



*Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos.*

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



DISEÑO DE MEDIDAS DE ADAPTACIÓN FRENTE AL IMPACTO POR CAMBIO CLIMÁTICO EN EL PUERTO DE LLANES, ASTURIAS

Trabajo realizado por:

Nicolás Hortal Suárez

Dirigido:

Javier López Lara

Alberto Vicente Fernández Pérez

Titulación:

**Máster Universitario
en Costas y Puertos**

Santander, septiembre de 2022

TRABAJO FIN DE MASTER

ÍNDICE

RESUMEN	2
ABSTRACT	3
DOCUMENTO Nº1. MEMORIA	8
1. INTRODUCCIÓN	8
2. DESCRIPCIÓN DEL PUERTO DE ESTUDIO	9
2.1. LOCALIZACIÓN Y DINÁMICAS GENERALES	9
2.2. PUERTO DE LLANES	10
3. METODOLOGÍA	11
4. MODELO CLIMÁTICO	11
4.1. PROYECCIONES CLIMÁTICAS	11
4.2. PERIODOS TEMPORALES	12
4.3. ESCENARIOS DE ESTUDIO	12
5. DATOS CLIMÁTICOS DE PARTIDA	12
5.1. VALIDACIÓN DE LOS DATOS DEL OLEAJE	13
5.2. ANÁLISIS DEL CLIMA OFFSHORE	14
6. PROPAGACIÓN DEL OLEAJE	15
6.1. ANÁLISIS DEL CLIMA EN LOS PUNTOS DE CONTROL	19
7. OBRA DE ABRIGO	21
8. EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD	22
8.1. CARACTERIZACIÓN DE LA OBRA DE ABRIGO	23
8.2. ANÁLISIS DE LA FUNCIONALIDAD	27
8.3. ANÁLISIS DE LA OPERATIVIDAD	30
8.4. ANÁLISIS DE LA FIABILIDAD ESTRUCTURAL	32
8.5. RESULTADOS OBTENIDOS	35
9. ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO	41
9.1. ALTERNATIVAS PROPUESTAS	41
9.2. ALTERNATIVA SELECCIONADA	42
9.3. DISEÑO DE LA ALTERNATIVA SELECCIONADA	44
10. CONCLUSIONES	50
BIBLIOGRAFÍA	52

RESUMEN

DISEÑO DE MEDIDAS DE ADAPTACIÓN FRENTE AL IMPACTO POR CAMBIO CLIMÁTICO EN EL PUERTO DE LLANES, ASTURIAS

AUTOR: Nicolás Hortal Suárez

DIRECTORES: Javier López Lara, Alberto Vicente Fernández Pérez

FECHA: Septiembre 2022

PALABRAS CLAVE: cambio climático, adaptación, vulnerabilidad, puertos

El calentamiento del planeta debido al aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero producido por la actividad humana, está generando cambios en el clima, los cuales ya son una realidad.

Esto hace necesario una pronta actuación en las zonas de mayor exposición y vulnerabilidad para su adaptación al cambio climático, como lo son las infraestructuras costero-portuarias.

Una vez se evalúa la vulnerabilidad de la obra de abrigo del puerto de Llanes (Asturias) en función del impacto sobre la obra de abrigo de acuerdo con su funcionalidad, operatividad y fiabilidad estructural, se realiza un análisis para su adaptación al cambio climático, proponiendo una serie de alternativas y, tras un análisis multicriterio, se dimensiona la alternativa considerada como óptima, analizando brevemente si se obtienen los resultados esperados.

En este Trabajo, se aplica la metodología desarrollada por el IH Cantabria en el documento “Elaboración de la metodología y base de datos para la proyección de impactos de cambio climático a lo largo de la costa española”, cuyos autores principales son David Lucio Fernández, Antonio Tomás Sampedro, e Iñigo J. Losada Rodríguez.

ABSTRACT

DESIGN OF ADAPTATION MEASURES TO PREVENT THE IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON THE PORT OF LLANES, ASTURIAS

AUTHOR: Nicolás Hortal Suárez

THESIS DIRECTORS: Javier López Lara, Alberto Vicente Fernández Pérez

DATE: September 2022

KEY WORDS: climate change, adaptation, vulnerability, ports

Global warming due to the increase in greenhouse gas concentrations caused by human activity is generating changes in the climate, which are already a reality.

This makes it necessary to take prompt action in the areas of greatest exposure and vulnerability in order to adapt to climate change, such as coastal-port infrastructures.

Once the vulnerability of the harbour works in the port of Llanes (Asturias) has been assessed in terms of the impact on the harbour works according to their functionality, operability and structural reliability, an analysis is carried out for their adaptation to climate change, proposing a series of alternatives and, after a multi-criteria analysis, the alternative considered as optimal is sized, briefly analysing whether the expected results are obtained.

