:00:00	0.95	338	7.59	18.1	510.98	2.5764	13.39	191.45	12	0.31448	21.81
2010-11-09 03:00:00	1.835	338	7.1	18.08	509.85	2.6609	12.66	191.22	12	0.31448	21.74
2016-02-08 17:00:00	1.691	338	6.46	20.78	673.50	3.2061	12.26	221.13	12	0.31448	21.71
2018-01-17 19:00:00	0.21	332	7.21	19.51	593.69	2.8493	13.15	207.09	12	0.31448	21.66
2014-02-02 05:00:00	2.683	341	6.49	18.63	541.34	2.8678	11.87	197.33	12	0.31448	21.65
2014-02-02 04:00:00	2.434	341	6.54	18.77	549.51	2.8782	11.97	198.88	12	0.31448	21.62
2020-12-28 11:00:00	0.453	330	7.93	17.74	490.86	2.4704	13.80	187.44	12	0.31448	21.44
2016-02-08 16:00:00	2.121	338	6.27	20.54	658.03	3.2168	11.91	218.48	12	0.31448	21.39
2007-12-09 19:00:00	-0.124	339	7.71	18.43	529.78	2.6029	13.65	195.11	12	0.31448	21.34
2018-03-24 09:00:00	1.702	321	9.04	16.12	405.30	2.1025	14.90	169.38	12	0.31448	21.30
2020-12-28 18:00:00	0.36	330	7.88	17.74	490.86	2.4782	13.72	187.44	12	0.31448	21.27
2016-02-08 18:00:00	0.912	338	6.58	20.62	663.17	3.1523	12.42	219.37	12	0.31448	21.27
2008-03-10 19:00:00	1.697	337	6.95	18.01	505.91	2.6790	12.42	190.44	12	0.31448	21.22
2018-03-24 08:00:00	1.755	320	8.79	16.12	405.30	2.1322	14.56	169.38	12	0.31448	21.19
2018-01-17 12:00:00	-0.311	332	7.23	19.51	593.69	2.8454	13.18	207.09	12	0.31448	21.19
2008-03-10 18:00:00	2.236	336	6.75	17.81	494.74	2.6882	12.08	188.22	12	0.31448	21.17
2014-02-02 03:00:00	1.71	341	6.56	19.01	563.65	2.9106	12.05	201.55	12	0.31448	21.11
2014-02-02 06:00:00	2.402	341	6.41	18.53	535.55	2.8701	11.72	196.22	12	0.31448	21.10


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	INCREM. MAREAL (m.)	DIR (°sex.)	H0 (m.)	Tp (seg.)	L0 (m.)	lr	db (m.)	Ls ROTURA (m.)	PROF. ESTIMACIÓN PIE DIQUE (m. NMMA)	PTE. PROMEDIO PARA EXTIMACIÓN	ALCANCE OLEAJES Ahrens
2018-03-24 10:00:00	1.388	322	9.2	16.12	405.30	2.0841	15.12	169.38	12	0.31448	21.07
2010-11-09 09:00:00	0.076	338	7.64	18.09	510.41	2.5665	13.46	191.33	12	0.31448	21.01
2008-03-10 20:00:00	0.784	338	7.15	18.22	517.78	2.6721	12.77	192.78	12	0.31448	20.92
2007-12-09 14:00:00	1.455	336	6.86	18.15	513.81	2.7175	12.32	192.00	12	0.31448	20.92
2020-12-28 03:00:00	1.932	326	8.18	16.12	405.30	2.2102	13.71	169.38	12	0.31448	20.88
2020-12-28 02:00:00	2.024	326	8.07	16.12	405.30	2.2253	13.56	169.38	12	0.31448	20.88
2010-11-09 16:00:00	1.887	337	6.83	17.65	485.89	2.6484	12.16	186.44	12	0.31448	20.84
2014-03-03 21:00:00	-0.586	335	7.74	18.31	522.91	2.5809	13.66	193.78	12	0.31448	20.79
2010-11-09 15:00:00	1.276	337	7.04	17.79	493.63	2.6293	12.50	188.00	12	0.31448	20.77
2008-03-11 04:00:00	1.812	341	6.62	18.15	513.81	2.7663	11.96	192.00	12	0.31448	20.74
2018-03-24 07:00:00	1.552	319	8.43	16.12	405.30	2.1772	14.06	169.38	12	0.31448	20.72
2008-03-11 05:00:00	2.34	340	6.39	18.09	510.41	2.8063	11.60	191.33	12	0.31448	20.69
2007-12-09 20:00:00	-0.7	339	7.7	18.38	526.91	2.5975	13.62	194.56	12	0.31448	20.68
2020-12-28 10:00:00	-0.073	329	7.77	17.74	490.86	2.4957	13.56	187.44	12	0.31448	20.66
2010-11-09 17:00:00	2.2	336	6.63	17.52	478.76	2.6683	11.83	184.99	12	0.31448	20.63
2018-01-17 20:00:00	-0.516	332	7.08	19.51	593.69	2.8754	12.96	207.09	12	0.31448	20.60
2018-01-17 04:00:00	1.879	328	6.67	17.74	490.86	2.6937	11.94	187.44	12	0.31448	20.58
2008-03-10 21:00:00	-0.235	339	7.36	18.43	529.78	2.6640	13.13	195.11	12	0.31448	20.54
2020-12-28 01:00:00	1.833	325	7.92	16.12	405.30	2.2462	13.35	169.38	12	0.31448	20.54
2008-03-11 03:00:00	0.993	341	6.86	18.22	517.78	2.7280	12.33	192.78	12	0.31448	20.52
2018-03-24 11:00:00	0.878	322	9.1	16.12	405.30	2.0955	14.99	169.38	12	0.31448	20.51
2018-01-17 03:00:00	1.861	327	6.64	17.74	490.86	2.6997	11.90	187.44	12	0.31448	20.50
2020-12-28 04:00:00	1.561	327	8.13	16.12	405.30	2.2170	13.64	169.38	12	0.31448	20.47
2007-12-10 02:00:00	1.508	341	6.72	17.9	499.75	2.7078	12.05	189.22	12	0.31448	20.45
2007-12-09 21:00:00	-0.9	339	7.7	18.33	524.05	2.5904	13.61	194.00	12	0.31448	20.43
2020-12-28 07:00:00	-0.176	329	7.67	17.74	490.86	2.5119	13.42	187.44	12	0.31448	20.40


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	INCREM. MAREAL (m.)	DIR (°sex.)	H0 (m.)	Tp (seg.)	L0 (m.)	Ir	db (m.)	Ls ROTURA (m.)	PROF. ESTIMACIÓN PIE DIQUE (m. NMMA)	PTE. PROMEDIO PARA EXTIMACIÓN	ALCANCE OLEAJES Ahrens
2010-11-09 02:00:00	1.038	337	6.93	17.87	498.08	2.6620	12.36	188.89	12	0.31448	20.39
2018-01-17 11:00:00	-0.882	331	7.13	19.51	593.69	2.8653	13.03	207.09	12	0.31448	20.37
2016-02-08 19:00:00	-0.012	338	6.65	20.21	637.06	3.0733	12.44	214.83	12	0.31448	20.36
2010-11-09 14:00:00	0.511	337	7.19	17.84	496.40	2.6091	12.74	188.55	12	0.31448	20.35
2007-12-10 01:00:00	0.857	341	6.93	18	505.35	2.6814	12.39	190.33	12	0.31448	20.33
2016-02-08 15:00:00	2.132	337	6	20.03	625.76	3.2067	11.39	212.84	12	0.31448	20.32
2020-12-28 19:00:00	-0.235	331	7.63	17.74	490.86	2.5185	13.36	187.44	12	0.31448	20.27
2018-01-17 05:00:00	1.544	329	6.68	17.74	490.86	2.6916	11.96	187.44	12	0.31448	20.27
2014-02-02 02:00:00	0.691	340	6.55	19.33	582.79	2.9619	12.10	205.09	12	0.31448	20.26
2008-03-10 17:00:00	2.319	334	6.42	17.43	473.85	2.6976	11.50	183.99	12	0.31448	20.24
2007-12-10 03:00:00	1.791	341	6.52	17.8	494.18	2.7337	11.73	188.11	12	0.31448	20.22
2010-11-09 10:00:00	-0.589	338	7.59	18.05	508.16	2.5693	13.38	190.89	12	0.31448	20.21
2007-12-10 00:00:00	0.199	341	7.14	18.11	511.54	2.6578	12.73	191.56	12	0.31448	20.21
2009-03-04 21:00:00	1.466	336	6.68	17.75	491.41	2.6932	11.96	187.55	12	0.31448	20.20
2008-03-11 06:00:00	2.38	340	6.17	18.03	507.03	2.8465	11.25	190.67	12	0.31448	20.15
2007-12-09 22:00:00	-0.797	340	7.51	18.25	519.48	2.6115	13.31	193.11	12	0.31448	20.08
2019-12-09 13:00:00	1.579	335	6.15	19.51	593.69	3.0851	11.52	207.09	12	0.31448	20.07
2009-03-04 20:00:00	1.352	336	6.72	17.63	484.79	2.6670	11.99	186.22	12	0.31448	20.06
2010-11-09 18:00:00	2.145	336	6.43	17.4	472.22	2.6909	11.51	183.66	12	0.31448	20.06
2019-12-09 12:00:00	1.262	336	6.25	19.51	593.69	3.0603	11.68	207.09	12	0.31448	20.06
2007-12-09 23:00:00	-0.386	340	7.32	18.18	515.51	2.6351	13.01	192.33	12	0.31448	20.05
2014-02-02 07:00:00	1.631	341	6.32	18.45	530.93	2.8780	11.57	195.33	12	0.31448	20.05
2018-01-17 02:00:00	1.499	327	6.59	17.74	490.86	2.7100	11.82	187.44	12	0.31448	20.03
2009-03-04 22:00:00	1.354	336	6.61	17.78	493.07	2.7120	11.86	187.89	12	0.31448	19.96
2020-12-28 09:00:00	-0.41	330	7.55	17.74	490.86	2.5318	13.24	187.44	12	0.31448	19.96
2008-03-11 02:00:00	0.057	341	7.01	18.27	520.62	2.7060	12.57	193.33	12	0.31448	19.95



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

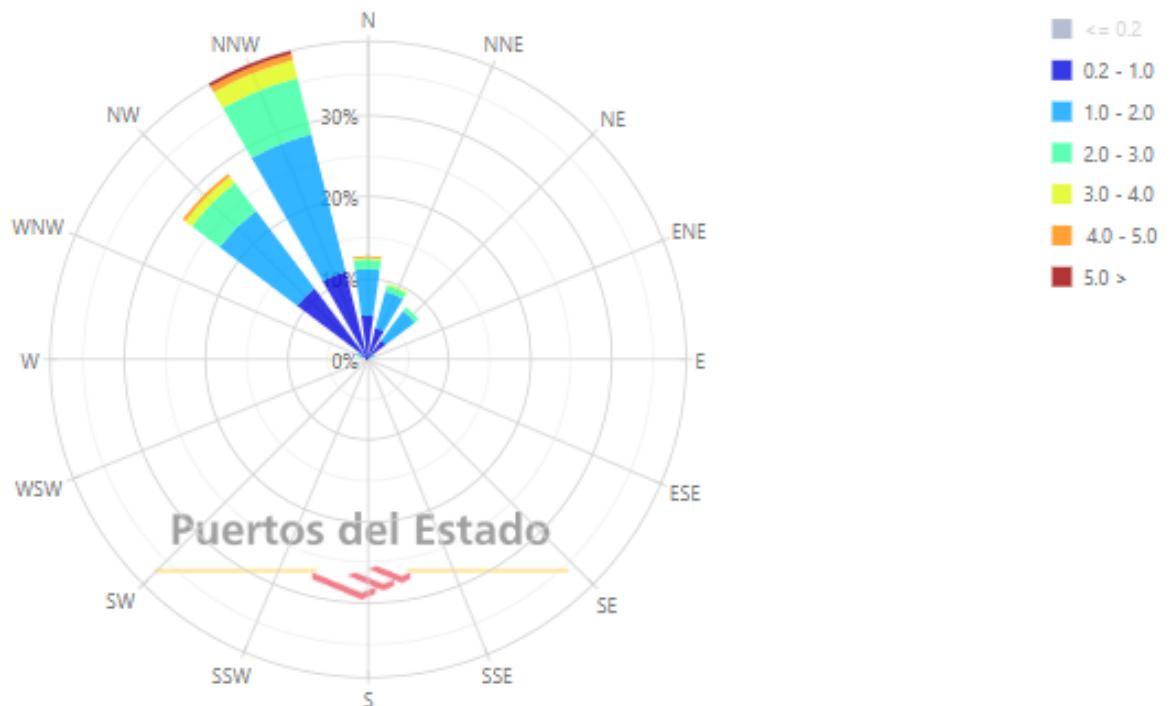
Tfno.: 918961731; Fax: 918903410; e-mail: idyma@idyma.es

FECHA/HORA	INCREM. MAREAL (m.)	DIR (°sex.)	H0 (m.)	Tp (seg.)	L0 (m.)	Ir	db (m.)	Ls ROTURA (m.)	PROF. ESTIMACIÓN PIE DIQUE (m. NMMA)	PTE. PROMEDIO PARA EXTIMACIÓN	ALCANCE OLEAJES Ahrens
2010-11-09 13:00:00	-0.231	338	7.34	17.9	499.75	2.5909	12.97	189.22	12	0.31448	19.95
2020-12-28 08:00:00	-0.457	330	7.54	17.74	490.86	2.5335	13.23	187.44	12	0.31448	19.90

Los resultados anteriores son compatibles con el análisis de la rosa de oleaje del Punto Simar 3068038 en el mismo período de 1995-2023, dadas las direcciones dominantes en cuanto a frecuencia y magnitudes de altura de ola significativa, como se ilustra en la siguiente imagen de la misma:

Rosa de Altura Significante (m) para Oleaje - Punto SIMAR 3068038

Periodo: 1995 - 2023 - Eficacia: 96.62%



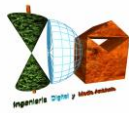
En función del análisis anterior y de los resultados del estudio “ESTIMACIÓN DEL ALCANCE DE OLEAJES EN LA EXPLANADA AL TRASDÓS DEL DIQUE OESTE DE PUERTO DE VEGA, EN EL T.M. DE NAVIA, ASTURIAS” de abril de 2021, en el que del período analizado de datos históricos de estados de mar del período 2016-2020 se obtuvieron los estados de mar que proporcionaron los mayores alcances de oleajes en dicho tramo de costa, con realización de propagación y cálculos detallados por perfil sobre la morfología concreta del dique y la escollera del Puerto y sobre la batimetría de detalle y obtención de alcances de oleajes por rebase de dique y escollera, los estados de mar de los temporales que fueron los responsables de las máximas inundaciones en la citada explanada del período estudiado (2016-2020), están detrás de los estados de mar del temporal de 03-03-2014, según el análisis actual del período comprendido entre 1995 y 2023.



En concreto, los 5 estados de mar de máximo potencial de inundación del período 1995-2023 sobre el tramo de costa de estudio del Puerto del T.M. de Navia, se corresponden con los comprendidos en el horario entre las 15:00 UTC y las 19:00 UTC ambas inclusive del día 3 de marzo de 2014, y en el sexto y séptimo lugar se encuentran los estados de mar de las 16:00 UTC horas y 15:00 UTC horas respectivamente del día 17 de enero de 2018, habiendo sido el estado de mar de las 16:00 UTC horas de este día el quinto de mayor potencial de inundación del período 2016-2020 (cinco años) una vez fueron realizadas las propagaciones.

La circunstancia, de que los únicos estados de mar que superen a los de los máximos temporales del período 2016-2020 sean los de un mismo día de temporal, el de 3 de marzo de 2014, simplifica la obtención del estado de mar que provocará el máximo alcance de oleajes del período 1995-2023, dado que al ser todos del mismo día y presentar direcciones de procedencia muy similares, con un grado sexagesimal de diferencia (con lo que se podrían considerar con la misma dirección de procedencia) y períodos de pico también muy similares en el entorno de 18,5 seg todos ellos con diferencias máximas entre la máxima a priori estimada antes de propagación, la de las 17 UTC, y el resto, de 0,2 seg., propicia que el estudio del temporal que producirá la máxima inundación se reduzca al análisis de las alturas de ola y los incrementos mareales entre los estados de mar del 3 de marzo de 2014. Debe indicarse en este sentido, que el estado de mar de las 17:00 del día 3 de marzo de 2014, presenta la mayor altura de ola significativa entre los estados de mar contrastados como presuntos responsables de los mayores de alcances, así como registró los mayores niveles de incrementos mareales.

En consecuencia, se puede determinar el estado de mar de las 17:00 horas UTC del día 3 de marzo de 2014, como el causante del máximo alcance de oleajes del período 1995-2023 según determinan previamente las iteraciones realizadas a partir de los datos en profundidades indefinidas, sin necesidad de realizar las propagaciones de varios estados de mar de distintos temporales cuyo potencial de inundación precisaran de la realización de las propagaciones para dirimir cuál de ellos produce mayores valores escalares de oleaje a pie de talud del dique, dado que es sin duda el mayor entre los del día 3 de marzo de 2014, y por tanto mayor que el resto de estados de mar de otros temporales, con una diferencia de 1,60 m. en los resultados estimados antes de propagación sobre el siguiente estado de mar de un temporal distinto, con 5 estados de mar de holgura (5 estados de mar del mismo día 03-03-2014), lo cual no deja lugar a dudas.



En la siguiente tabla, se visualiza claramente lo razonado anteriormente:

FECHA/HORA	INCREM. MAREAL (m.)	DIR (°sex.)	H0 (m.)	Tp (seg.)
2014-03-03 17:00:00	2.488	335	8.39	18.55
2014-03-03 16:00:00	2.272	334	8.38	18.64
2014-03-03 18:00:00	2.215	335	8.34	18.48
2014-03-03 15:00:00	1.607	334	8.35	18.73
2014-03-03 19:00:00	1.498	335	8.19	18.42
2018-01-17 16:00:00	1.670	332	7.44	19.51

Asimismo debe indicarse, que como en el estudio citado de abril de 2021 se realizaron las propagaciones de 11 estados de mar y se conocen en consecuencia los valores de los mismos de altura de ola, dirección y período de pico a pie de talud del dique del Puerto de Navia, y en el presente estudio se han realizado las propagaciones del estado de mar del 4 de marzo de de 2014 a las 17:00 UTC, habiéndose constatado que las mayores alturas de ola a pie de dique teniendo en cuenta también el set-up y los incrementos mareales correspondientes a cada temporal, han sido las del estado de mar del 4 de marzo de 2014 a las 17:00 UTC, como se constatará en el apartado correspondiente con los resultados de la propagación del estado de mar de 03-03-2014 17:00 UTC.

2.2. ANÁLISIS DE LOS MÁXIMOS NIVELES DEL MAR EN EL PERÍODO 1995-2023 (MÁXIMO PERÍODO DISPONIBLE DE NIVELES MAREALES)

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 de Gijón 3108 situado en el Puerto de Gijón de la Red REDMAR, que considera tanto los componentes astronómicos, como los meteorológicos o residuales en sus mediciones.

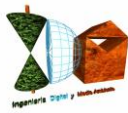


Además de los niveles mareales con su componente astronómico y su componente residual o meteorológico, también los mareógrafos determinan el nivel medio del mar (NMM), que fija el plano altimétrico de comparación ($z=0$) de referencia para la cota de máxima inundación que se calcule finalmente, habiendo 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 península 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.

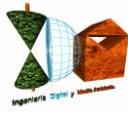
De este modo, se han podido relacionar todos los datos de los niveles mareales de los registros de los mareógrafos analizados y en origen referidos al cero del Puerto, con el plano $z=0$ correspondiente a la Red Geodésica ETRS89, para la vinculación y referenciación altimétrica con la base topobatimétrica generada, 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 del Puerto de Vega, en el T.M. de Navia, Asturias, según lo establecido reglamentariamente en el Reglamento General de Costas, Real Decreto 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.