In this work, the methodology developed by the IH Cantabria in the document "Elaboration of the methodology and database for the projection of climate change impacts along the Spanish coast", whose main authors are David Lucio Fernández, Antonio Tomás Sampedro, and Iñigo J. Losada Rodríguez, is applied.

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Imagen 1. Impactos atribuidos al cambio climático. Fuente: MITERD.</i>	<i>8</i>
<i>Imagen 2. Localización de Llanes. Fuente: elaboración propia a través de Google Earth.....</i>	<i>9</i>
<i>Imagen 3. Puerto de Llanes. Fuente: elaboración propia a través de Google Earth.</i>	<i>10</i>
<i>Imagen 4. Los Cubos de la Memoria (Puerto de Llanes). Fuente: Wikimapia.</i>	<i>10</i>
<i>Imagen 5. Ubicación de los datos climáticos. Fuente: elaboración propia a través de Google Earth.</i>	<i>12</i>
<i>Imagen 6. Rosa del oleaje del punto SIMAR-3114035. Fuente: Puertos del Estado.....</i>	<i>13</i>
<i>Imagen 7. Datos Offshore de Hs, Tp y Dir de la serie histórica. Fuente: elaboración propia.</i>	<i>14</i>
<i>Imagen 8. Datos Offshore de Hs, Tp y Dir del escenario RCP4.5. Fuente: elaboración propia.</i>	<i>14</i>
<i>Imagen 9. Datos Offshore de Hs, Tp y Dir del escenario RCP8.5. Fuente: elaboración propia.</i>	<i>14</i>
<i>Imagen 10. MAXDISS de los datos históricos de la proyección climática en el punto offshore. Fuente: elaboración propia.</i>	<i>15</i>
<i>Imagen 11. MAXDISS de los MAXDISSes realizados para los 5 escenarios de estudio. Fuente: elaboración propia.</i>	<i>16</i>
<i>Imagen 12. Batimetría de la zona de estudio. Fuente: elaboración propia.....</i>	<i>16</i>
<i>Imagen 13. Mallas de estudio aplicadas en el SWAN. Fuente: elaboración propia a través de Google Earth.....</i>	<i>17</i>
<i>Imagen 14. Resolución de la malla general. Fuente: elaboración propia mediante SWAN.</i>	<i>17</i>
<i>Imagen 15. Resolución de la malla de detalle. Fuente: elaboración propia mediante SWAN.</i>	<i>18</i>
<i>Imagen 16. Puntos de control del clima a pie de dique. Fuente: elaboración propia a través de Google Earth.....</i>	<i>18</i>
<i>Imagen 17. Datos climáticos para el Escenario 1. Fuente: elaboración propia.....</i>	<i>19</i>
<i>Imagen 18. Datos climáticos para el Escenario 2. Fuente: elaboración propia.....</i>	<i>19</i>
<i>Imagen 19. Datos climáticos para el Escenario 3. Fuente: elaboración propia.....</i>	<i>20</i>
<i>Imagen 20. Datos climáticos para el Escenario 4. Fuente: elaboración propia.....</i>	<i>20</i>
<i>Imagen 21. Datos climáticos para el Escenario 5. Fuente: elaboración propia.....</i>	<i>21</i>
<i>Imagen 22. Dique de abrigo del puerto de Llanes. Fuente: elaboración propia a través de Google Earth.....</i>	<i>21</i>