MAREÓGRAFO DE GIJÓN 3108	
situado en el Puerto de Gijón de la Red REDMAR de Puertos del estado	
Ubicación	Situado en pantalán dársenas interiores, lado opuesto del Muelle Rendiello
Longitud	5.70° O
Latitud	43.56° N
Cadencia	1 Min
Código	3108
Inicio de medidas	29/06/1995
Tipo de sensor	Radar
Modelo	Miros
Comentarios	Hasta 2009 sensor acústico en misma posición. Datos de viento desde 24-06-2015
Conjunto de datos	REDMAR

Analizados los datos del mareógrafo en los horarios (día-hora) se asoció informáticamente el incremento mareal con el que tuvo lugar, sincronizados al horario 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 los 2,3 km. de distancia desde la ubicación de las coordenadas del Punto Simar 3068038 hasta pie de dique de Puerto de vega, con una celeridad de onda de 21 m/seg. estimada en valores promedio 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 de aproximadamente 2 minutos (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 horario UTC asociado al del oleaje.



Los datos de los incrementos mareales en el horario en el que cada uno de los sucesos anteriores alcanzó la costa, fueron los siguientes:

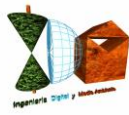
Fecha hora UTC	Nivel referido al cero REDMAR Puerto (m.)
2014-03-03 17:00:00	4.849

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 mareografo

Cero REDMAR: Cero del Puerto

Cota: 6.03 m. bajo clavo de referencia

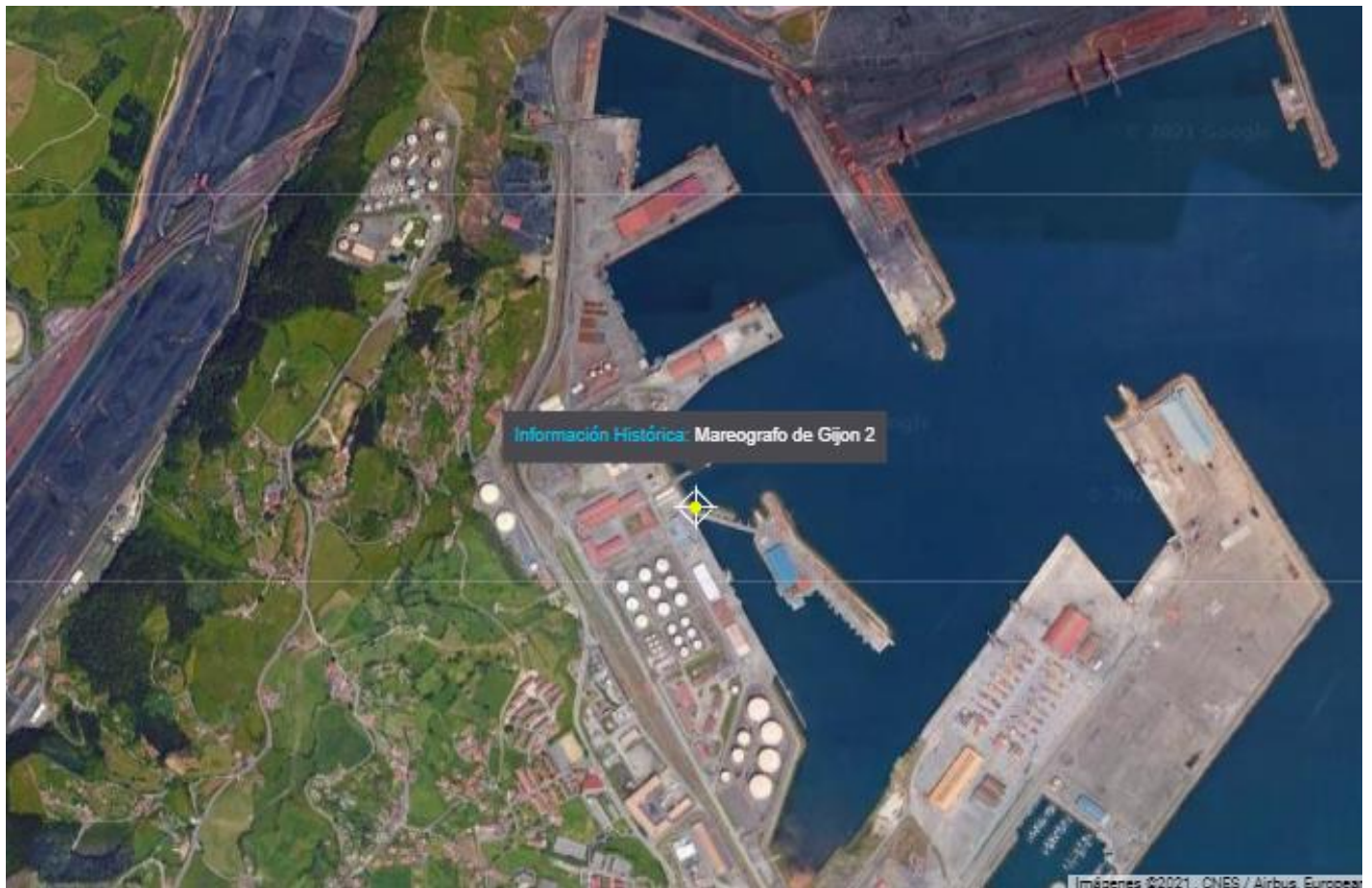


INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)

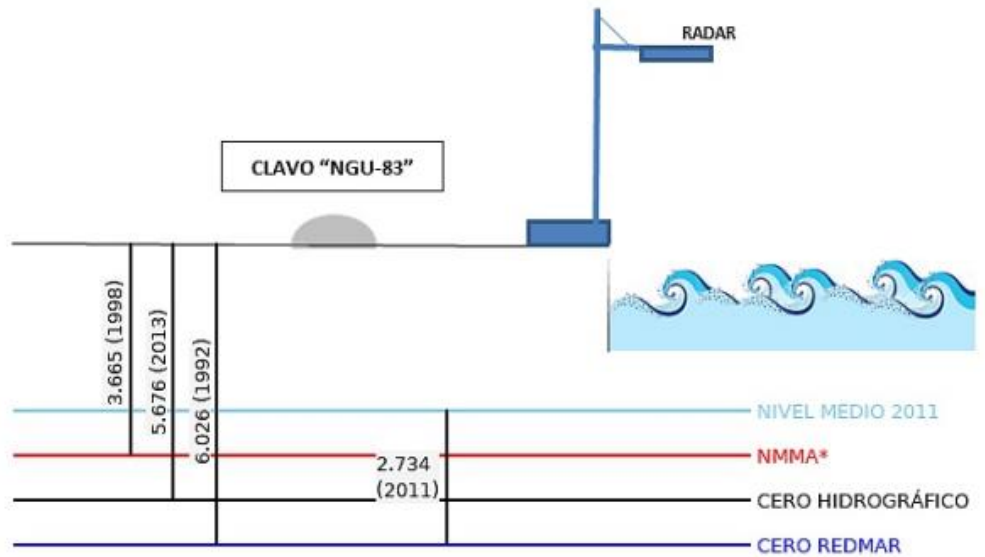
C/ Cañadilla 6, local 68, C. Comercial Coronado, Las Rozas de Madrid 28231, Madrid

Pza. de la Montañeta 4, entresuelo, 03001 Alicante

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



ESQUEMA DATUM MAREÓGRAFO REDMAR GIJÓN2 (cotas en metros)



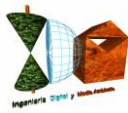
CLAVO "NGU-83"

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.

Fecha hora UTC	Nivel referido al N.M.M.A. (m.)
2014-03-03 17:00:00	2.488



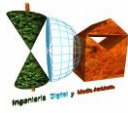
3. PROPAGACIÓN DEL OLEAJE

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 los datos del Punto Simar según indicaciones de Puertos del Estado, deberán ser tomados como datos en aguas abiertas y profundidades indefinidas independientemente de su posición, por lo que los datos de los sucesos de oleajes tomados del Punto Simar 3068038, pueden ser tomados como los datos de los 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:

FECHA/HORA	INCREM. MAREAL (m.)	DIR (ºsex.)	H0 (m.)	 Tp (seg.)
2014-03-03 17:00:00	2.488	335	8.39	18.55



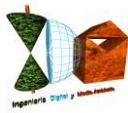
3.2. SEGUNDA FASE: DESDE PROFUNDIDADES INDEFINIDAS HASTA PIE DE COSTA

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 3068038 teniendo en cuenta su ubicación, extendida hasta profundidades indefinidas, dadas las indicaciones de Puertos del Estado en el sentido de que los datos de los Puntos Simar, deberán ser tomados como datos en aguas abiertas y profundidades indefinidas independientemente de su posición, 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:

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

$$\psi_j = i\bar{K}_j x - \sigma_j \quad (1)$$

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

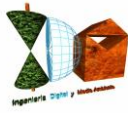
Donde:

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:

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

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:

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

Donde:

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

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

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



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:

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

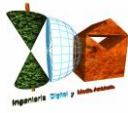
El perfil de la onda viene dado por:

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

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), Bettés 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:

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

Donde

$$p = C C_g$$

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

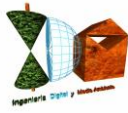
D = Forma parte del término no lineal, y se define como:

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

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

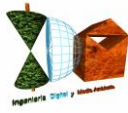
Utilizando una aproximación Lagrangiana, Booij (1981) desarrolló una versión de la ecuación de la pendiente suave que incluye los efectos de una corriente. En este modelo las corrientes se suponían débiles y cualquier producto entre velocidades de corriente era despreciado. Kirby (1984a) presentó la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

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

Donde $p = c c_g$ 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:

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



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:

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

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 $\delta = O(\varepsilon)$

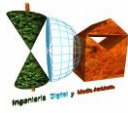
Aquí Φ_0 es el potencial para la corriente:

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

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:

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

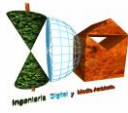
De acuerdo con Kirby and Dalrymple (1983a), para obtener la ecuación de la onda incidente, se debe despreciar el acoplamiento que produce la onda larga en el potencial ϕ .

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:

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

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:

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

siendo:

$$\beta = \frac{1}{k^2} \frac{\partial k}{\partial x} + \frac{1}{2k^2(c c_g - U^2)} \frac{\partial}{\partial x} \left[k(c c_g - U^2) \right]$$

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:

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

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

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

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

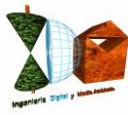
$$\Delta_1 = a_1 - b_1; \quad \Delta_2 = 1 + 2a_1 - 2b_1; \quad \Delta'_j = a_1 - b_1 \frac{\bar{k}_j}{k_j} \quad (22 \text{ a})$$

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

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



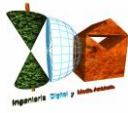
Kirby (1986c) encontró que para rangos máximos (Minimax 70°) se obtienen resultados razonables dentro de los ángulos que típicamente se utilizan, pero mantiene reservas en cuanto a su aplicación en modelos numéricos, dado que todavía esta aproximación no ha sido suficientemente comprobada. Kirby (1994), 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:

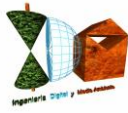
$$Ur \equiv \frac{|A|}{h} \frac{1}{(kh)^2} \quad (25)$$

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:

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



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 $H = |A|$.

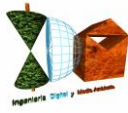
En aguas profundas, la relación de Hedges (1976) tiende a la relación lineal (4), ya que $\frac{|A|}{h} \rightarrow 0$ debido al aumento de la profundidad.

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:

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

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:

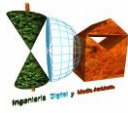
$$f_1(kh) = \tan h^5(kh) \quad (30)$$

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

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 :

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

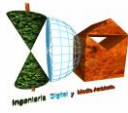
$$\sigma_j^2 = gk_j \tanh(k_j h + \varepsilon_s) \quad \text{Hedges modificado} \quad (34)$$

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

donde:

$$\begin{aligned} \varepsilon_j &= k_j |A|_{j1} \\ \varepsilon_s &= k_j H_s / 2 \end{aligned} \quad (36)$$

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 cáusticos, 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:

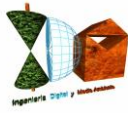
$$H_s(x, y) = \left(8 \sum_{j=1}^{N_f} \sum_{l=1}^{N_\theta} |A_{jl}(x, y)|^2 \right)^{1/2} \quad (38)$$

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 $\Delta f_j =$ 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 $k = 1, \dots, 37$; $\Delta \theta = 5^\circ$; $z_{jk} =$ 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:

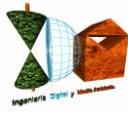
$$\eta(x, y) = \sum_{j=1}^{N_f} \sum_{l=1}^{N_\theta} \eta_{jl}(x, y) \quad (41 \text{ a})$$

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

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):

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

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):

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

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:

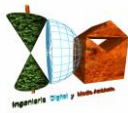
$$\gamma_j = \frac{2\sigma_j f k_j |A_{jl}| (1-i)}{3\pi \sinh(2k_j h) \sinh(k_j h)} \quad (45)$$

con $f = 4f_\omega$, 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.

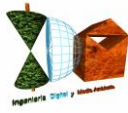
El análisis de la rotura del oleaje es fundamental para un modelo de propagación en zonas costeras y debe servir para determinar la pérdida de energía sufrida. En general, los modelos de disipación del oleaje en rotura pueden clasificarse en dos categorías:

- 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:

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

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

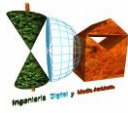
$$C_{gj} \frac{\partial A_{jl}}{\partial x} + \frac{l}{2} \frac{\partial C_{gj}}{\partial x} A_{jl} = -\alpha A_{jl} \quad (48)$$

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:

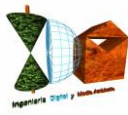
$$\frac{\partial EC_g}{\partial x} = -\bar{D} \quad (53)$$

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:

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



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)

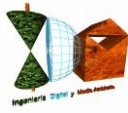
Este modelo predice la transformación de la altura de ola media cuadrática H_{rms} debido a la disipación por rotura del oleaje. Se fundamenta en la hipótesis que la distribución de las alturas de ola, asociada a un H_{rms} , son del tipo Rayleigh. Dicha distribución de alturas de ola es truncada, a 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:

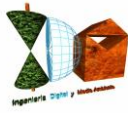
$$\bar{D} = \frac{\alpha_1}{4} Q_b f_p \rho g H_b^2 \quad (57)$$

Donde α_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:

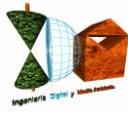
$$\gamma = 0.39 + 0.56 \tanh(33S_o) \quad (60)$$

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:

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

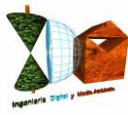
De nuevo si sustituimos esta expresión en (55), obtenemos el coeficiente a de fricción que aplica el modelo parabólico, para cada una de las componentes de energía propagadas con (20), donde la expresión α es:

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

Al ser $\alpha \neq f(f)$, 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 a 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.

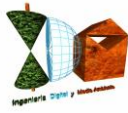
3.2.8.8. Modelo de disipación Thornton y Guza (1983) (MTG)

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.

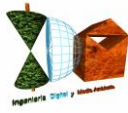
La expresión para (\bar{D}) del MTG es:

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

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 Q_b (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:

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

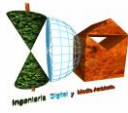
K_6 es un coeficiente de ajuste, L_p es la longitud de onda asociada a la frecuencia pico f_p . Los límites para Γ_e se definen como: ($\Gamma_e = 0.02$ para $\frac{h}{\sqrt{L_p H_{rms}}} > 1,6$ y $\Gamma_e = 0,52$ para $\frac{h}{\sqrt{L_p H_{rms}}} < 0,04$).

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:

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

3.2.8.10. Zonas de tierra

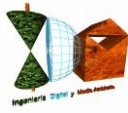
Las grandes islas que cortan la superficie libre y las costas que puedan tener zonas de rotura se tratan mediante la técnica de la “película delgada” de Dalrymple, Kirby y Mann (1984). Este procedimiento permite el cálculo sencillo de las alturas de ola alrededor de islas de forma arbitraria, reemplazando 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 \bar{q} del espectro en cada punto (x, y) del dominio, el Oluca-SP estima \bar{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 $\bar{\theta}$ se define como:

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

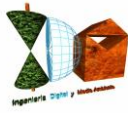
Donde n_p está asociada a la frecuencia pico f_p . Asumiendo una distribución de alturas de ola de Rayleigh, la altura de ola significativa H_s y la energía del oleaje se definen como:

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

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

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:

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

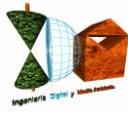
3.2.10.1. Espectro frecuencial TMA (Bouws et al., 1985)

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:

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



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

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

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

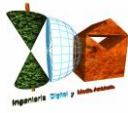
$$\sigma = \begin{cases} 0.07 & f \leq f_p \\ 0.09 & f > f_p \end{cases}$$

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

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 autores (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)

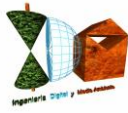
f_p = frecuencia pico (Hz)

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

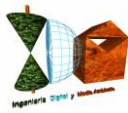
- Fondo de pendiente suave:

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(\)}{\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

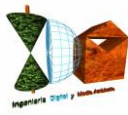
Tal y como se indicó anteriormente, cada uno de los tres modelos de disipación propuestos se sustentan sobre una serie de hipótesis, resumiéndose las más importantes desde el punto de vista de la implementación de estos modelos en el Oluca-SP, como:

- 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)

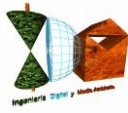
El modelo Oluca-SP fue comprobado aplicándolo en casos de ensayos de modelos físicos en laboratorio y casos reales en playa, para lo cual se tomaron los datos de tres diferentes ensayos realizados en laboratorio: (1) Mase y Kirby (1992), quienes llevaron a cabo la propagación de un oleaje unidireccional 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.

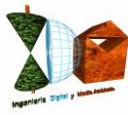


3.2.14. Propagaciones hasta pie de taludes de la zona de estudio

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 taludes de las estructuras de Puerto de Vega, para los 9 temporales preseleccionados, obteniéndose de este modo los parámetros que caracterizan el temporal con sus valores propagados a pie de la estructura morfológica emergida; que notaremos con los subíndices H_{sp} , T_p (se mantiene el período de pico en la propagación hasta pie de costa), así como con las direcciones finales representadas con vectores direccionales, así como el ángulo propagado que permitirá obtener el ángulo de incidencia desde cada nodo propagado respecto a la dirección principal de la estructura.

Dicho software de modelado numérico aplica los fundamentos teóricos especificados en los apartados anteriores para la propagación hasta la costa, sobre la batimetría obtenida a partir de los datos batimétricos con equidistancias de 0.5 y 1 m. (equidistancia de isobatas, fuente Demarcación de Costas en Asturias, Navionics) e introducida en el formato digital para MDT X, Y, Z, unidas a su vez con la topografía terrestre a partir de los datos LIDAR del I.G.N. Previamente se ha realizado una homogeneización altimétrica, transformando los datos altimétricos digitales de la batimetría de Puerto de Vega y de Navionics referidos a la BMVE, al plano de comparación $Z=0$ del I.G.N. con referencia al N.M.M.A., al igual que el levantamiento topográfico LIDAR del I.G.N., de forma que la referencia de todo el MDT final es la del N.M.M.A., lo cual ha de tenerse en cuenta a la hora de su importación desde MOPLA a la hora de establecer los niveles mareales durante las simulaciones de propagación del oleaje.

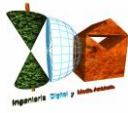
Para el proceso computacional de propagación del oleaje, se diseña mediante el software una concatenación de mallas de puntos que comprende hasta la zona de estudio y procede desde profundidades indefinidas, en aproximación desde una malla inicial que arranca en posiciones que comprenden la latitud del Punto Simar 3068038 según el sector principal de procedencia del oleaje seleccionado, tomado como fuente de datos de los temporales definidos por los estados de mar seleccionados de dicho Punto Simar, obteniéndose como resultado final los valores propagados del temporal para cada uno de los puntos de la última malla (Malla de Detalle, en profundidades reducidas), la de mayor resolución y que comprende hasta pie de costa de la zona de estudio.



Las mallas se han diseñado con una anchura (fundamentalmente la inicial desde aguas profundas, la denominada “Malla Indefinidas-Intermedias”), extensión y orientación que permitieron ejecutar las propagaciones de los 10 estados de mar, dado que la diferencia angular de su dirección con la dirección principal de las mallas en el sentido de propagación, es inferior a 55° , circunstancia que ha propiciado que el diseño de las tres mallas encadenadas, Indefinidas-Intermedias, Intermedia y Reducidas a pie de costa, con una ubicación próxima al Punto Simar fuente de datos.

Se tomarán como valores finales del oleaje propagado a pie de costa los resultantes en nodos de dicha malla final de Detalle que se encuentran en posiciones que se extienden hasta las proximidades del dique y de la escollera de la explanada en el interior del Puerto, al objeto de obtener los valores de altura de ola propagados a pie de la morfología emergente, como valores de entrada o imput para su posterior introducción en la herramienta informática que aplicará 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 9 sucesos temporales seleccionados en el período de los últimos 5 años, que reflejan los resultados de las propagaciones desde las proximidades a profundidades indefinidas entre las ubicaciones de los Punto Simar 3068038 hasta el frente de costa objeto de estudio, 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-intermedias hasta pie del frente de costa, 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. Se incluyen las fichas de la malla “Reducidas”, la última de las concatenadas, la de máximo detalle y que comprende hasta pie de talud de las estructuras del Puerto de Vega.

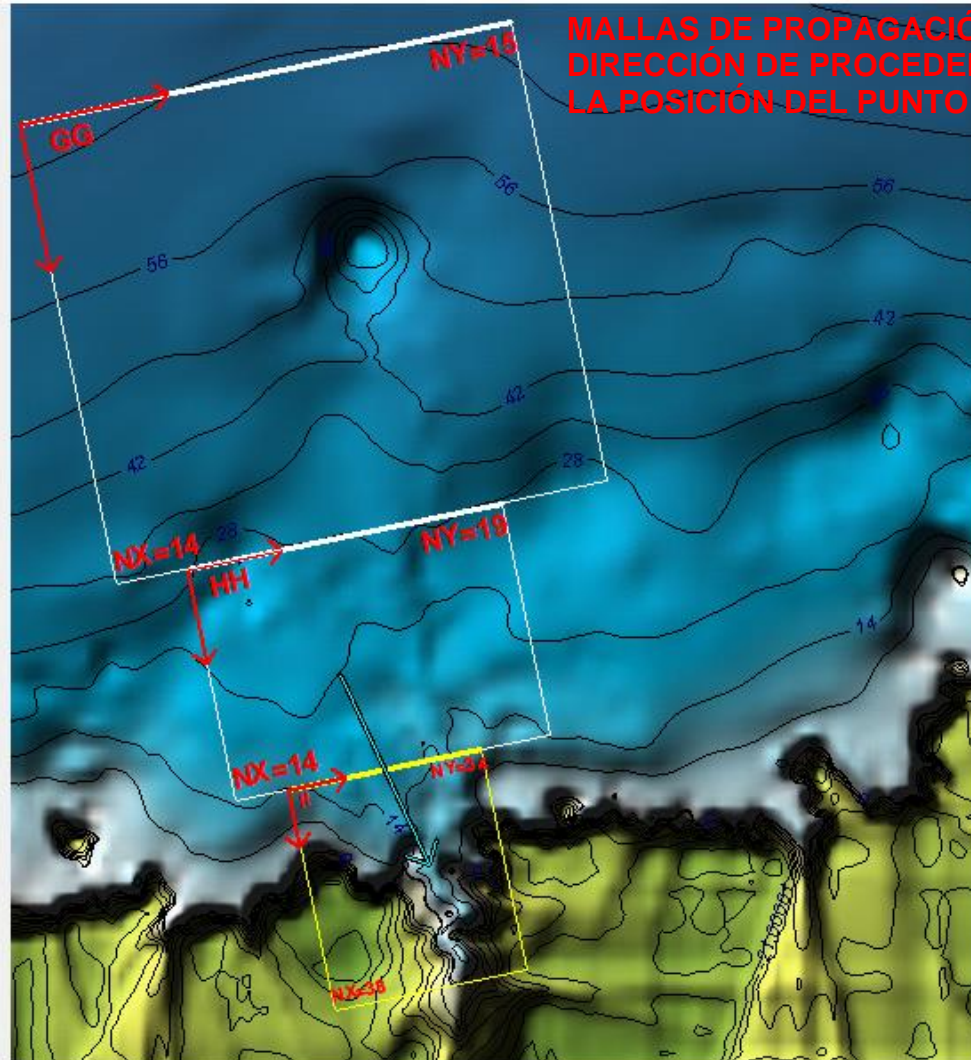


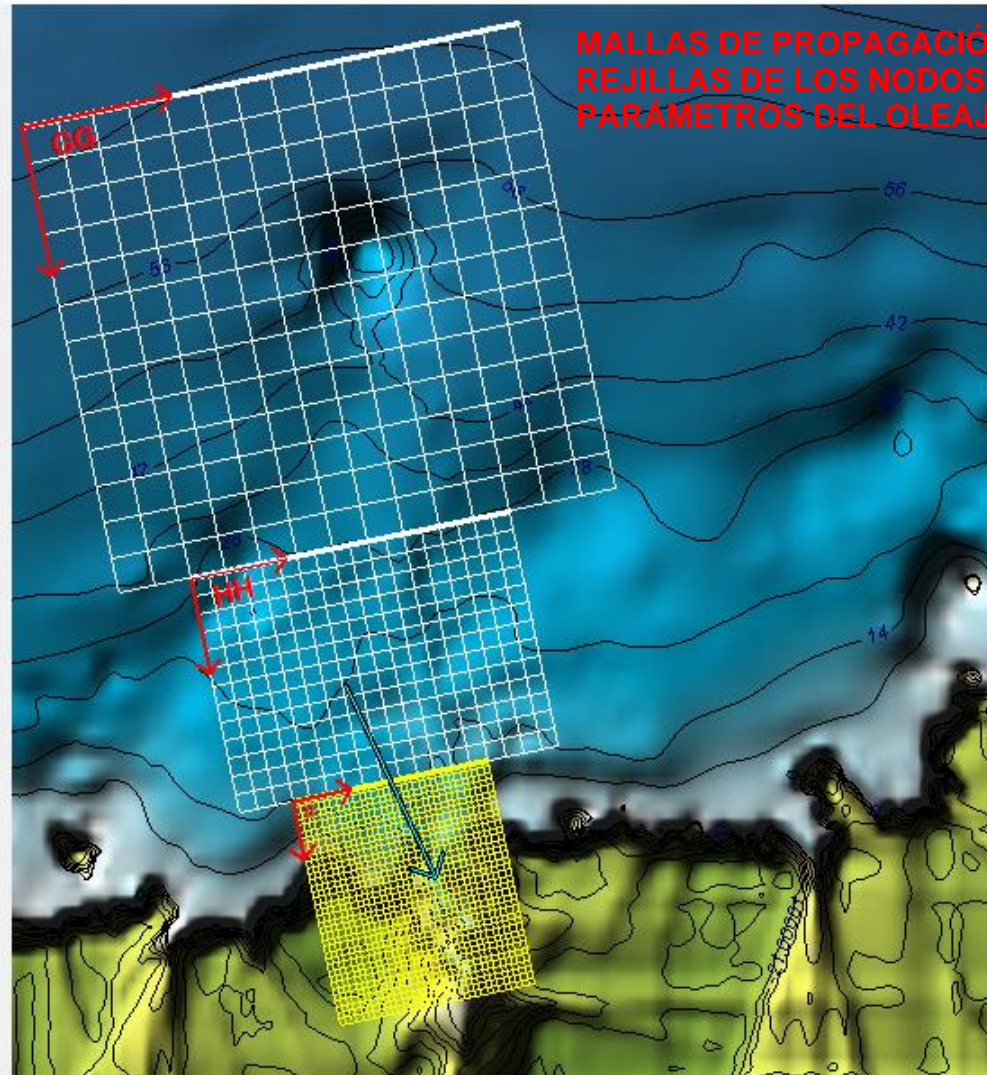
Previamente se incluyen las exportaciones de las concatenaciones de mallas de diseño de la propagación, sobre el MDT topobatimétrico generado para el presente estudio, cargado en el módulo Oluca-SP espectral, integradas por dos series cada una de las cuales consta de un encadenado de 3 mallas, que van aumentando su resolución, desde las profundidades indefinidas-intermedias hasta el frente de costa emergido.

Asimismo, se incluye un plano en formato A-3 a escala 1/8.000 en el que se recoge la extensión completa del MDT topobatimétrico elaborado sobre el que se ha ejecutado la propagación con Oluca-SP, con referencia al N.M.M.A. (con incremento mareal nulo), así como una serie de planos en formato A-3 a escalas 1/2.000 con los resultados de la propagación de los oleajes, con los vectores direccionales del oleaje y su módulo H_{sp} propagado (proporcional la longitud del vector al valor H_{sp}), 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 31, sobre el MDT.



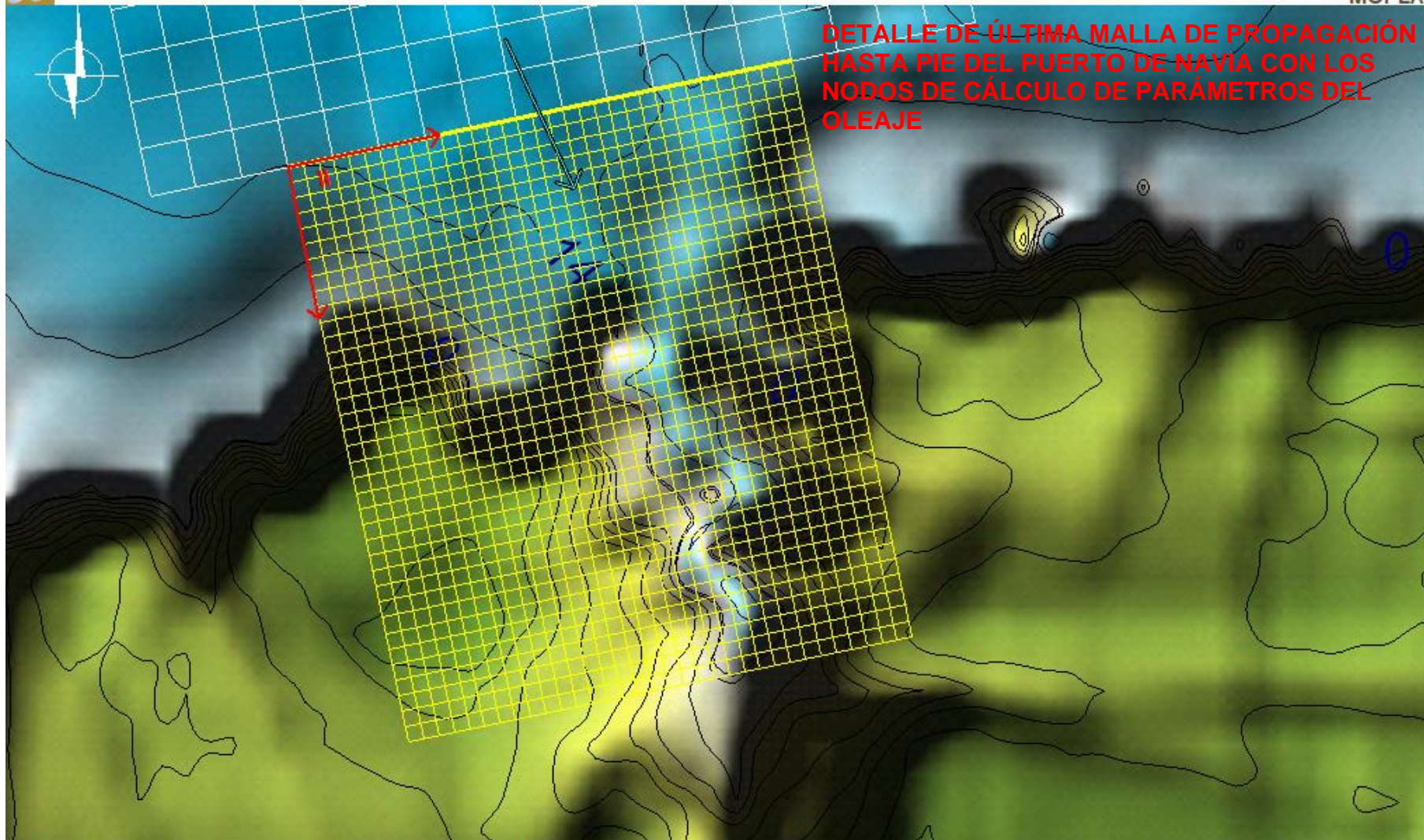
MALLAS DE PROPAGACIÓN DEL OLEAJE DESDE DIRECCIÓN DE PROCEDENCIA PRINCIPAL Y HACIA LA POSICIÓN DEL PUNTO SIMAR





MALLAS DE PROPAGACIÓN DEL OLEAJE CON LAS REJILLAS DE LOS NODOS DE CÁLCULO DE PARÁMETROS DEL OLEAJE





**DETALLE DE ÚLTIMA MALLA DE PROPAGACIÓN
HASTA PIE DEL PUERTO DE NAVIA CON LOS
NODOS DE CÁLCULO DE PARÁMETROS DEL
OLEAJE**



Proyecto:

Gráfico: Vectores de la altura de ola significativa+Magnitud

Caso espectral: I104

II:

04: ESTADO 03/03/2014 17:00 UTC

Características de la simulación

OLUCA-SP

Espectro frecuencial (TMA)

Hs: 8.39 m

Tp: 6.5 m

f_p : 0.0539084 Hz (Tp: 18.55 s)

γ : 10

Nº Comp.: 20

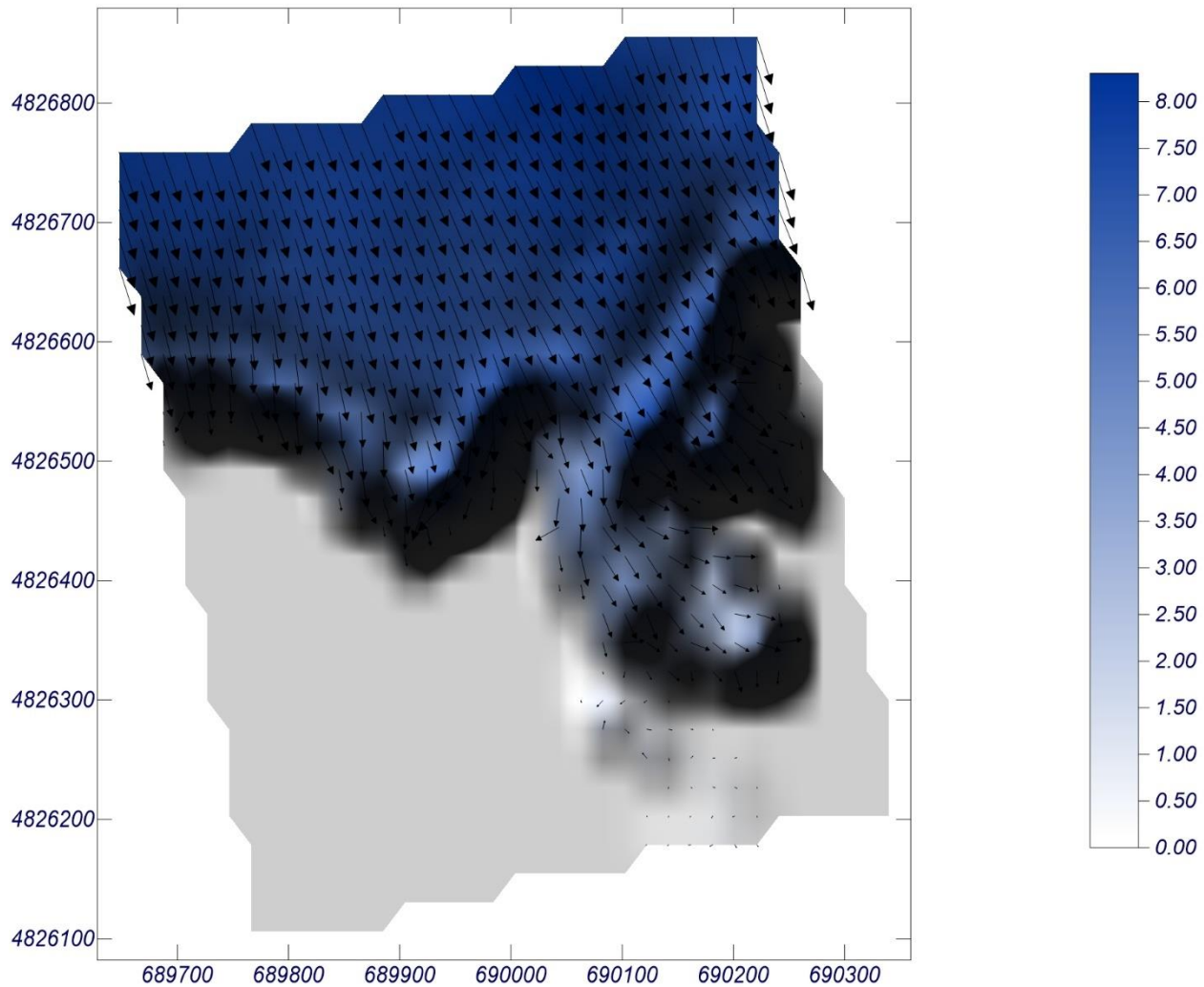
Espectro direccional

θ_m : 13.13° (N25.0W)

σ : 10° - Nº Comp.: 20

COPLA-SP

MOPLA-SP



1 cm = 12.000 m

0 12

Proyecto:

Gráfico: Gráfico combinado de topografía y vectores Hs

Caso espectral: I104

II:

04: ESTADO 03/03/2014 17:00 UTC

Características de la simulación

OLUCA-SP

Espectro frecuencial (TMA)

Hs: 8.39 m

Tp: 65 s

f_p : 0.0539084 Hz (T_p : 18.55 s)

γ : 10

Nº Comp.: 20

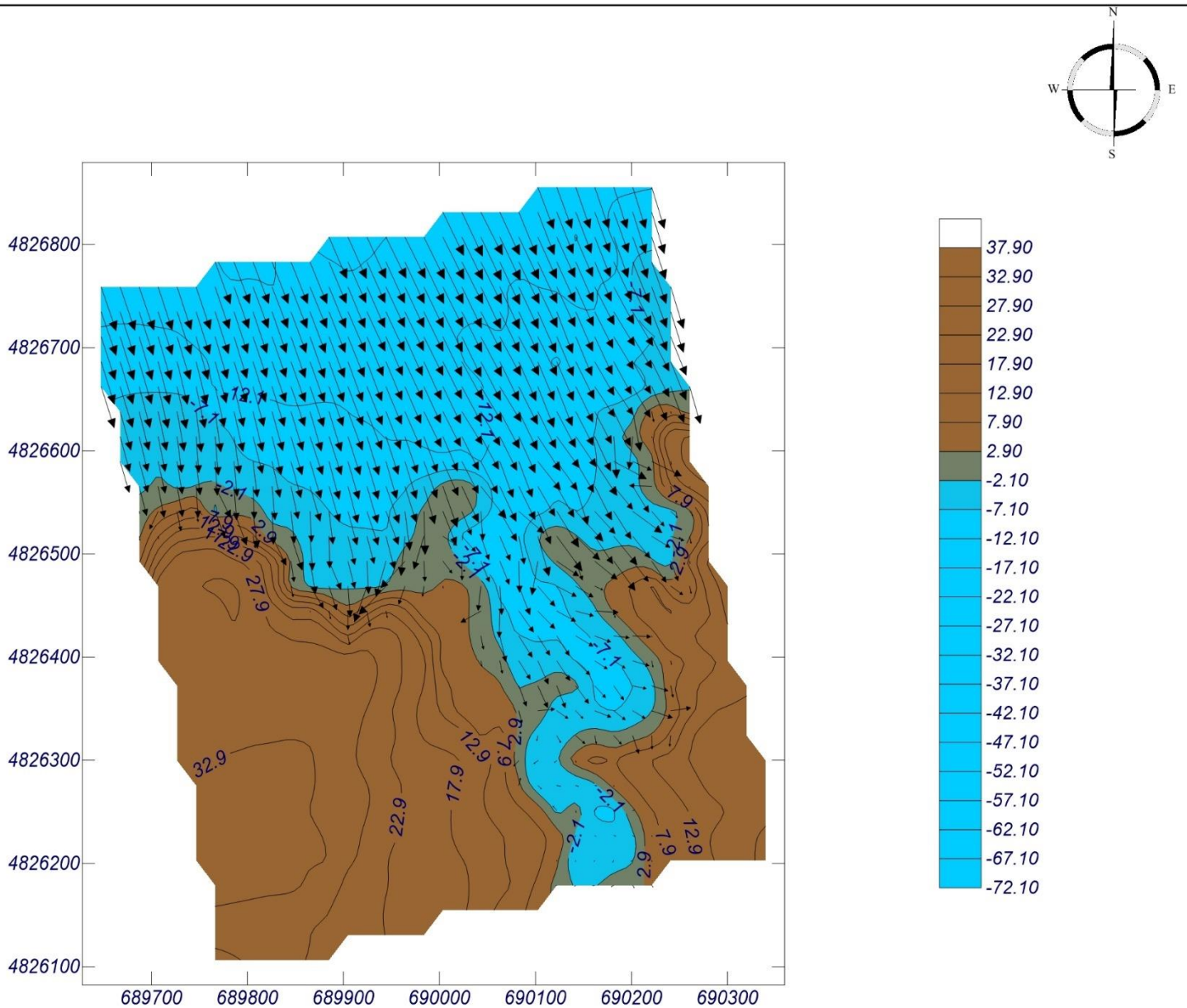
Espectro direccional

θ_m : 13.13° (N25.0W)