<i>Imagen 23. Sección tipo A. Fuente: Consejería de Infraestructuras, Ordenación del Territorio y Medio Ambiente del Gobierno del Principado de Asturias.</i>	<i>22</i>
<i>Imagen 24. Sección tipo B. Fuente: Consejería de Infraestructuras, Ordenación del Territorio y Medio Ambiente del Gobierno del Principado de Asturias.</i>	<i>22</i>
<i>Imagen 25. Zonificación del puerto de Llanes. Fuente: elaboración propia a través de Google Earth.</i>	<i>22</i>
<i>Imagen 26. Caracteres general y operativo de los tramos de la obra. Fuente: ROM 0.0-01.</i>	<i>23</i>
<i>Imagen 27. Árbol de fallo del dique de abrigo. Fuente: elaboración propia.</i>	<i>27</i>
<i>Imagen 28. Régimen extremal en el punto 1, serie histórica. Fuente: elaboración propia.</i>	<i>28</i>
<i>Imagen 29. Régimen extremal en el punto 2, RCP4.5 (2027-2045). Fuente: elaboración propia.</i>	<i>29</i>
<i>Imagen 30. Régimen extremal en el punto 3, RCP8.5 (2082-2100). Fuente: elaboración propia.</i>	<i>29</i>
<i>Imagen 31. Régimen medio en el punto 1, serie histórica. Fuente: elaboración propia.</i>	<i>30</i>
<i>Imagen 32. Régimen medio en el punto 2, RCP4.5 (2027-2045). Fuente: elaboración propia.</i>	<i>31</i>
<i>Imagen 33. Régimen medio en el punto 3, RCP8.5 (2082-2100). Fuente: elaboración propia.</i>	<i>31</i>
<i>Imagen 34. Método de Martín (1999), Fuente: apuntes de Fundamentos de Obras Marítimas.</i>	<i>33</i>
<i>Imagen 35. Variación de μ. Fuente: Apuntes de Fundamentos de Obras Marítimas.</i>	<i>34</i>
<i>Imagen 36. Vulnerabilidad de la Zona I. Fuente: elaboración propia.</i>	<i>36</i>
<i>Imagen 37. Vulnerabilidad de la Zona II. Fuente: elaboración propia.</i>	<i>37</i>
<i>Imagen 38. Vulnerabilidad de la Zona III. Fuente: elaboración propia.</i>	<i>37</i>
<i>Imagen 39. Límites de rebase para peatones y vehículos. Fuente: Tabla 3.3 del EurOtop.</i>	<i>38</i>
<i>Imagen 40. Ubicación de la punta del Guruñu. Fuente: elaboración propia a través de Google Earth.</i>	<i>43</i>
<i>Imagen 41. Oleaje rompiendo en la punta del Guruñu. Fuente: www.verderin.blogspot.com.</i>	<i>43</i>
<i>Imagen 42. Oleaje que llega al dique. Fuente: www.verderin.blogspot.com.</i>	<i>44</i>
<i>Imagen 43. Sectores de un dique de baja coronación. Fuente: Apuntes de Fundamentos de Obras Marítimas.</i>	<i>45</i>
<i>Imagen 44. Ubicación del punto de control para dimensionar el dique de baja coronación. Fuente: elaboración propia a través de Google Earth.</i>	<i>45</i>
<i>Imagen 45. Tablas 2.2.33 y 2.2.34. Fuente: ROM 1.0-09.</i>	<i>46</i>
<i>Imagen 46. Régimen extremal de los datos climáticos históricos en el punto de control para el diseño del dique de baja coronación. Fuente: elaboración propia.</i>	<i>47</i>

<i>Imagen 47. Rosa del oleaje durante los inviernos de la serie histórica (1985-2005) en el punto SIMAR 3114035, situado frente la costa de Llanes. Fuente: Puertos del Estado.</i>	<i>49</i>
<i>Imagen 48. Ubicación del dique de baja coronación de 200 metros de longitud. Fuente: elaboración propia a través de Google Earth.</i>	<i>49</i>
<i>Imagen 49. Sección del dique de baja coronación. Fuente: elaboración propia a través de AutoCAD.</i>	<i>50</i>
<i>Imagen 50. Forma en planta del dique de baja coronación. Fuente: elaboración propia a través de SketchUp.</i>	<i>50</i>
<i>Imagen 51. Vulnerabilidad de la Zona III teniendo en cuenta el dique de baja coronación. Fuente: elaboración propia.</i>	<i>51</i>

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Coeficientes para el cálculo del IRE. Fuente: elaboración propia.</i>	<i>25</i>
<i>Tabla 2. Coeficientes para el cálculo del ISA. Fuente: elaboración propia.</i>	<i>25</i>
<i>Tabla 3. Coeficientes para el cálculo del IREO. Fuente: elaboración propia.</i>	<i>26</i>
<i>Tabla 4. Coeficientes para el cálculo del ISAO. Fuente: elaboración propia.</i>	<i>26</i>
<i>Tabla 5. Bases de cálculo del dique de abrigo. Fuente: elaboración propia.</i>	<i>26</i>
<i>Tabla 6. Tabla 5.33 del Rock Manual Capítulo 5. Fuente: Rock Manual Ch. 5.</i>	<i>32</i>
<i>Tabla 7. Resultados obtenidos en el análisis de la funcionalidad. Fuente: elaboración propia.</i>	<i>35</i>
<i>Tabla 8. Clasificación de Leo Franco para caudales de rebase tolerables. Fuente: elaboración propia.</i>	<i>36</i>
<i>Tabla 9. Resultados obtenidos en el análisis de la operatividad. Fuente: elaboración propia.</i>	<i>38</i>
<i>Tabla 10. Resultados del análisis de la fiabilidad estructural de las piezas del manto. Fuente: elaboración propia.</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 11. Resultados del análisis de la fiabilidad estructural del espaldón. Fuente: elaboración propia.</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 12. Resultados del análisis de la fiabilidad estructural del espaldón. Fuente: elaboración propia.</i>	<i>40</i>
<i>Tabla 13. Resultados del análisis de la fiabilidad estructural del espaldón. Fuente: elaboración propia.</i>	<i>40</i>
<i>Tabla 14. Resultados del análisis de la fiabilidad estructural del espaldón. Fuente: elaboración propia.</i>	<i>40</i>
<i>Tabla 15. Análisis multicriterio de las alternativas propuestas. Fuente: elaboración propia.</i>	<i>42</i>
<i>Tabla 16. Piezas que conforman el dique de baja coronación. Fuente: elaboración propia.</i>	<i>48</i>

DOCUMENTO Nº1. MEMORIA

1. INTRODUCCIÓN

Las acciones antrópicas están teniendo influencia directa sobre el clima del planeta, contribuyendo al calentamiento global, al incrementarse las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera (Rojelj, Meinshausen, & Knutti, 2012). Por ello, se está acelerando el cambio climático.

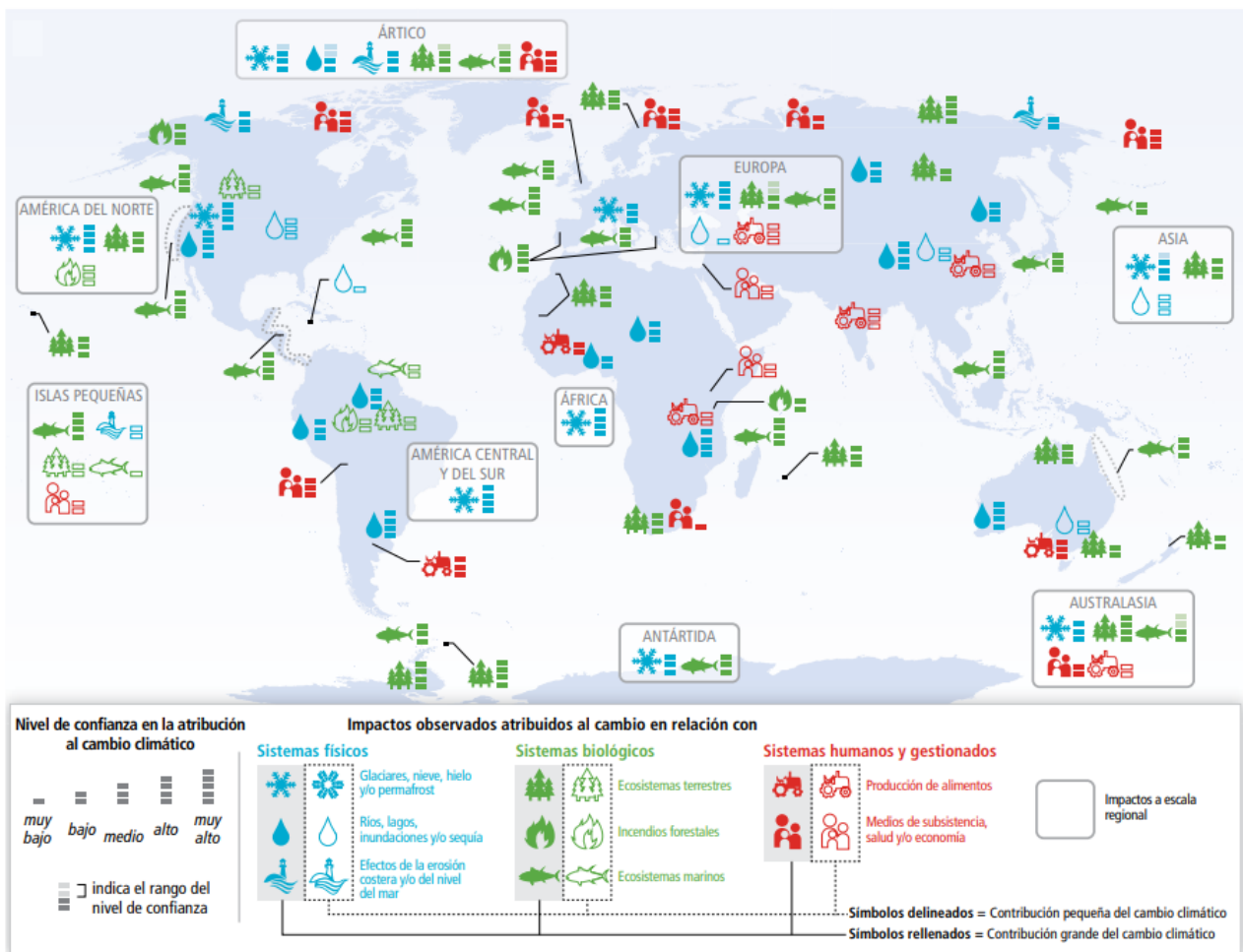


Imagen 1. Impactos atribuidos al cambio climático. Fuente: MITERD.