σ : 10° - Nº Comp.: 20

COPLA-SP

MOPLA-SP



Proyecto:

Gráfico: Altura de ola significativa

Caso espectral: I104

II:

04: ESTADO 03/03/2014 17:00 UTC

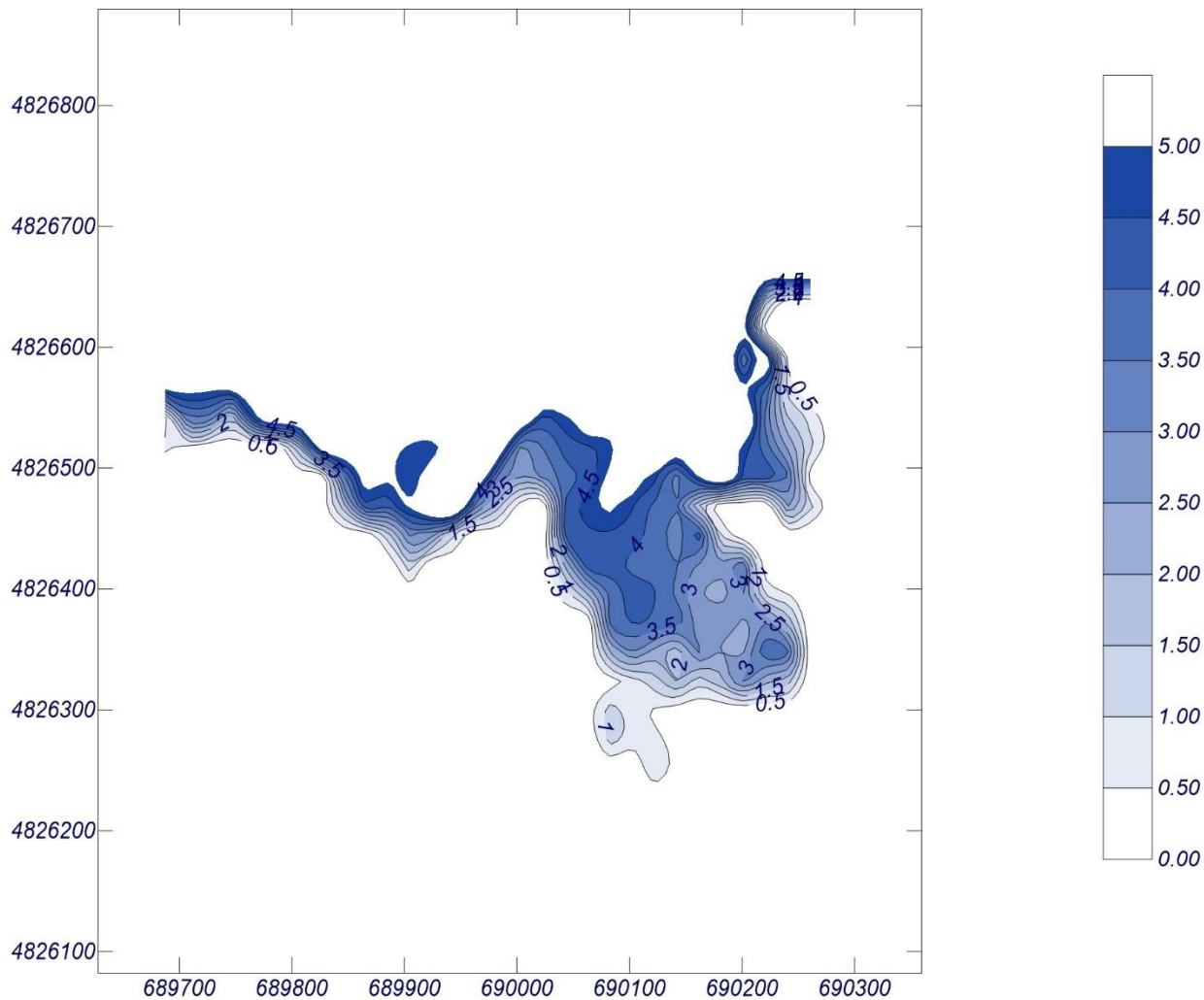
Características de la simulación

OLUCA-SP

Especro frecuencial (TMA)
Hs: 8.39 m
T: 65 m
Tp: 0.0539084 Hz (Tp: 18.55 s)
 γ : 10
Nº Comp.: 20
Especro direccional
 θ_m : 13.13° (N25.0W)
 σ : 10° - Nº Comp.: 20

COPLA-SP

MOPLA-SP



689200

689600

690000

690400

690800

SISTEMA ETRS89, PROYECCIÓN U.T.M., REFERENCIA ALTIMÉTRICA AL N.M.M.A.
 ESCALA 1/8.000
 PLANO CON MDT TOPOBATIMÉTRICO DESDE ZONA DE PROPAGACIÓN DE LOS OLEAJES
 EQUIDISTANCIAS:
 0.5 M. EN FRANJA DE ROMPIENTES HASTA LA ISOBATA -30
 1 M. DESDE LA ISOBATA -30 HASTA LA -50
 2 M. DESDE LA -50 A INDEFINIDAS

4828800

4828800

4828400

4828400

4828000

4828000

4827600

4827600

4827200

4827200

4826800

4826800

4826400

4826400

4826000

4826000

REFERENCIA
 ALTIMÉTRICA
 N.M.M.A.

- 25 - 30
- 20 - 25
- 15 - 20
- 12 - 15
- 10 - 12
- 8 - 10
- 6 - 8
- 4 - 6
- 2 - 4
- 0 - 2
- -10 - 0
- -30 - -10
- -50 - -30
- -69.478 - -50

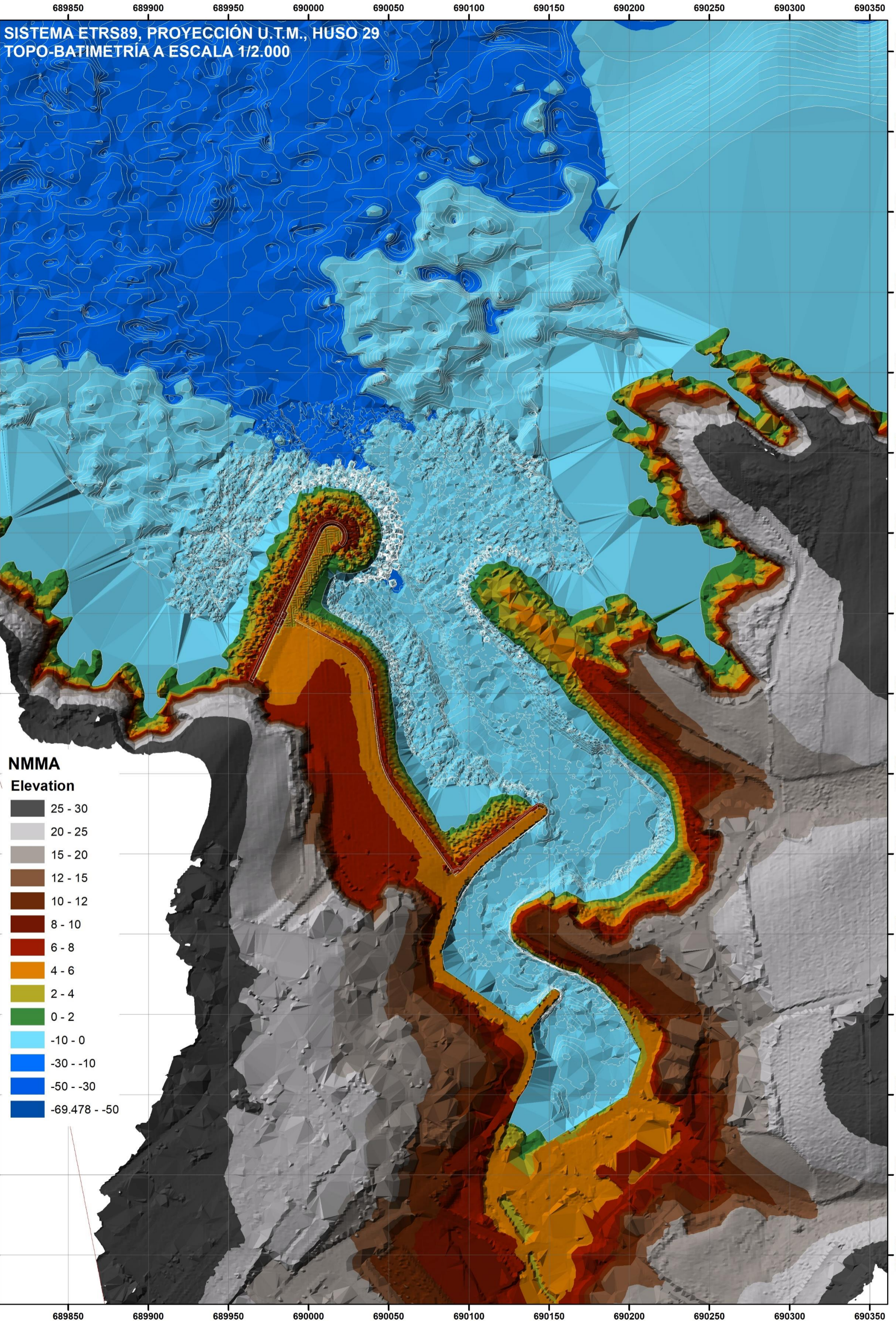
689200

689600

690000

690400

690800

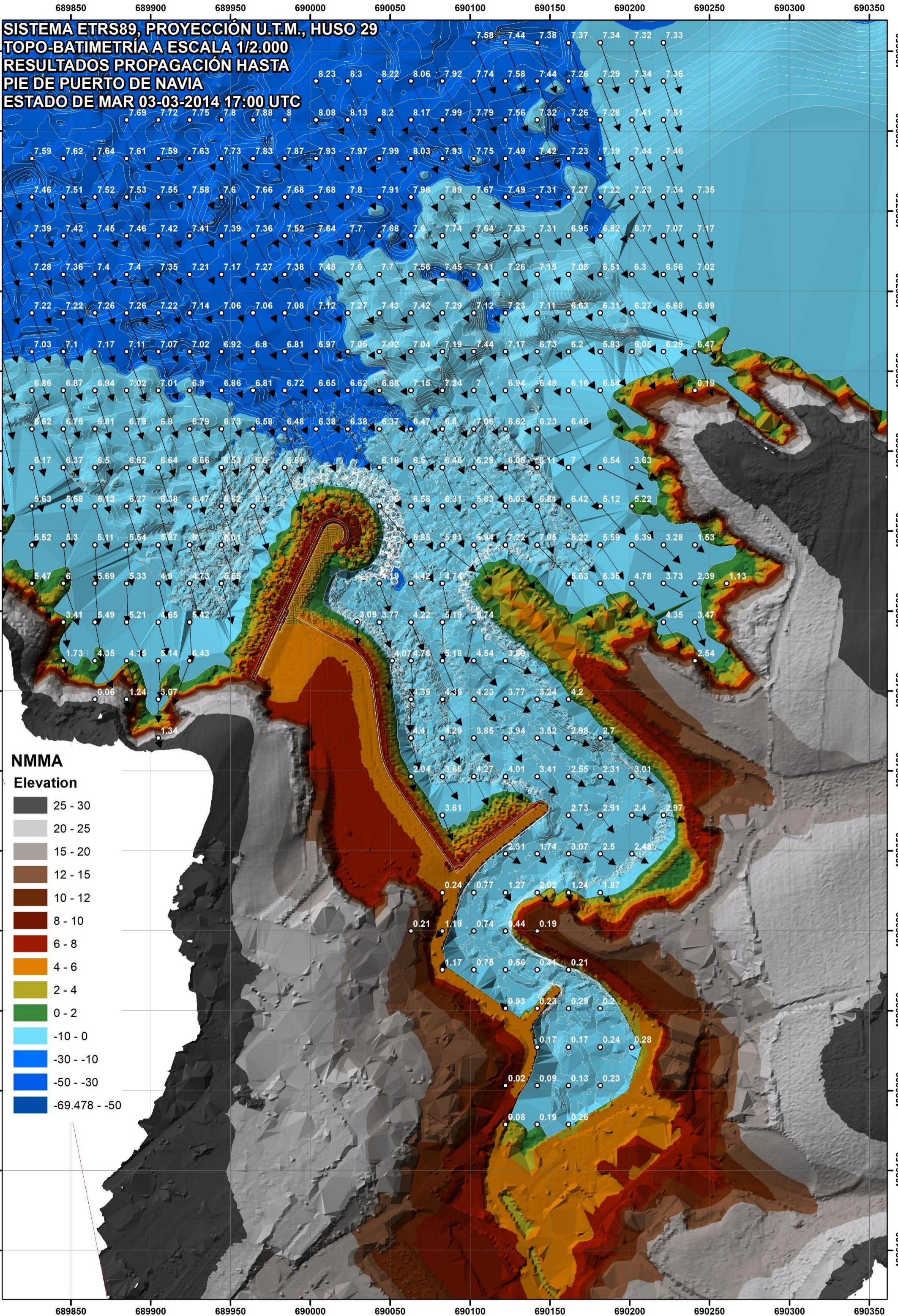


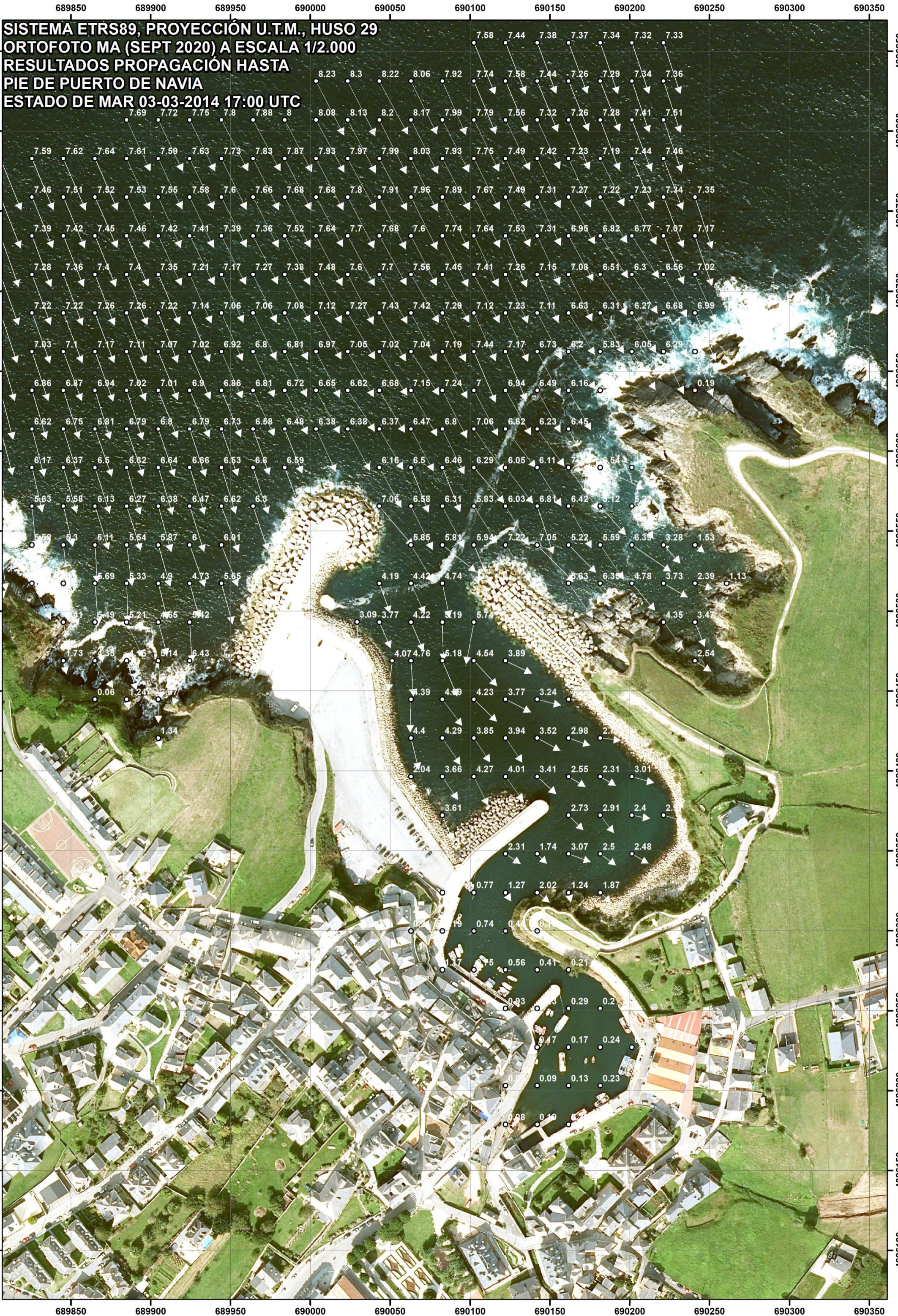
SISTEMA ETRS89, PROYECCIÓN U.T.M., HUSO 29
TOPO-BATIMETRÍA A ESCALA 1/2.000

NMMA

Elevation

- 25 - 30
- 20 - 25
- 15 - 20
- 12 - 15
- 10 - 12
- 8 - 10
- 6 - 8
- 4 - 6
- 2 - 4
- 0 - 2
- 10 - 0
- 30 - -10
- 50 - -30
- 69.478 - -50







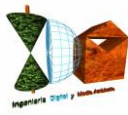
4. CÁLCULOS DE RUN-UP, Y REBASES DEL OLEAJE

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 ha tenido en cuenta en el presente estudio de alcance de oleajes en el tramo de costa de Puerto de Vega, T.M. de Navia, Asturias, un tratamiento de morfología de estructuras, y en concreto de diques en talud, para los cálculos del alcance de los oleajes sobre las superficies emergidas, en los que se aplica para el cálculo de los alcances de oleajes sobre su talud con manto de piezas cúbicas (dique oeste) y escollera (explanada), formulaciones semiempíricas desarrolladas por varios autores para la estimación del run-up.

El Run up en estructuras depende principalmente de la pendiente de la superficie emergida de incidencia dado por el talud del manto principal. Asimismo, el run-up también depende en estructuras de la profundidad a pie de talud, de la rugosidad y porosidad de la superficie de incidencia de la morfología y de su geometría, así como de la altura de ola incidente, periodo, dirección y ancho espectral del oleaje. En el presente estudio, al haberse realizado propagaciones hasta el frente de costa por simuladores computacionales basados en modelos numéricos y haberse obtenido la altura de ola hasta pie de la morfología emergida, se tomará como profundidad a pie de talud, la profundidad teniendo en cuenta la marea correspondiente a cada estado de mar y su set-up asociado, y la misma será determinada por la posición de los nodos en los que ha proporcionado el software los valores de H_{sp} altura de ola propagada frente al tramo de estudio y que serán tomados como valores de altura de ola de cálculo para el run-up.