En las zonas costeras, lugar de interés en este Trabajo, el cambio climático tiene especial relevancia sobre tres variables, afectando directamente a los fenómenos meteorológicos extremos, como son: el nivel del mar (el cual aumenta provocado principalmente por el derretimiento de los glaciares y el efecto sobre los sistemas fluviales), la temperatura y la acidificación del agua del mar.

En la actualidad, ya son visibles los efectos del cambio climático, por lo que es imperativo desarrollar estrategias de adaptación. La definición que da el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, 2014) sobre la adaptación al cambio climático es la siguiente: “Ajuste en los sistemas naturales o humanos como respuesta a estímulos climáticos actuales o esperados, o sus impactos, que reducen el daño causado y que potencia las oportunidades benéficas”.

Los puertos se tratan de unas infraestructuras realmente vulnerables al cambio climático debido a su larga vida útil y su localización en la costa. El aumento del nivel del mar o la intensidad de los temporales afectan directamente a las funciones que se desarrollan en el puerto, por lo que su adaptación al cambio climático no tiene únicamente un aspecto de seguridad estructural, sino que también es necesario proteger las instalaciones y actividades que tienen lugar en los puertos (Stenek, 2011).

La no adaptación de los puertos al cambio climático debido al sobrecoste que genera, puede producir una reducción sustancial de la operatividad del puerto, provocando que las embarcaciones se decidan por otros puertos próximos con mejores condiciones de operatividad, provocando el declive económico del puerto y de la ciudad que lo alberga.

Como cada puerto tiene unas características y funciones propias, la vulnerabilidad al cambio climático es específica de cada puerto, así como las medidas de adaptación que se tomen.

2. DESCRIPCIÓN DEL PUERTO DE ESTUDIO

2.1. LOCALIZACIÓN Y DINÁMICAS GENERALES

El puerto de Llanes es un puerto pesquero situado en la provincia de Asturias, en el norte de España, bañado por el mar Cantábrico.



Imagen 2. Localización de Llanes. Fuente: elaboración propia a través de Google Earth.

Como es habitual en el mar Cantábrico, los oleajes predominantes son los que proceden de direcciones comprendidas entre el noroeste (NW) y noreste (NE). Cabe destacar que la zona en la que se encuentra Llanes no posee ningún accidente geográfico natural que la abrigue, por lo que el puerto se encuentra a merced de las acciones del mar. En cuanto al viento, tiene una clara componente estacional, rolando de Oeste a Este durante todo el año.

2.2. PUERTO DE LLANES

El puerto de Llanes se trata de un puerto pesquero perteneciente al distrito marítimo (también llamado capitanía marítima de 3ª) de Llanes, perteneciente a la capitanía marítima de 1ª de Gijón.



Imagen 3. Puerto de Llanes. Fuente: elaboración propia a través de Google Earth.

Antiguamente, la economía de Llanes estaba basada eminentemente en el sector de la pesca, (generando una pequeña industria de conservas y salazones), agricultura y ganadería. En la actualidad, su economía depende del sector terciario, destacando el sector servicios relacionado con el turismo, al encontrarse Llanes en una zona privilegiada rodeada de naturaleza y siendo considerada una de las capitales turísticas de Asturias.

El puerto de Llanes es propiamente una atracción turística, ya que los cubos que conforman el dique de abrigo están considerados como arte, llamados “Los Cubos de la Memoria” de Agustín Ibarrola.



Imagen 4. Los Cubos de la Memoria (Puerto de Llanes). Fuente: Wikimapia.

3. METODOLOGÍA

La metodología que se aplica en el presente Trabajo sigue la desarrollada por el Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria para evaluar la proyección de los impactos del cambio climático sobre obras de protección a lo largo de la costa española (Lucio, Tomás, & Losada, 2020).

Dicha metodología toma como referencia el marco normativo de ámbito nacional: la Ley de Costas, ROM (Recomendaciones de Obras Marítimas), la transposición al ordenamiento jurídico español de la Directiva de Inundaciones, así como el marco de análisis definido por el IPCC.

Los impactos producidos por el cambio climático en las obras de protección costera son analizados a través de la fiabilidad, funcionalidad y operatividad de las mismas, siendo definidos mediante los modos de fallo hidráulicos de los Estados Límites Últimos (ELU) para la fiabilidad, los Estados Límite de Servicio (ELS) para la funcionalidad, y los Estados Límites Operativo (ELO) para la operatividad del puerto, siendo resueltas las ecuaciones de verificación correspondientes.

La metodología aplicada se corresponde con la denominada “Aproximación II” (downscaling simplificado), la cual se basa en una metodología determinista (verificación de un estado de mar de cálculo por escenario climático, periodo de estudio y modelo climático empleado). Las fases de las que consta dicha metodología son:

1. Definición del clima marítimo y las infraestructuras costeras que se encuentren en el tramo costero de la zona de estudio, así como los modos de fallo y parada de las mismas.
2. Downscaling simplificado, es decir, la propagación de series de oleaje históricas y futuras para determinar el oleaje incidente a pie de dique.
3. Definición de la vulnerabilidad de la infraestructura portuaria, considerando fiabilidad, funcionalidad y operatividad.
4. Evaluación de impactos que se producen en la infraestructura estudiada.
5. Definición de diversas medidas de adaptación que reduzcan el impacto por cambio climático.
6. Análisis multi-criterio, selección y diseño de la medida elegida.

4. MODELO CLIMÁTICO

Para el desarrollo de este trabajo se ha empleado el modelo climático global MIROC5 (Lemos, Semedo, & Dobrynin, 2019), la última versión del modelo de circulación general atmósfera-océano, producido cooperativamente por la comunidad de investigación japonesa.

4.1. PROYECCIONES CLIMÁTICAS

El IPCC propone unas proyecciones a fin de siglo basadas en los escenarios de Rutas Representativas de Concentración (RCPs) de Gases de Efecto Invernadero (GEIs), que dependen de distintas variables tales como el tamaño de la población, la actividad económica, el estilo de vida, el uso de la energía, los usos del suelo, la tecnología y la política climática (IPCC, 2014).

En el Quinto Informe de Evaluación del IPCC (AR5), se proponen cuatro trayectorias de concentración representativas (2.6, 4.5, 6.0 y 8.5) para la predicción de variables climáticas. Para el desarrollo de este Trabajo, se emplean los datos correspondientes al RCP4.5 (escenario de mitigación de carácter intermedio) y al RCP8.5 (escenario muy alto de emisiones de gases de efecto invernadero).

4.2. PERIODOS TEMPORALES

Como periodos temporales de estudio, además de los datos históricos usados como *Baseline* para comparar los impactos, se analizan dos: de 2027 a 2045 y de 2082 a 2100.

4.3. ESCENARIOS DE ESTUDIO

Por tanto, en este Trabajo se tienen 5 escenarios de estudio:

- Escenario 1: Serie histórica del MIROC5 (1985-2005).
- Escenario 2: RCP4.5 del MIROC5 (2027-2045).
- Escenario 3: RCP4.5 del MIROC5 (2082-2100).
- Escenario 4: RCP8.5 del MIROC5 (2027-2045).
- Escenario 5: RCP8.5 del MIROC5 (2082-2100).

5. DATOS CLIMÁTICOS DE PARTIDA

Los datos proporcionados por el IH Cantabria para la realización de este Trabajo son:

- Datos del MIROC5 correspondientes al punto 2 (Latitud: 43.4360; Longitud: -4.7488).
- Datos de la marea astronómica correspondientes al punto 21 (Latitud: 43.4240; Longitud: -4.7470).
- Datos de aumento del nivel del mar (SLR) correspondientes al punto 1050 (Latitud: 43.5; Longitud: -4.7).



Imagen 5. Ubicación de los datos climáticos. Fuente: elaboración propia a través de Google Earth.

5.1. VALIDACIÓN DE LOS DATOS DEL OLEAJE

Previo a utilizar datos climáticos sintéticos de oleaje, se conozca o no la fuente de la que provenga, es necesario comprobar, en la medida de lo posible, cómo de fiables son esos datos, y si es necesario realizar una calibración de los mismos.

Se ha intentado realizar la validación de los datos del oleaje, al corresponderse espacialmente la ubicación del punto del que se tienen datos con el punto SIMAR-3114035 (y al no poseer datos de boyas cercanas), habiendo solicitado varias veces (la última con fecha de 30/08/2022) la serie temporal de los años coincidentes con el escenario histórico que se plantea en este Trabajo (1985-2005), no obteniendo respuesta por parte de Puertos del Estado a día 05/09/2022.

No obstante, se adjunta a continuación una imagen de la rosa del oleaje que se obtiene de los gráficos interactivos de Puertos del Estado, para poder comparar, al menos visualmente, las direcciones y las alturas de ola.



Imagen 6. Rosa del oleaje del punto SIMAR-3114035. Fuente: Puertos del Estado.

Como se puede apreciar, la dirección predominante es la del NW, dirección de la que provienen aproximadamente el 60% de los datos registrados en el periodo anteriormente mencionado. También tienen importancia los oleajes que provienen del NNW (aproximadamente el 17%). Por último, se recogen oleajes que provienen del NNE, NE y ENE (6,8%, 5,3% y 2,8%, respectivamente). Estas direcciones son las típicas que bañan la costa española del mar Cantábrico. Cabe destacar, que el 90% del oleaje registrado en ese periodo, tiene una altura de ola inferior a los 3 metros.