La imposibilidad de formular una ley única y general que cubriera todas las situaciones posibles en cuanto a tipo de oleaje, oblicuidad, existencia de bermas, disparidad de estructuras, etc., instigó a autores como Ahrens y McCartney (1975) y Ahrens y Titus (1985), Losada y Giménez-Curto (1979) y Van der Meer y Janssen (1995) a realizar la mayor parte de estudios en este tipo de estructuras a partir de aproximaciones al problema específico.



De esta forma se obtendrá el run-up con formulaciones semiempíricas de cálculo sobre estructuras artificiales a partir de las alturas de ola propagadas a pie de costa por el software Oluca-SP espectral simuladas computacionalmente sobre el MDT topobatimétrico generado, con una de las formulaciones semiempíricas implementadas en el módulo del software SMC para cálculo de run-up sobre diques (módulo TIC), la de Van der Meer y Janssen (1995), seleccionada en este caso dado que considera la dirección de incidencia de la ola propagada respecto a la estructura, y además es el mismo autor que desarrolló un modelo para la estimación de los cálculos del volumen de rebase en diques de escollera.

La expresión de la formulación de Van der Meer y Janssen (1995) tiene la siguiente expresión general:

$$\frac{R_U}{H_i} = 1.6\gamma_h\gamma_f\gamma_B\xi_{op}$$

Ru = Run-up o remonte de la ola

H_i = Altura de ola incidente sobre el talud (se estimará con valores de alturas máximas al tratarse de obtener los 5 máximos niveles en un período de 5 años)

ξ_{op} = el parámetro de rotura de Iribarren ó de similitud de surf

$$\xi_{op} = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{s_{op}}}$$

s_{op}=peralte de la ola.

Siendo:

tanα=pendiente del talud acantilado

s_{op}=H_i/ L₀

L₀ = longitud de onda en aguas profundas

$$L_0 = (gT_p^2 / 2\pi)$$

γ_h = factor por limitación de profundidad a pie de talud

$$\gamma_h = 1 - 0,03 \left(4 - \frac{h}{H_i}\right)^2 \text{ para } \frac{h}{H_i} < 4,$$

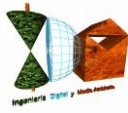
$$\gamma_h = 1 \text{ para } \frac{h}{H_i} \geq 4$$

h=profundidad a pie de talud teniendo en cuenta nivel mareal+set-up

γ_f = factor de reducción de la pendiente y la rugosidad

γ_β = factor de reducción por la oblicuidad de las olas incidentes.

γ_β = 1-0,0022B siendo B el ángulo de incidencia en grados sexagesimales de la ola incidente respecto al talud acantilado



En este tipo de formulaciones que relacionan el ascenso del oleaje adimensionalizado con la altura de ola incidente (la propagada a pie de costa emergida) y el número de Iribarren y que son válidas para taludes lisos, el avance de las olas sobre la superficie emergida se da en términos del número de Iribarren en aguas profundas utilizando la altura de las olas locales (I_{rop}), razón por la cual resulta fundamental una propagación con software de modelado costero que simule la propagación hasta pie de costa emergida como la realizada con Oluca-SP espectral, no generando dudas sobre su importancia cuando las olas rompen como olas que se precipitan o se derraman en la pendiente emergida.

Para los cálculos de rebase del oleaje sobre el dique oeste y escollera en la plataforma al trasdós del mismo, se ha empleado la formulación del mismo autor Van der Meer y Janssen (1995), en cuyo modelo se propone una formula empírica basada en numerosos ensayos de laboratorio con oleaje irregular, y que está implementada en el módulo TIC del SMC (IH de la Universidad de Cantabria). La formulación que proporciona el valor del caudal medio por unidad de estructura (q_r) es la siguiente:

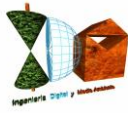
$$Q_b = 0.06 \exp(-4.7 R_b) \quad \text{si } I_{rop} < 2$$

Donde

$$Q_b = \frac{q_r}{\sqrt{g H_s^3}} \sqrt{\frac{S_{op}}{\tan \alpha}}$$
$$R_b = \frac{F}{H_s} \frac{\sqrt{S_{op}}}{\tan \alpha} \frac{1}{\gamma_h \gamma_f \gamma_\beta}$$

$$S_{op} = \frac{2\pi H_s}{g T_p^2}$$

q_r = caudal medio de rebase, por unidad de anchura
 F = francobordo de la estructura
 T_p = periodo de pico



$$Q_n = 0.2 \exp(-2.3 R_n) \quad I_{rop} \geq 2$$

Donde

$$Q_n = \frac{q_r}{\sqrt{g H_s^3}}$$

$$R_n = \frac{F}{H_s} \frac{1}{\gamma_h \gamma_f \gamma_\beta}$$

γ_h , γ_f , γ_β = mismos factores reductores que los empleados en la formulación de run-up de este mismo autor, salvo para $\gamma_\beta = 1 - 0.0033 \cdot B$ con B en grados.

Una vez incrementados los run-up con los respectivos niveles mareales obtenidos del mareógrafo del Puerto de Gijón con referencia al N.M.M.I. (obtenidos en el apartado 2.2), se les deberá añadir también los niveles del set-up correspondiente del estado de mar seleccionado del Punto Simar analizado 3068038, los cuales serán obtenidos con la formulación de Longuet-Higgins y Stewart (1963-1964), que determina que el flujo de momento de las olas, es el responsable del fenómeno del set-up, habiéndose verificado por ensayos de campo y detallados ensayos de laboratorio, llegándose a la ecuación para la obtención del mismo mediante la siguiente expresión:

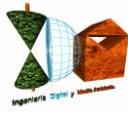
$$\text{Set up max} = \eta_{\max} = 0,15 \cdot h_b - \frac{g^{1/2}(H_0)^2 T}{64 \cdot \pi \cdot h_b}$$

η_{\max} =set-up por oleaje en nivel de rompientes

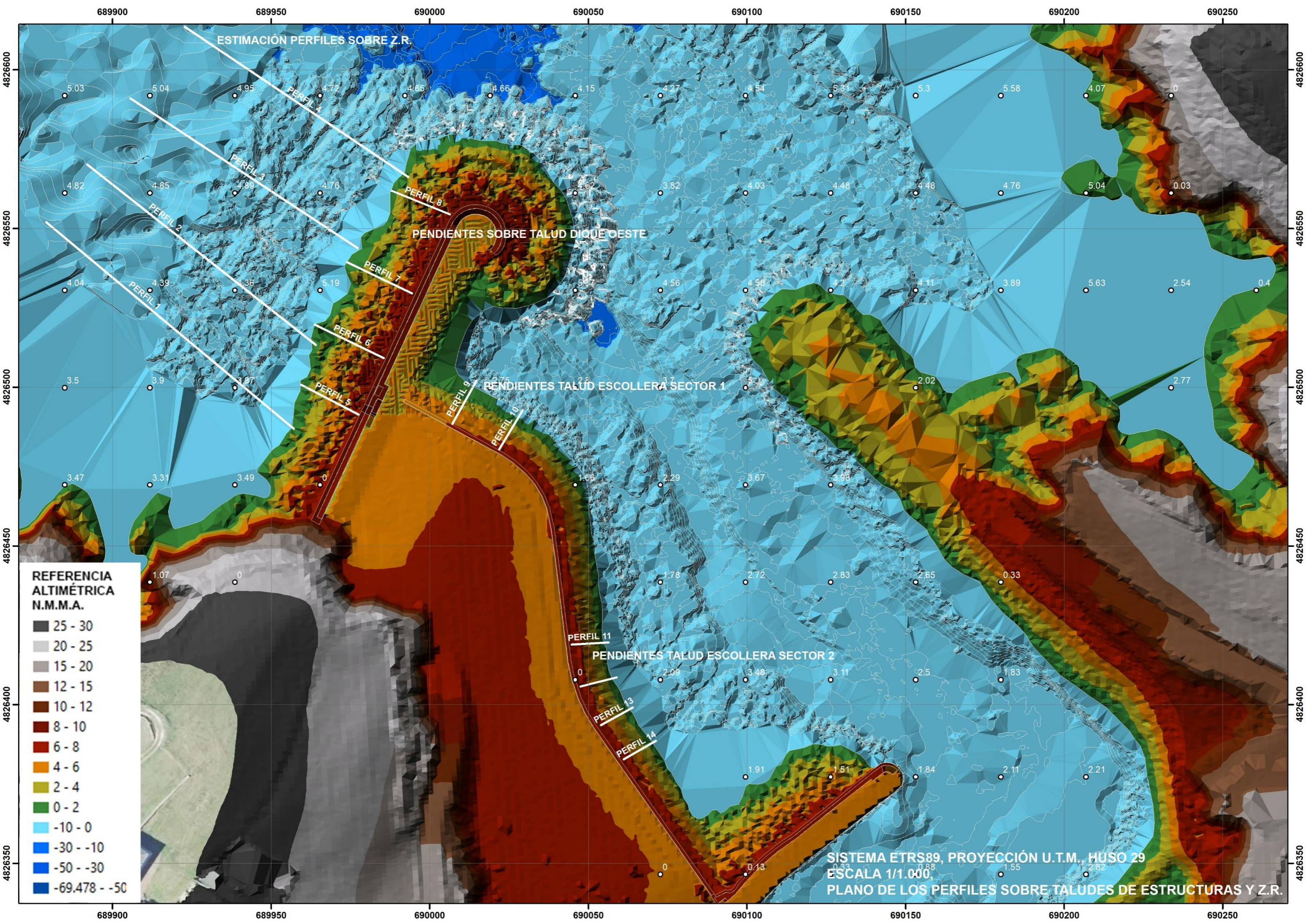
h_b =profundidad de rotura

T=período de la ola

H_0 =altura de ola en profundidades indefinidas



Las siguientes tablas recogen los resultados de run-up con el modelo de Van Der Meer y de rebases calculados por transecto de incidencia sobre las estructuras para cada estado de mar propagado, así como los incrementos mareales y set-up del estado de mar, y previamente a las mismas, planos a escala 1/1.000 con los transectos de incidencia trazados desde los vectores de oleaje a pie de dique y a pie de escollera de explanada sobre MDT en cada uno de los estados de mar. Asimismo, se adjunta plano a escala 1/1.000 con los perfiles sobre los taludes de las estructuras a partir de los cuales se obtuvieron las distintas pendientes promedio necesarias para los cálculos efectuados, de la zona de rotura (para las profundidades de rotura) y de los taludes de las estructuras, a partir del MDT generado mediante aplicación informática en entorno GIS que calcula sobre el mismo aplicando la función de ajuste por mínimos cuadrados, y la tabla de resultados de los mismos:



ESTIMACIÓN PERFILES SOBRE Z.R.

PENDIENTES SOBRE TALUD DIQUE OESTE

PENDIENTES TALUD ESCOLLERA SECTOR 1

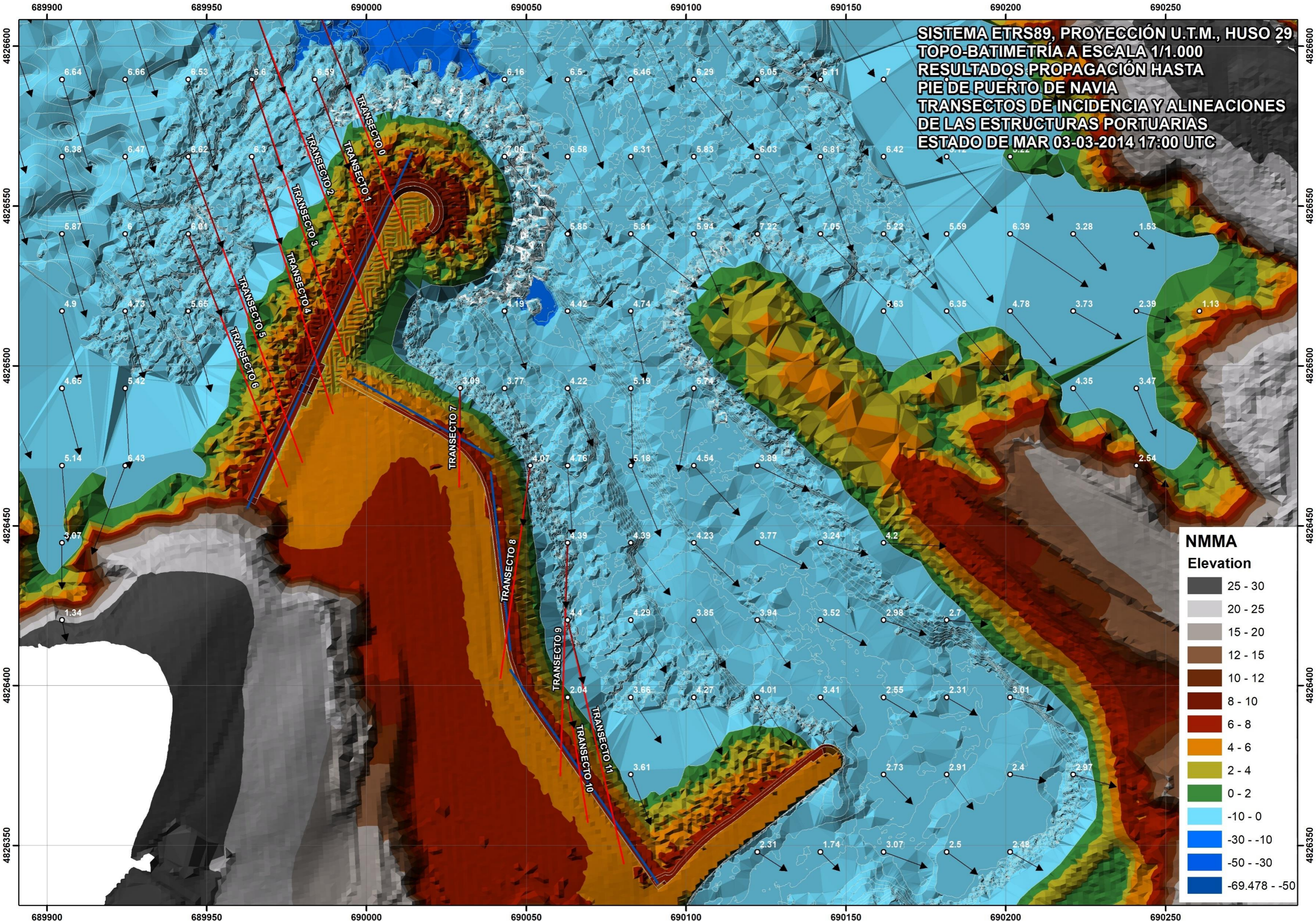
PENDIENTES TALUD ESCOLLERA SECTOR 2

REFERENCIA ALTIMÉTRICA N.M.M.A.

25 - 30
20 - 25
15 - 20
12 - 15
10 - 12
8 - 10
6 - 8
4 - 6
2 - 4
0 - 2
-10 - 0
-30 - -10
-50 - -30
-69.478 - -50

SISTEMA ETRS89, PROYECCIÓN U.T.M., HUSO 29
 ESCALA 1/1.000,
 PLANO DE LOS PERFILES SOBRE TALUDES DE ESTRUCTURAS Y Z.R.

**SISTEMA ETRS89, PROYECCIÓN U.T.M., HUSO 29
 TOPO-BATIMETRÍA A ESCALA 1/1.000
 RESULTADOS PROPAGACIÓN HASTA
 PIE DE PUERTO DE NAVIA
 TRANSECTOS DE INCIDENCIA Y ALINEACIONES
 DE LAS ESTRUCTURAS PORTUARIAS
 ESTADO DE MAR 03-03-2014 17:00 UTC**



NMMA
Elevation

Dark Grey	25 - 30
Light Grey	20 - 25
Medium Grey	15 - 20
Brown	12 - 15
Dark Brown	10 - 12
Red-Brown	8 - 10
Red	6 - 8
Orange	4 - 6
Yellow-Green	2 - 4
Green	0 - 2
Light Blue	-10 - 0
Blue	-30 - -10
Dark Blue	-50 - -30
Very Dark Blue	-69.478 - -50



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

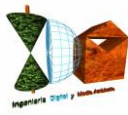
TABLA DE PENDIENTES OBTENIDAS POR AJUSTE POR MÍNIMOS CUADRADOS SOBRE EL MDT

REFERENCIA PERFIL	ESTRUCTURA	PENDIENTE AJUSTE MÍNIMOS CUADRADOS SOBRE MDT	PROMEDIO ZR	PROMEDIO DIQUE OESTE	PROMEDIO ESCOLLERA SECTOR 1	PROMEDIO ESCOLLERA SECTOR 2
1	ZONA ROMPIENTES	0.01544079917	0.0386810298	0.314476835	0.690534482	0.63991528
2	ZONA ROMPIENTES	0.03086843277				
3	ZONA ROMPIENTES	0.04173563515				
4	ZONA ROMPIENTES	0.06667925207				
5	DIQUE OESTE	0.25667049192				
6	DIQUE OESTE	0.30854030747				
7	DIQUE OESTE	0.34696327333				
8	DIQUE OESTE	0.34573326785				
9	ESCOLLERA SECTOR 1	0.66923046573				
10	ESCOLLERA SECTOR 1	0.71183849758				
11	ESCOLLERA SECTOR 2	0.69119163726				
12	ESCOLLERA SECTOR 2	0.61961471179				
13	ESCOLLERA SECTOR 2	0.62540061238				
14	ESCOLLERA SECTOR 2	0.62345417312				



TABLA CON LOS RESULTADOS POR TRANSECTO DEL CAUDAL MEDIO DE REBASE OBTENIDO CON EL MODELO DE VAN DER MEER CALCULADOS CON EL OLEAJE CORRESPONDIENTE AL ESTADO DE MAR DE 03-03-2014 A LAS 17:00 UTC, DE MÁXIMO POTENCIAL DE INUNDACIÓN SEGÚN EL ANÁLISIS DEL CLIMA MARÍTIMO EN EL PERÍODO 1995-2023 PROPAGADO EN LOS NODOS A PIE DE TALUD INCIDENTES SOBRE LA EXPLANADA

TRANSECTO	H _{sp} (m.)	T _p (seg.)	nivel-mar (m.)	L ₀ (m.)	pte. estruct. promedio	I _{rop} (Iribar.)	SETUP Prom. (m.)	d _{pie} (set-up marea)	ANG. PROP. INCID talud (° SEX.)	S _{op}	γ _h	γ _f	γ _B run-up	γ _B rebase	RUNUP V.D.M. (m.)	Fc (francob.) MAREA + SETUP (m.)	REBASE V.D.M. (m ³ /seg*m)
TRANS 0	6.48	18.55	2.49	536.70	0.3145	2.862	1.83	14.94	46.28	0.012	0.9138	0.85	0.8982	0.8473	14.467	5.29	0.5953
TRANS 1	6.59	18.55	2.49	536.70	0.3145	2.838	1.83	13.44	45.95	0.012	0.8847	0.85	0.8989	0.8484	14.254	5.29	0.5859
TRANS 2	6.58	18.55	2.49	536.70	0.3145	2.840	1.83	13.82	45.90	0.012	0.8917	0.85	0.8990	0.8485	14.348	5.29	0.5958
TRANS 3	6.6	18.55	2.49	536.70	0.3145	2.836	1.83	13.95	46.93	0.012	0.8932	0.85	0.8968	0.8451	14.379	5.29	0.5997
TRANS 4	6.3	18.55	2.49	536.70	0.3145	2.903	1.83	13.44	48.35	0.012	0.8955	0.85	0.8936	0.8404	13.713	5.29	0.4834
TRANS 5	6.62	18.55	2.49	536.70	0.3145	2.832	1.83	10.77	45.03	0.012	0.8310	0.85	0.9009	0.8514	13.481	3.78	1.2002
TRANS 6	6.01	18.55	2.49	536.70	0.3145	2.972	1.83	9.46	43.87	0.011	0.8234	0.85	0.9035	0.8552	12.161	3.78	0.8223
TRANS 7	3.09	18.55	2.49	536.70	0.6905	9.101	0.81	6.02	29.02	0.006	0.8736	0.85	0.9362	0.9042	8.087	3.34	0.1460
TRANS 8	4.07	18.55	2.49	536.70	0.6905	7.930	0.81	5.42	75.62	0.008	0.7865	0.85	0.8336	0.7505	8.539	3.34	0.2097
TRANS 9	4.39	18.55	2.49	536.70	0.6399	7.076	0.81	6.92	53.92	0.008	0.8237	0.85	0.8814	0.8221	10.199	3.36	0.4274
TRANS 10	2.04	18.55	2.49	536.70	0.6399	10.379	0.81	5.35	64.50	0.004	0.9430	0.85	0.8581	0.7872	5.282	3.39	0.0106
TRANS 11	4.4	18.55	2.49	536.70	0.6399	7.067	0.81	7.02	68.36	0.008	0.8265	0.85	0.8496	0.7744	9.887	3.39	0.3622