5.2. ANÁLISIS DEL CLIMA OFFSHORE

Para conocer cómo son los datos que se van a utilizar, se realiza un análisis de todas las variables del oleaje, de los cuales se muestran a continuación diferentes imágenes obtenidas a través de la herramienta AMEVA.

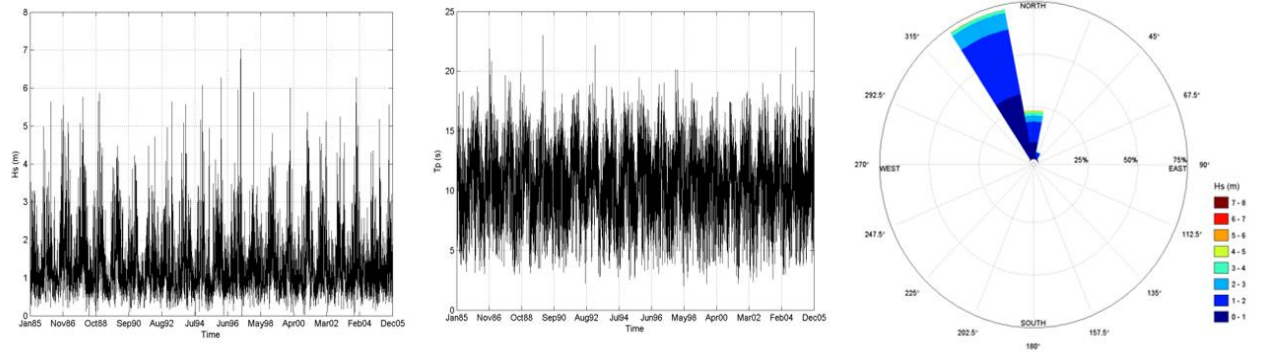


Imagen 7. Datos Offshore de Hs, Tp y Dir de la serie histórica. Fuente: elaboración propia.

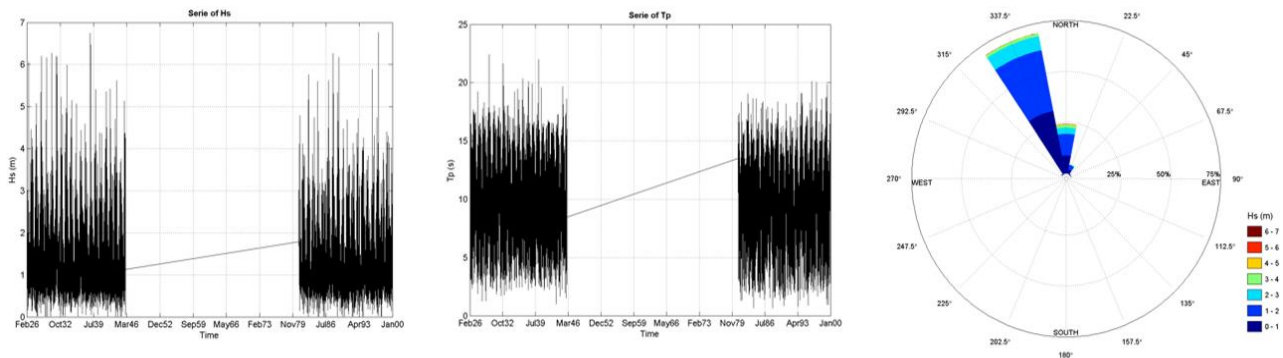


Imagen 8. Datos Offshore de Hs, Tp y Dir del escenario RCP4.5. Fuente: elaboración propia.

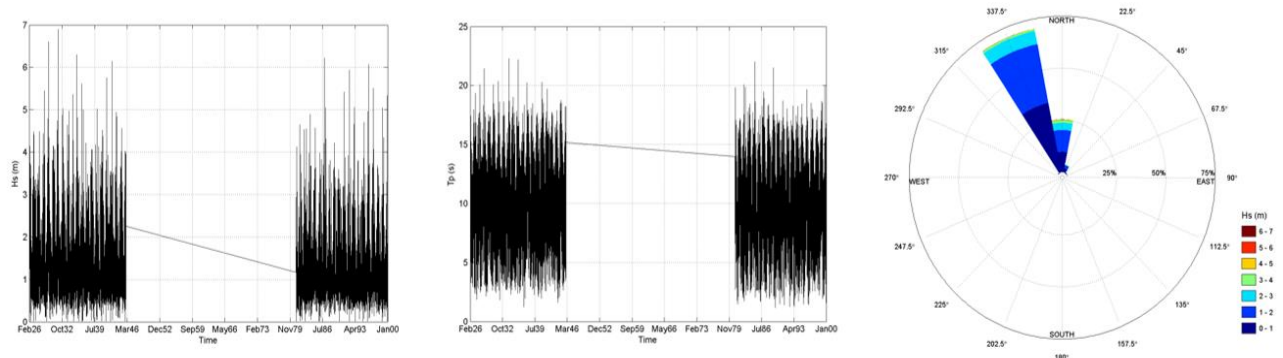


Imagen 9. Datos Offshore de Hs, Tp y Dir del escenario RCP8.5. Fuente: elaboración propia.