5. VOLÚMENES DE REBASE DEL TEMPORAL QUE CUMPLE CON EL CRITERIO REGLAMENTARIO

Para estimar el volumen de rebase que determinará la superficie de inundación al trasdós del dique en talud oeste del Puerto de Vega a partir del temporal que cumple con el criterio reglamentario de mayor temporal conocido, utilizándose las máximas olas registradas o calculadas a partir de registros de boyas o satélites, o datos oceanográficos o meteorológicos, se han realizado los cálculos con el estado de mar de 03-03-2014 a las 17:00 UTC, dado que resultó tener el máximo potencial de inundación según el análisis del clima marítimo realizado sobre la base de iteraciones con un modelo de inundación basado en un run-up de estructuras (Ahrens) con adición de los incrementos mareales correspondientes, aplicado sobre 243.281 estados de mar tomados sus parámetros de oleaje del Punto Simar 3068038 de Puertos del Estado, en un período comprendido entre 1995-2023, máximo período con datos sincronizables horarios de oleajes y mareas. Dicho análisis ha tenido a su vez apoyo en los resultados del estudio de abril de 2021 denominado “ESTIMACIÓN DEL ALCANCE DE OLEAJES EN LA EXPLANADA AL TRASDÓS DEL DIQUE OESTE DE PUERTO DE VEGA, EN EL T.M. DE NAVIA, ASTURIAS”, dado que los temporales que fueron propagados en dicho estudio se encuentran en posiciones inferiores en cuanto al potencial de inundación en potencial de inundación según el análisis actual sobre el período 1995-2023, y los mismos fueron propagados en dicho estudio habiendo resultado todos ellos con valores propagados a pie de las estructuras del Puerto de Navia, con valores inferiores de alturas de ola propagadas al estado de mar de 03-03-2014 17:00 UTC, lo cual ha simplificado a la vez que confirmado el resultado de las iteraciones previas a la propagación realizadas, y en consecuencia la deducción del temporal con el máximo potencial de alcance de oleajes del período máximo de datos disponible con posibilidad de sincronización de datos horarios de oleajes y mareas comprendido entre 1995-2023, dado que dicho estado (03-03-2014 17:00 UTC) tenía otros cuatro estados de mar de margen del mismo día 3 de marzo de 2014, sobre el resto de estados de mar de otros temporales entre los que se encuentran los propagados en dicho estudio anterior.

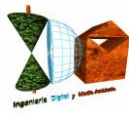


Una vez realizadas las propagaciones y realizados los cálculos en apartados anteriores con el estado de mar de 03-03-2014 a las 17:00 UTC habiéndose obtenido los remotes y los rebases unitarios sobre las estructuras del Puerto de Navia, que en función del análisis realizado son los máximos del período 1995-2003, se procede a calcular los volúmenes de un rebase simple asociado a dicho estado de mar, dado que se establece como hipótesis de cálculo la consideración de la no acumulación de los rebases a lo largo del espectro de mar de la hora asociable al mismo (el espectro se compone de varios armónicos o conjunto de valores cuya H_s o H_{m0} es la que proporciona Puertos del estado).

En consecuencia, se realiza la estimación sobre cada rebase individual, valorándose la misma a partir del caudal medio unitario obtenido anteriormente, actuando en un intervalo temporal correspondiente al período medio del estado de mar ($T_m < T_p$), es decir, asignándole un volumen de rebase medio por ola obtenido a partir del período medio del estado de mar.

De esta forma, se considera el volumen medio de rebase de una ola con el caudal medio de rebase actuando durante un tiempo T_m (período medio), calculándose el volumen medio de rebase por ola por cada transecto (vector de ola propagada), asignándole a cada uno (transecto) una distancia media resultante de repartir la longitud de la estructura con vectores de oleaje incidentes según la propagación obtenida sobre el MDT topo-batimétrico en la zona de rebase entre el nº de transectos incidentes para la obtención del volumen total de rebase medio de cada ola del estado de mar, en función de la longitud del dique y el número de nodos con incidencia a pie de cada sector.

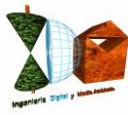
Los resultados por transecto y totales para el estado de mar de 03-03-2014 17:00 que cumple con el criterio reglamentario (máximo conocido) han sido los siguientes:



SECTORES	TRANSECTO	Hspp (propagada) m.	Tm (seg.)	ANCHURA x TRANSECTO (m.)	qr (REBASE UNITARIO) (m ³ /seg*m)	VOLUMENES REBASE (m ³)
DIQUE-MORRO	TRANS 0	6.48	14.61	11.75	0.5953	102.17
DIQUE-MORRO	TRANS 1	6.59	14.61	14.45	0.5859	123.65
DIQUE-MORRO	TRANS 2	6.58	14.61	14.35	0.5958	124.88
DIQUE-MORRO	TRANS 3	6.6	14.61	14.45	0.5997	126.58
DIQUE-EXPLANADA	TRANS 4	6.3	14.61	19.55	0.4834	138.03
DIQUE-EXPLANADA	TRANS 5	6.62	14.61	12.25	1.2002	214.75
DIQUE-EXPLANADA	TRANS 6	6.01	14.61	10.00	0.8223	120.11
SECTOR 1	TRANS 7	3.09	14.61	7.00	0.1460	14.92
SECTOR 2	TRANS 8	4.07	14.61	8.00	0.2097	24.50
SECTOR 3	TRANS 9	4.39	14.61	10.00	0.4274	62.43
SECTOR 3	TRANS 10	2.04	14.61	10.00	0.0106	1.54
SECTOR 3	TRANS 11	4.4	14.61	5.00	0.3622	26.45

El resumen de los datos de volúmenes medios de rebase en un período medio de una incidencia de oleaje del estado de mar 03-01-2018 a las 16:00 horario U.T.C. fue:

VOL. REBASE DIQUE EN EXTENSIÓN A MORRO (m ³)	VOL. REBASE EN EXPLANADA 1 (PARTE DIQUE + SECTOR 1 ESCOLLERA) (m ³)	VOL. REBASE EN EXPLANADA 2 (SECTOR 2 Y 3 ESCOLLERA) (m ³)	VOL. REBASE TOTAL EXPLANADA (m ³)
477.28	487.81	114.93	602.74



6. CALIBRACIÓN DE LA RELACIÓN VOLUMEN DE REBASE – SUPERFICIE DE INUNDACIÓN A PARTIR DEL TEMPORAL DE 10-03-2008

Se incluye a continuación el presente apartado, análogo al que ya fue incluido en el estudio “ESTIMACIÓN DEL ALCANCE DE OLEAJES EN LA EXPLANADA AL TRASDÓS DEL DIQUE OESTE DE PUERTO DE VEGA, EN EL T.M. DE NAVIA, ASTURIAS”, al objeto de utilizar su resultado para el cálculo de la superficie resultante con los volúmenes de rebase obtenidos con el estado de mar de 03-03-2014 a las 17:00 UTC.

Para estimar la superficie de inundación, se procede a partir de los datos del temporal de 10-03-2008 dado que se dispone de un reportaje gráfico que refleja los alcances de las olas sobre la explanada al trasdós del dique oeste y escollera de protección que bordea la misma, tras rebasar ambas estructuras de protección, así como de la trasposición de dichos alcances superficiales sobre plano y ortofoto (documentos georreferenciados) realizados en el informe técnico denominado “INFORME TÉCNICO SOBRE LA DETERMINACIÓN DE LA RIBERA DEL MAR Y SERVIDUMBRE DE PROTECCIÓN PARTIENDO DEL ALCANCE COMPROBADO DE LAS OLAS SOBRE LA AMPLIACIÓN DEL PUERTO EN PUERTO DE VEGA (ASTURIAS)” realizado por el Ingeniero de Caminos Canales y Puertos D. Juan José González Fernández, a instancias del recurso presentado por D. Luis Jáñez Escalada.

Considerándose correcta dicha trasposición sobre plano y ortofoto de los límites alcanzados por la lámina de agua de los volúmenes de rebase reflejados en el reportaje fotográfico de fecha 10-03-2008, y en consecuencia, de la georreferenciación derivada de la misma, lo que permite conocer la superficie que fue alcanzada por el rebase de la incidencia de un frente de oleaje de dicho temporal en coordenadas de un sistema cartográfico. A este efecto, se han obtenido las coordenadas del límite y superficie de inundación propuesta en dicho informe como resultado de la trasposición de las superficies inundadas en las imágenes fotográficas, en el vigente sistema cartográfico ETRS89, disponiéndose de la misma sobre el MDT topobatimétrico generado en el presente estudio.



Esta circunstancia permite, realizando el análisis del estado de mar de 10-03-2008 que pudiera corresponderse con las superficies inundadas de la explanada portuaria al trasdós del dique oeste, recogidas en las imágenes fotográficas que fueron utilizadas en el citado informe técnico realizado a instancia de interesado, procediendo con dicho estado de mar análogamente a las propagaciones y cálculos realizados con el estado de mar de máximo potencial de inundación del período 1995-2023 para obtener sus volúmenes de rebase según la metodología y modelos aplicados descritos en este estudio, establecer una relación promediada entre su volumen de rebase y la superficie constatada fotográficamente trasladada a superficie georreferenciada (según trasposición de informe técnico presentado por interesado), que pudiera aplicarse para obtener una superficie de inundación sobre la explanada a partir de los volúmenes teóricos obtenidos con los rebases medios de olas del estado de mar de 03-03-2014 a las 17:00 U.T.C.

Con este propósito, se ha realizado la propagación del estado de mar de 10-03-2008 a las 17:00 horario U.T.C., dado que se trata del estado de mar de registro superior (altura significativa y período de pico) de esa fecha con luz solar (según calendario solar de Asturias para dicho día), operando de esta forma desde el lado de la seguridad (jurídica) en el sentido de relacionar la superficie inundada recogida en las fotografías con los mayores registros del día en horario diurno (la fotografía está tomada durante el día), al objeto de que la relación obtenida esté asignada al mayor oleaje de ese día, y en consecuencia el espesor medio calculado de la lámina de agua de la superficie inundada, sea el mayor posible, lo que asegurará que la dimensión de la superficie calculada para el estado de mar de 03-03-2014 a las 17:00 U.T.C. según la relación del ratio volumen/superficie proporcionada por un estado de mar del día 10-03-2008, no esté sobredimensionada.

Efectivamente, la puesta de sol según el calendario solar en Asturias para el 10-03-2008 se produjo a las 18:15 horario U.T.C., por lo que se ha tomado como último registro con luz solar de ese día el de las 17:00 U.T.C., dado el carácter ascendente de las funciones que representan la altura de ola significativa y el período de pico en relación a las horas diurnas de esa fecha, según los datos de Puertos del Estado obtenidos del Punto Simar 3068038, tal y como se refleja en las siguientes ilustraciones, de forma que a las 17:00 U.T.C. se producía el estado de mar en horario diurno de mayores magnitudes del día 10-03-2008.

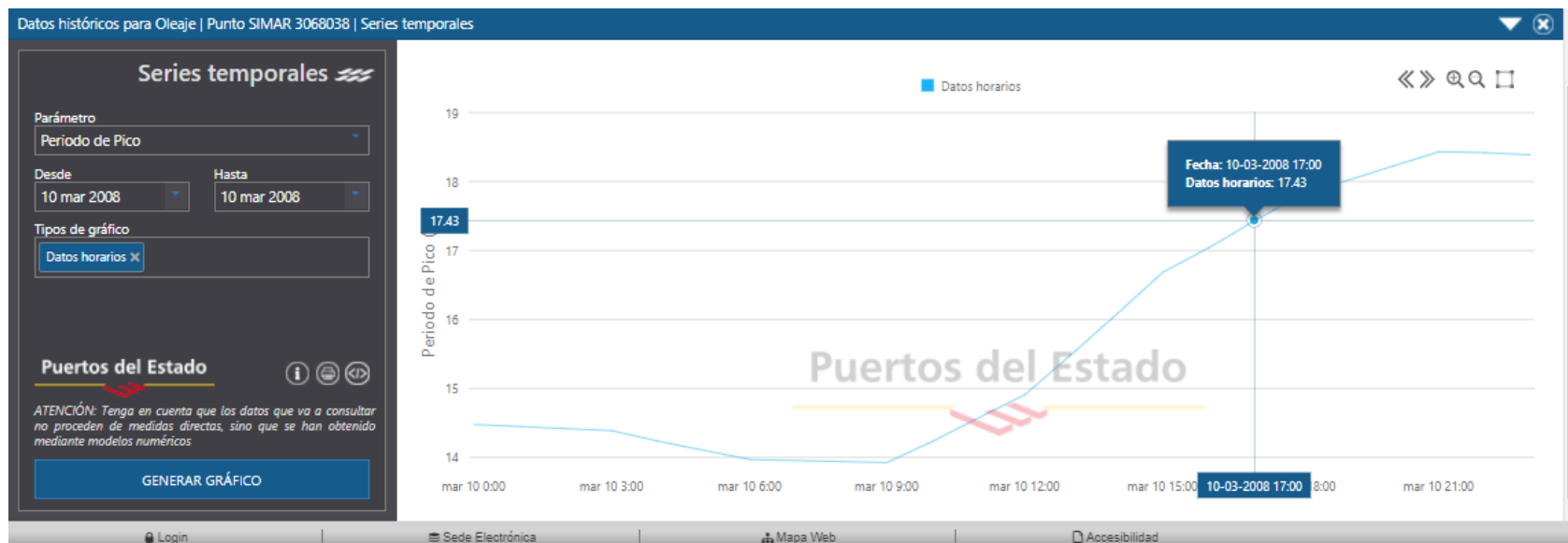
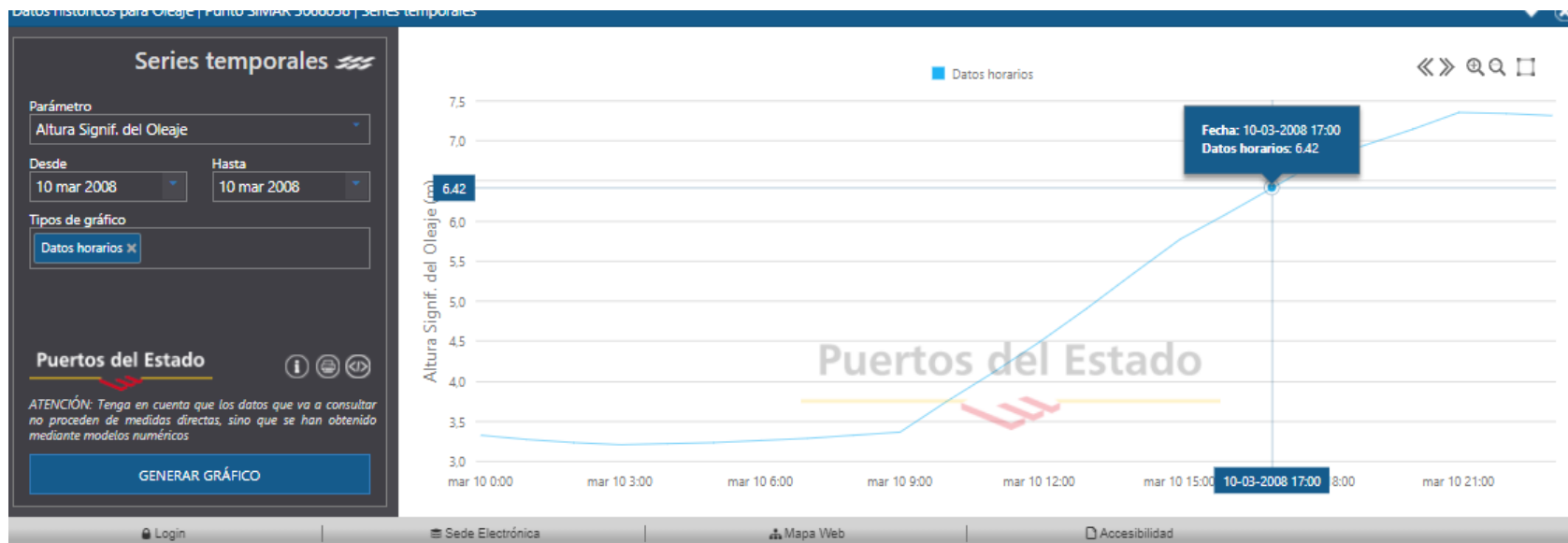


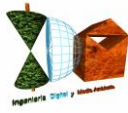
INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)

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

Los resultados de la propagación del estado de mar de 10-03-2008 a las 17:00 horario U.T.C. realizados a partir de los datos de partida del Punto Simar 3068038, se recogen en las fichas (malla de detalle a pie de estructuras) exportadas desde el software MOPLA (SMC) y sobre plano a escala 1/2.000 sobre MDT y sobre ortofoto.

Asimismo, se adjuntan las tablas con los resultados de alcance de oleaje (run-up, set-up, nivel mareal) y rebases sobre las estructuras del Puerto de Vega, y el plano a escala 1/1.000 con los transectos de incidencia sobre las estructuras portuarias.

Proyecto:

Gráfico: Altura de ola significativa

Caso espectral: LL18

LL:

18: ESTADO TEMPORAL 10/03/2008

Características de la simulación

OLUCA-SP

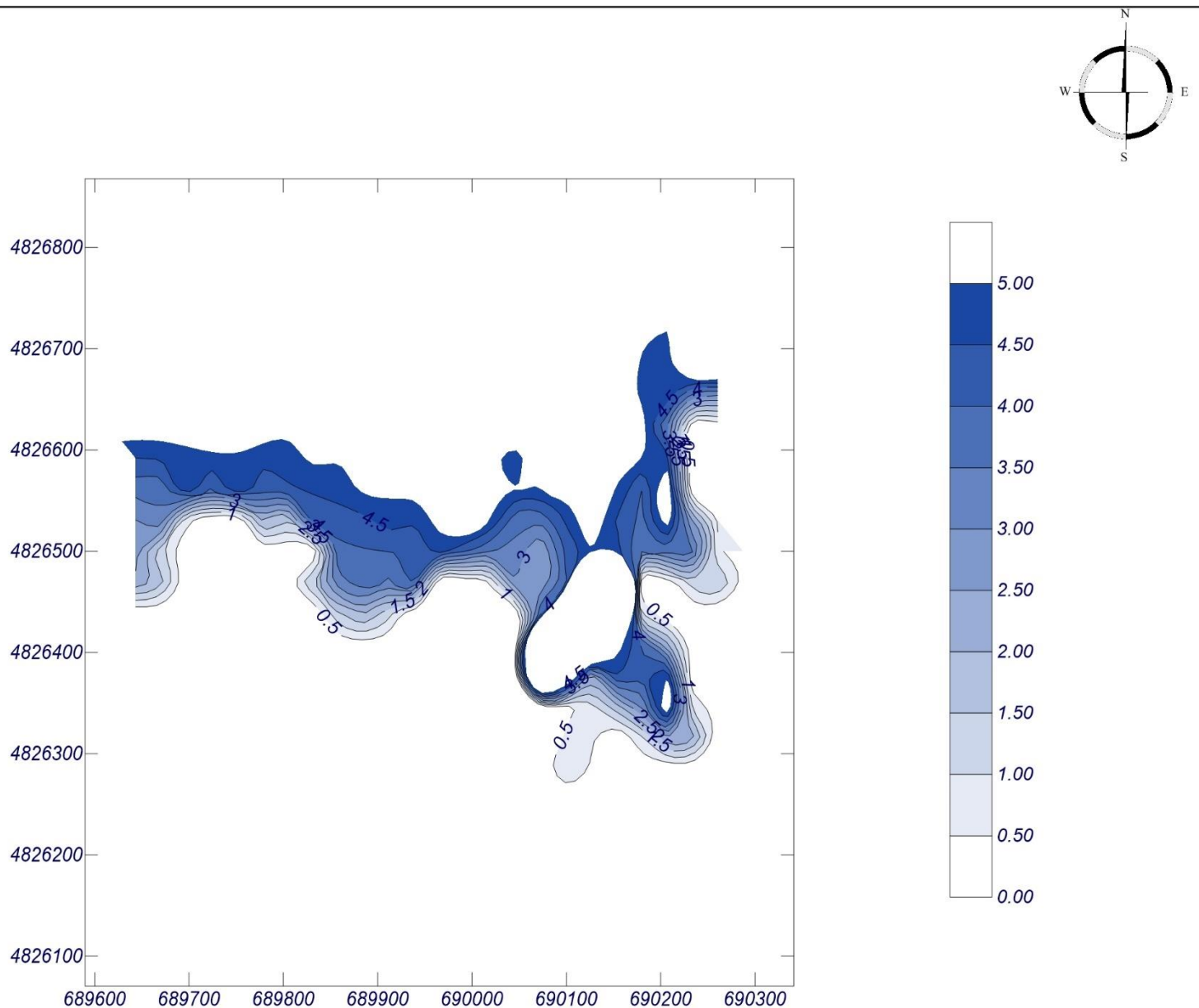
Espectro frecuencial (TMA)
Hs: 6.42 m
Tp: 11.5 s
fp: 0.0573723 Hz (Tp: 17.43 s)
 γ : 10
Nº Comp.: 20

Espectro direccional

θ_m : 15.25° (N24.0W)
 σ : 10° - Nº Comp.: 20

COPLA-SP

MOPLA-SP



Proyecto:

Gráfico: Gráfico combinado de topografía y vectores Hs

Caso espectral: LL18

LL:

18: ESTADO TEMPORAL 10/03/2008

Características de la simulación

OLUCA-SP

Espectro frecuencial (TMA)

Hs: 6.42 m

Tp: 17.43 s

γ : 10

Nº Comp.: 20

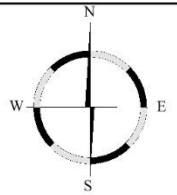
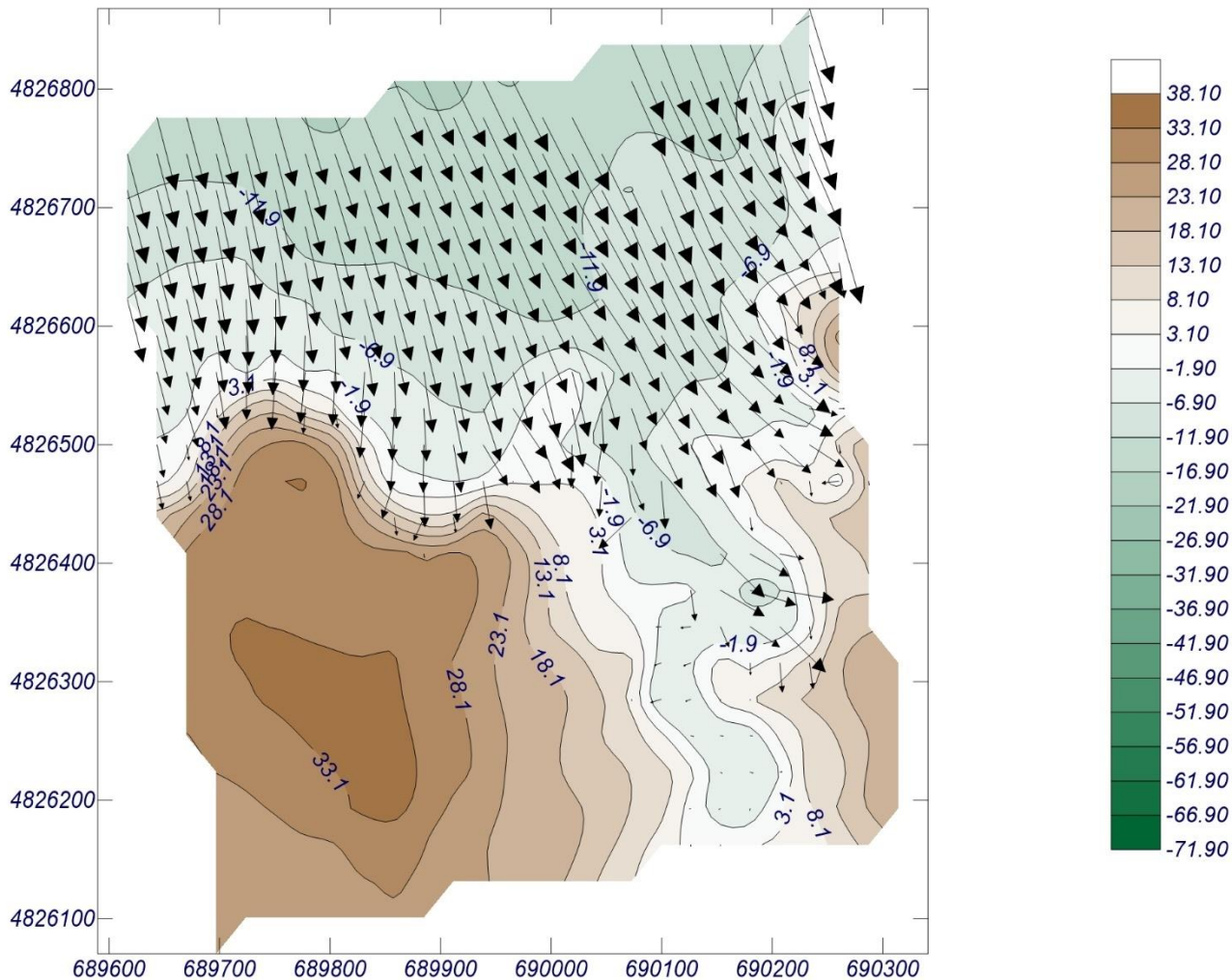
Espectro direccional

θ_m : 15.25° (N24.0W)

σ : 10° - Nº Comp.: 20

COPLA-SP

MOPLA-SP



1 cm = 7.000 m



Proyecto:

Gráfico: Vectores de la altura de ola significativa+Magnitud

Caso espectral: LL18

LL:

18: ESTADO TEMPORAL 10/03/2008

Características de la simulación

OLUCA-SP

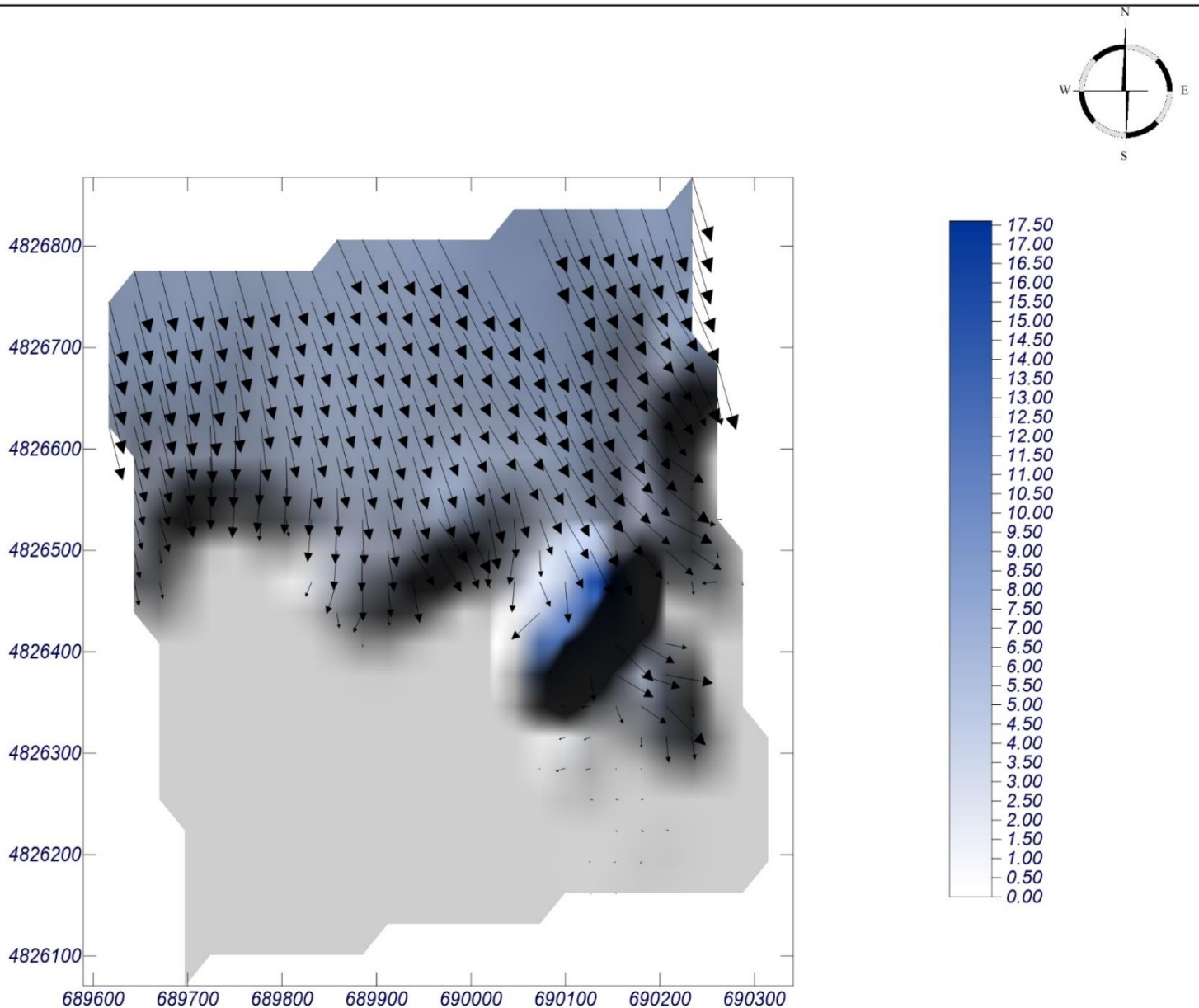
Espectro frecuencial (TMA)
Hs: 6.42 m
Tp: 11.5 s
fp: 0.0573723 Hz (Tp: 17.43 s)
 γ : 10
Nº Comp.: 20

COPLA-SP

MOPLA-SP

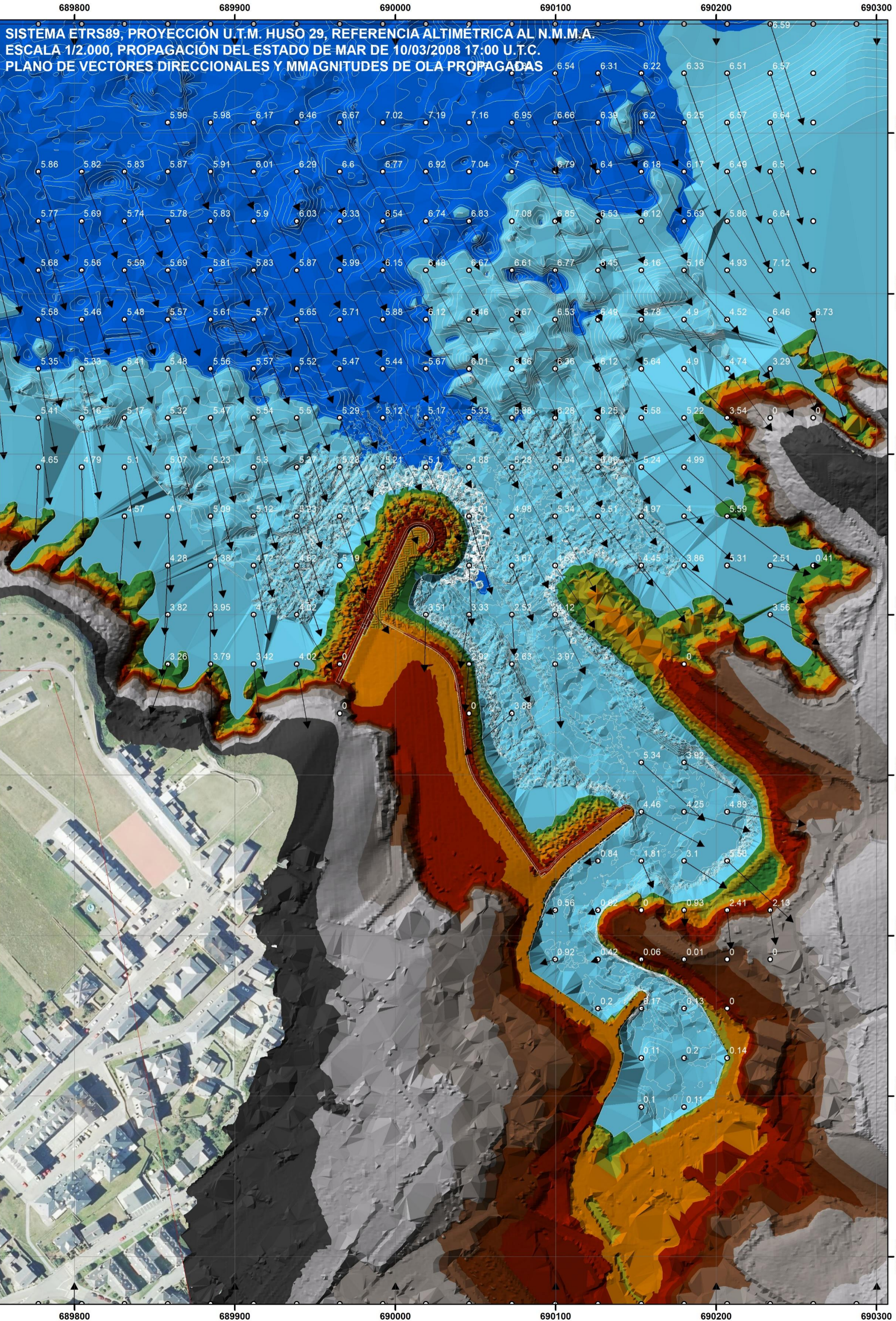
Espectro direccional

θ_m : 15.25° (N24.0W)
 σ : 10° - Nº Comp.: 20



1 cm = 7.000 m

0 7



SISTEMA ETRS89, PROYECCIÓN U.T.M. HUSO 29, REFERENCIA ALTIMÉTRICA AL N.M.M.A.
ESCALA 1/2.000, PROPAGACIÓN DEL ESTADO DE MAR DE 10/03/2008 17:00 U.T.C.
PLANO DE VECTORES DIRECCIONALES Y MMAGNITUDES DE OLA PROPAGADAS

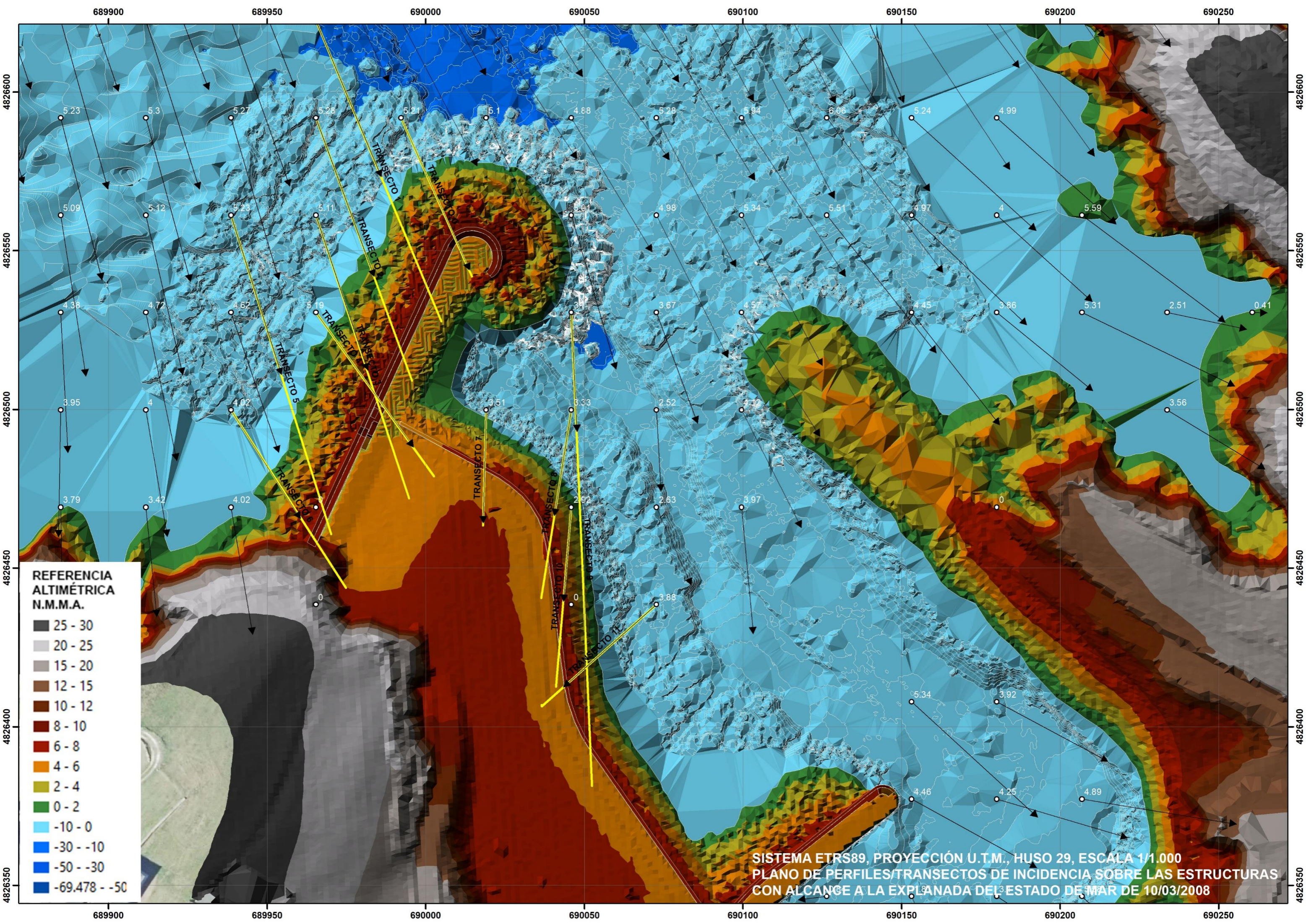
4826800
4826700
4826600
4826500
4826400
4826300
4826200
4826100

4826800
4826700
4826600
4826500
4826400
4826300
4826200
4826100

689800 689900 690000 690100 690200 690300

689800 689900 690000 690100 690200 690300





REFERENCIA ALTIMÉTRICA N.M.M.A.

25 - 30
20 - 25
15 - 20
12 - 15
10 - 12
8 - 10
6 - 8
4 - 6
2 - 4
0 - 2
-10 - 0
-30 - -10
-50 - -30
-69.478 - -50

SISTEMA ETRS89, PROYECCIÓN U.T.M., HUSO 29, ESCALA 1/1.000
 PLANO DE PERFILES/TRANSECTOS DE INCIDENCIA SOBRE LAS ESTRUCTURAS
 CON ALCANCE A LA EXPLANADA DEL ESTADO DE MAR DE 10/03/2008



TABLA CON EL RESULTADO POR TRANSECTO DEL CAUDAL MEDIO DE REBASE OBTENIDO CON EL MODELO DE VAN DER MEER CALCULADO CON EL OLEAJE PROPAGADO EN LOS NODOS A PIE DE TALUD INCIDENTES SOBRE LA EXPLANADA

fecha	TRANSEC.	H _{sp} (m.)	T _p (seg.)	nivel-mar (m.)	L ₀ (m.)	pte. estruct. promedio	I _{rop} (Iribar.)	SETUP (m.)	d _{pie} (set-up marea)	ANG. PROP. INCID talud (° SEX.)	S _{op}	γ _h	γ _f	γ _B run- up	γ _B rebase	RUNUP V.D.M. (m.)	Fc (francob.) MAREA + SETUP (m.)	REBASE V.D.M. (m ³ /seg*m)
2008-03-10 17:00:00	TRANS 0	5.21	17.43	2.319	473.94	0.31448	2.999	1.36	12.03	40.60	0.0110	0.9142	0.8500	0.9107	0.8660	11.80	5.93	0.1525
2008-03-10 17:00:00	TRANS 1	5.29	17.43	2.319	473.94	0.31448	2.977	1.36	14.08	42.24	0.0112	0.9463	0.8500	0.9071	0.8606	12.35	5.93	0.1840
2008-03-10 17:00:00	TRANS 2	5.28	17.43	2.319	473.94	0.31448	2.979	1.36	13.18	45.17	0.0111	0.9322	0.8500	0.9006	0.8509	12.06	5.93	0.1650
2008-03-10 17:00:00	TRANS 3	5.11	17.43	2.319	473.94	0.31448	3.029	1.36	7.80	46.86	0.0108	0.8165	0.8500	0.8969	0.8454	10.18	5.93	0.0766
2008-03-10 17:00:00	TRANS 4	5.19	17.43	2.319	473.94	0.31448	3.005	1.36	7.63	29.27	0.0110	0.8080	0.8500	0.9356	0.9034	10.67	5.93	0.1073
2008-03-10 17:00:00	TRANS 5	5.23	17.43	2.319	473.94	0.31448	2.994	1.36	8.88	47.69	0.0110	0.8410	0.8500	0.8951	0.8426	10.71	4.42	0.2976
2008-03-10 17:00:00	TRANS 6	4.02	17.43	2.319	473.94	0.31448	3.415	1.36	7.13	32.23	0.0085	0.8513	0.8500	0.9291	0.8936	8.65	4.42	0.1013
2008-03-10 17:00:00	TRANS 7	3.51	17.43	2.319	473.94	0.69053	8.024	1.36	7.59	27.93	0.0074	0.8987	0.6000	0.9386	0.9078	9.47	2.92	0.3952
2008-03-10 17:00:00	TRANS 8	3.33	17.43	2.319	473.94	0.69053	8.238	1.36	11.30	20.39	0.0070	0.9890	0.6000	0.9551	0.9327	10.07	2.95	0.4185
2008-03-10 17:00:00	TRANS 9	3.70	17.43	2.319	473.94	0.63992	7.242	1.36	7.65	57.85	0.0078	0.8880	0.6000	0.8727	0.8091	9.18	2.96	0.3447



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	TRANSEC.	H _{sp} (m.)	T _p (seg.)	nivel-mar (m.)	L ₀ (m.)	pte. estruct. promedio	I _{rop} (Iribar.)	SETUP (m.)	d _{pie} (set-up marea)	ANG. PROP. INCID talud (º SEX.)	S _{op}	γ _h	γ _f	γ _B run-up	γ _B rebase	RUNUP V.D.M. (m.)	F _c (francob.) MAREA + SETUP (m.)	REBASE V.D.M. (m³/seg*m)
2008-03-10 17:00:00	TRANS 10	2.92	17.43	2.319	473.94	0.63992	8.152	1.36	2.08	78.73	0.0062	0.6758	0.6000	0.8268	0.7402	5.22	2.96	0.0000
2008-03-10 17:00:00	TRANS 11	3.88	17.43	2.319	473.94	0.63992	7.072	1.36	8.13	35.34	0.0082	0.8912	0.6000	0.9223	0.8834	10.20	2.96	0.5160

TABLA CON EL RESULTADO POR TRANSECTO DEL VOLUMEN MEDIO DE REBASE OBTENIDO CON EL MODELO DE VAN DER MEER

fecha	TRANSECTO	REBASE (m³/seg*m)	T _m PER. MED. (seg.)	LONG. DIQUE MORRO INCIDENCIA (m.)	LONG. DIQUE EXPLANADA INCIDENCIA (m.)	LONG. ESC SECTO R 1 (m.)	LONG. ESC SECTO R 2 (m.)	LONG. ESC SECTO R 3 (m.)	VOL DIQUE MORRO (m³)	VOL DIQUE EXPLANAD A (m³)	VOL ESC SECTO R 1 (m³)	VOL SECTO R 2 (m³)	VOL SECTO R 3 (m³)
2008-03-10 17:00:00	ESTADO DE MAR		11.590										
2008-03-10 17:00:00	TRANS 0	0.1525	11.590	20.500					36.225				
2008-03-10 17:00:00	TRANS 1	0.1840	11.590	20.500					43.720				
2008-03-10 17:00:00	TRANS 2	0.1650	11.590	20.500					39.191				
2008-03-10 17:00:00	TRANS 3	0.0766	11.590		14.600					12.960			
2008-03-10 17:00:00	TRANS 4	0.1073	11.590		14.600					18.160			
2008-03-10 17:00:00	TRANS 5	0.2976	11.590		14.600					50.361			
2008-03-10 17:00:00	TRANS 6	0.1013	11.590		6.200					7.276			
2008-03-10 17:00:00	TRANS 7	0.3952	11.590			15.000					68.709		
2008-03-10 17:00:00	TRANS 8	0.4185	11.590			15.000					72.753		
2008-03-10 17:00:00	TRANS 9	0.3447	11.590					15.000					59.933



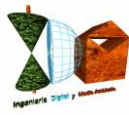
INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)

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	TRANSECTO	REBASE (m ³ /seg*m)	Tm PER. MED. (seg.)	LONG. DIQUE MORRO INCIDENCIA (m.)	LONG. DIQUE EXPLANADA INCIDENCIA (m.)	LONG. ESC SECTO R 1 (m.)	LONG. ESC SECTO R 2 (m.)	LONG. ESC SECTO R 3 (m.)	VOL DIQUE MORRO (m ³)	VOL DIQUE EXPLANAD A (m ³)	VOL ESC SECTO R 1 (m ³)	VOL SECTO R 2 (m ³)	VOL SECTO R 3 (m ³)
2008-03-10 17:00:00	TRANS 10	0.0000	11.590				15.000					0.000	
2008-03-10 17:00:00	TRANS 11	0.5160	11.590				15.000					89.703	



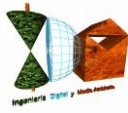
El resumen de los datos de volúmenes medios de rebase en un período medio de una incidencia de oleaje del estado de mar 10-03-2008 a las 17:00 horaio U.T.C. fue:

VOL. REBASE DIQUE EN EXTENSIÓN A MORRO (m³)	VOL. REBASE EN EXPLANADA 1 (PARTE DIQUE + SECTOR 1 ESCOLLERA) (m³)	VOL. REBASE EN EXPLANADA 2 (SECTOR 2 Y 3 ESCOLLERA) (m³)	VOL. REBASE TOTAL EXPLANADA (m³)
119.136	230.220	149.636	379.856

En cuanto a los parámetros de magnitud para cuantificar el orden de rango del estado de mar de 10-03-2008 17:00 U.T.C. en relación al temporal de máximo potencial de inundación del período 1995-2023 de 03-03-2014 17:00 UTC, son los siguientes:

Fecha / ESTADO DE MAR	PARÁMETRO 1: PROMEDIO RUN-UP + SET-UP + NIVEL MAREAL DE TRANSECTOS (m.)	PARÁMETRO 2: SUMA CAUDAL REBASE DE TRANSECTOS (m³/seg*m)	PARÁMETRO 3: PROMEDIO REBASE DE TRANSECTOS (m³/seg*m)
03-03-2014 17:00	15.46	6.04	0.50
10-03-2008 17:00	13.73	2.76	0.23


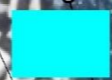
Con dichos parámetros respecto al estado de mar de 03-03-2014 17:00 UTC, el estado de mar de 10-03-2008 17:00 U.T.C. es inferior en cuanto a potencial de inundación que el temporal de 03-03-2014 17:00 UTC, circunstancia también constatada con las alturas de ola propagadas a pie de estructuras (dado que los valores propagados de 03-03-2014 son superiores a las de 10-03-2008), por lo que las superficies de alcance de oleaje sobre la explanada portuaria deberán ser necesariamente mayores con este último estado de mar, lo cual resulta compatible y consecuente con el hecho de que el estado de mar de 03-03-2014 haya resultado el de máxima capacidad de inundación del período 1995-2023, en el cual está incluido el estado de mar de 10-03-2008 17:00 UTC, y por tanto había sido iterado en el análisis realizado en dicho período.



Para realizar la calibración que nos permita establecer una relación entre el volumen de rebase y la superficie inundada, nos remitimos a la superficie traspuesta a ortofoto y plano en el informe técnico denominado “INFORME TÉCNICO SOBRE LA DETERMINACIÓN DE LA RIBERA DEL MAR Y SERVIDUMBRE DE PROTECCIÓN PARTIENDO DEL ALCANCE COMPROBADO DE LAS OLAS SOBRE LA AMPLIACIÓN DEL PUERTO EN PUERTO DE VEGA (ASTURIAS)” realizado por el Ingeniero de Caminos Canales y Puertos D. Juan José González Fernández, a instancias del recurso presentado por D. Luis Jáñez Escalada, considerándose correcta la metodología de dicha trasposición, cuya georreferenciación en el Proyecto del presente estudio en el sistema ETRS89 se refleja en el siguiente plano (ortofoto) a escala 1/1.000:

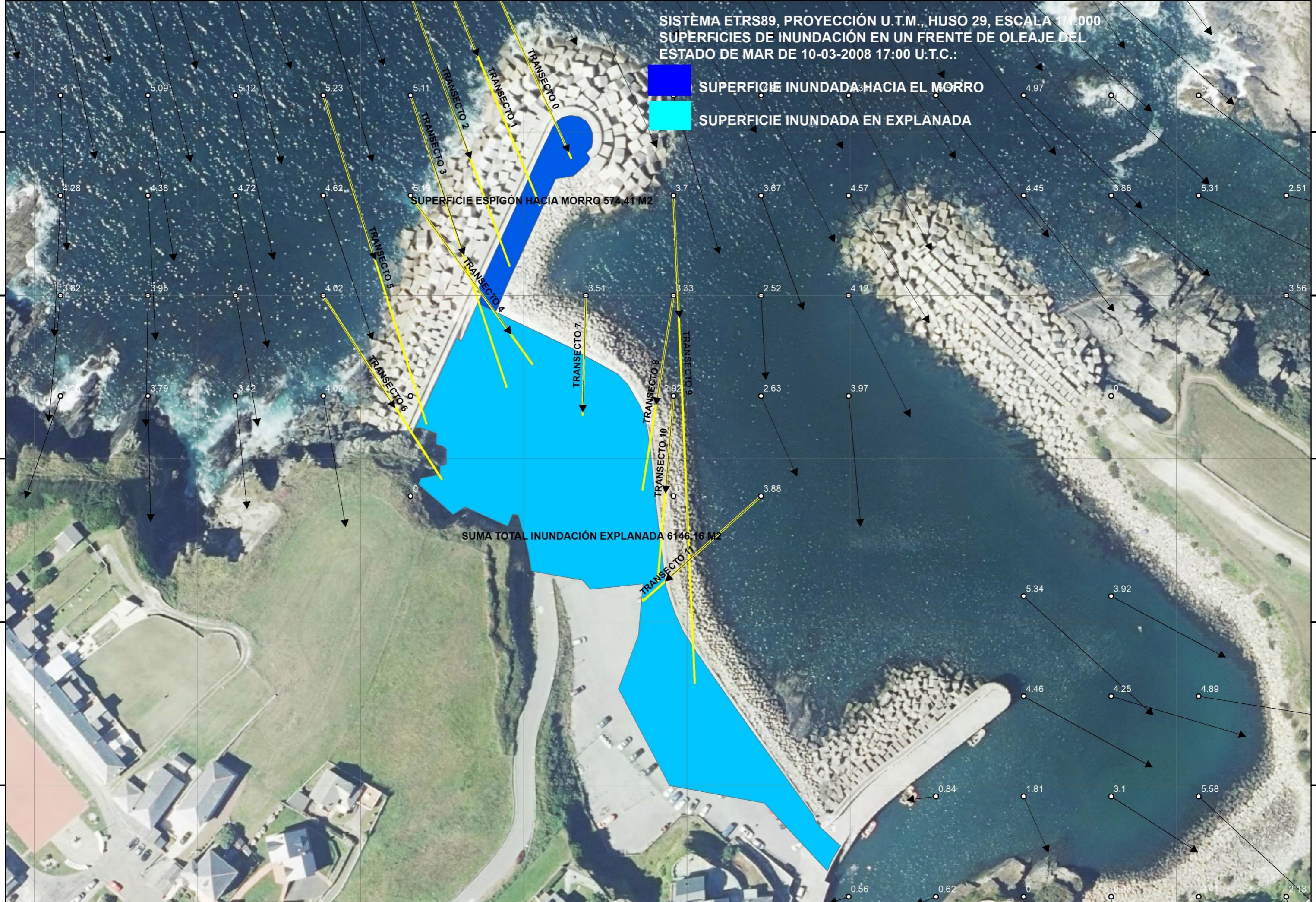
689850 689900 689950 690000 690050 690100 690150 690200

SISTEMA ETRS89, PROYECCIÓN U.T.M., HUSO 29, ESCALA 1/1.000
SUPERFICIES DE INUNDACIÓN EN UN FRENTE DE OLAJE DEL ESTADO DE MAR DE 10-03-2008 17:00 U.T.C.:

 SUPERFICIE INUNDADA HACIA EL MORRO
 SUPERFICIE INUNDADA EN EXPLANADA

4826550
4826500
4826450
4826400
4826350

4826550
4826500
4826450
4826400
4826350



SUPERFICIE ESPIGÓN HACIA MORRO 574.41 M2

SUMA TOTAL INUNDACIÓN EXPLANADA 6146.16 M2

TRANSECTO 0

TRANSECTO 1

TRANSECTO 2

TRANSECTO 3

TRANSECTO 4

TRANSECTO 5

TRANSECTO 6

TRANSECTO 7

TRANSECTO 8

TRANSECTO 9

TRANSECTO 10

TRANSECTO 11

4.7 5.09 5.12 5.23 5.11 4.28 4.38 4.72 4.62 5.19 3.7 3.67 4.57 4.45 3.86 5.31 2.51 3.82 3.95 4 4.02 3.51 3.33 2.52 4.12 3.56 3.23 3.79 3.42 4.02 2.92 2.63 3.97 0 3.88 5.34 3.92 4.46 4.25 4.89 0.84 1.81 3.1 5.58 0.56 0.62 0 0.93 2.41 2.13

689850 689900 689950 690000 690050 690100 690150 690200



Dado que el rebase del espigón hacia el morro del dique inunda de forma completa la superficie al trasdós del mismo (574,41 m², en color azul oscuro) según el reportaje fotográfico en un rebase completo que vierte de nuevo al mar por la escollera del trasdós, se realizará la calibración con la superficie de la explanada alcanzada por la inundación del volumen de rebase en el estado de mar de 10-03-2008 (color azul claro), que ocupó una superficie de 6146.16 m² sobre dicha explanada según la geometría del citado informe técnico, trasposición de la superficie inundada captada por las imágenes fotográficas del día 10-03-2008.

Como el volumen de rebase según los transectos incidentes sobre la explanada es de 379.85 m³ según los cálculos realizados en el presente estudio con el estado de mar de 10-03-2008 17:00 U.T.C., y la superficie de la explanada inundada según el reportaje fotográfico y el informe técnico fue de 6146.16 m², el ratio volumen/superficie es igual a 0.062 m., lo que supondría un espesor promedio de la lámina de agua expandida correspondiente a dicho volumen, de 6.2 cm.



7. SUPERFICIE DE INUNDACIÓN SEGÚN EL ESTADO DE MAR DE 03-03-2014 17:00 UTC, DE MÁXIMO POTENCIAL DE ALCANCE DE OLEAJES DEL PERÍODO ANALIZADO 1995-2023 (MÁXIMO PERÍODO DE DATOS SINCRONIZABLES DE OLEAJES Y MAREAS)

A partir del ratio volumen/superficie anterior que proporciona un espesor promedio estimado de 6.2 cm. del volumen expandido en la explanada (correlación volumen de rebase/superficie de inundación establecido a través de una constatación fotográfica de alcances de oleajes en la explanada del temporal del 10 de marzo de 2008), podemos ponderar la expansión del volumen de agua de rebase medio calculado sobre la explanada para un frente de oleaje incidente del estado de mar de 03-03-2014 17:00 U.T.C. de 602.74 m³, que daría como resultado una superficie de 9721.61 m² sobre la explanada ocupada por la expansión de dicho volumen, lo cual supone que la totalidad de la explanada del Puerto de Navia es alcanzada por la lámina de agua proveniente del rebase del oleaje calculado, dado que la superficie completa de la misma excluyendo las extensiones de los espigones hacia los morros (exterior e interior) es de 8404.19 m².

Asimismo, aplicando dicho ratio a partir del volumen de rebase de 124.27 m³ en la sección del dique exterior hacia el morro, se obtendría una superficie en dicha zona de 7698.06 m², lo cual supera ampliamente la superficie al trasdós del dique en la sección hacia el morro de 574.41 m² (superficie en color azul oscuro), por lo que esta zona se considera rebasada por completo.



Con este resultado superficial del volumen de rebase por transecto y por sectores y teniendo en cuenta la topografía de detalle de la explanada (equidistancia de 0.20 m.), se ha obtenido que la superficie de inundación simulada sobre la explanada (color azul claro) provocada por una incidencia de frente de oleaje del estado de mar de 03-03-2014 17:00 U.T.C., que cumple con el nuevo criterio reglamentario de máxima magnitud de inundación conocida, se corresponde con la superficie total de la misma, habiéndose reflejado en el siguiente plano a escala 1/1.000 ambas superficies:

689850 689900 689950 690000 690050 690100 690150 690200

4826550
4826500
4826450
4826400
4826350
4826300

SISTEMA ETRS89, PROYECCIÓN U.T.M., HUSO 29
ORTOFOTO MA (SEPT 2020) A ESCALA 1/2.000
INUNDACIÓN EN EXPLANADA DE PUERTO DE NAVIA
POR EL ESTADO DE MAR 03-03-2014 17:00 UTC
CURVADO EXPLANADA EQUIDISTANCIA 0.2 M OBTENIDO
A PARTIR DEL MDT TOPOGRÁFICO GENERADO (LIDAR)
PLANO A ESCALA 1/1.000

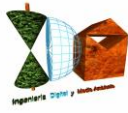
INUNDACIÓN TOTAL SUPERFICIE DIQUE EXTERIORr (MORRO) 7698.06>574.41 m²

-  SUPERFICIE INUNDADA HACIA EL MORRO
-  SUPERFICIE INUNDADA EXPLANADA

SUMA TOTAL INUNDACIÓN EXPLANADA 9721.61>8404.19 m²



689850 689900 689950 690000 690050 690100 690150 690200



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

8. BIBLIOGRAFIA:

TUTOR DE INGENIERIA DE COSTAS (TIC). MANUAL DEL USUARIO
(MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE DIRECCIÓN GENERAL DE COSTAS
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA
G.I.O.C. GRUPO DE INGENIERÍA OCEANOGRÁFICA Y DE COSTAS

ATLAS DE INUNDACIÓN DEL LITORAL PENINSULAR ESPAÑOL. DOCUMENTO TEMÁTICO
(MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE DIRECCIÓN GENERAL DE COSTAS
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA
G.I.O.C. GRUPO DE INGENIERÍA OCEANOGRÁFICA Y DE COSTAS

MADRID, 10 DE ABRIL 2023, LA EMPRESA CONSULTORA

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

INGENIERÍA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)
FDO: CHRISTIAN JESÚS MONTERO LLERANDI
INGENIERO DE MONTES COLEGIADO 2713