Comparando las 3 imágenes anteriores, se puede apreciar que la altura de ola se reduce progresivamente, sobre todo se manifiesta en la comparativa directa entre los escenarios a largo plazo (2082-2100) para el RCP4.5 y RCP8.5. Cabe destacar que las direcciones de los oleajes, tanto para la serie histórica como para las dos proyecciones, se asemejan a las direcciones del punto SIMAR-3114035 (Imagen 6).

6. PROPAGACIÓN DEL OLEAJE

Siguiendo con la metodología que se aplica, es necesario realizar el downscaling de las dinámicas, es decir, propagar los datos climáticos desde el punto offshore hasta la zona de estudio para determinar la fiabilidad, funcionalidad u operatividad de la infraestructura costera.

La proyección dinámica está compuesta por las series temporales horarias de las siguientes variables: altura de ola (H_s), periodo pico (T_p), periodo medio (T_m), Dirección (Dir) y marea meteorológica (MM), además de otras características propias de la proyección (forzamiento, latitud...).

Se considera que la propagación de la onda de marea hasta la costa es despreciable por tratarse de un tramo de costa abierta al oleaje exterior, por lo que el nivel del mar en la zona de estudio se obtiene sumando la marea astronómica (MA), la marea meteorológica (MM), y, para los escenarios futuros analizados, el aumento del nivel medio del mar (SLR). El valor del SLR se ha calculado mediante la media de los deciles $P45$ y $P55$ en el año horizonte de cada periodo de estudio (2045 y 2100).

Las variables asociadas al oleaje de la proyección dinámica (H_s , T_p , T_m y Dir), sí es necesario propagarlas hasta la zona de estudio, para poder tener en consideración los procesos de interacción con la batimetría tales como refracción, asomeramiento, rotura... Para realizar dicha propagación, se utiliza el modelo numérico SWAN (Simulating WAVes Nearshore), (Booij, Ris, & Holthuijsen).

Dada la cantidad ingente de datos, y con el fin de optimizar los tiempos computacionales, se ha aplicado un MAXDISS de MAXDISSes (Camus, 2011), es decir, se aplica, en primer lugar, el algoritmo de máxima disimilitud (MAXDISS) para la identificación de 50 casos representativos de la variabilidad climática para cada uno de los 5 escenarios estudiados (obteniendo 250 casos en total) en el punto offshore, para después, de manera recursiva y secuencial, volver a aplicar dicho algoritmo y seleccionar 50 casos representativos para propagar a la zona de estudio mediante SWAN.

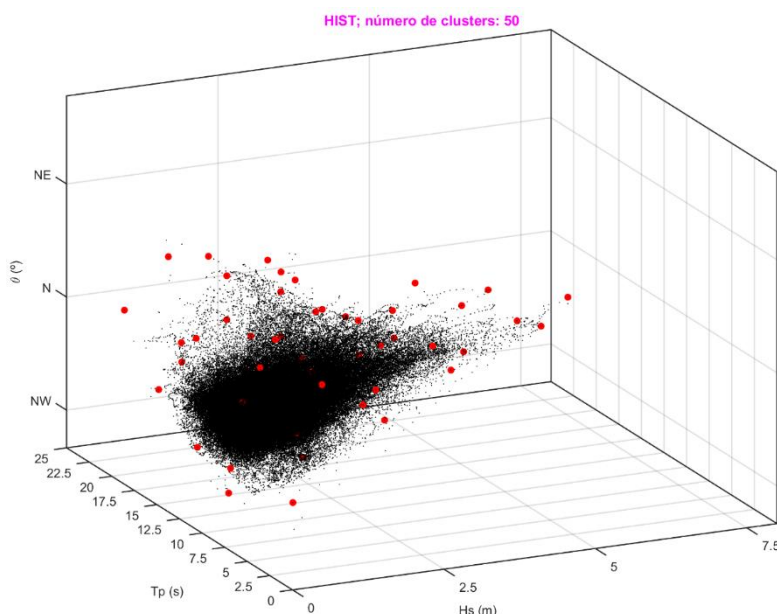


Imagen 10. MAXDISS de los datos históricos de la proyección climática en el punto offshore. Fuente: elaboración propia.

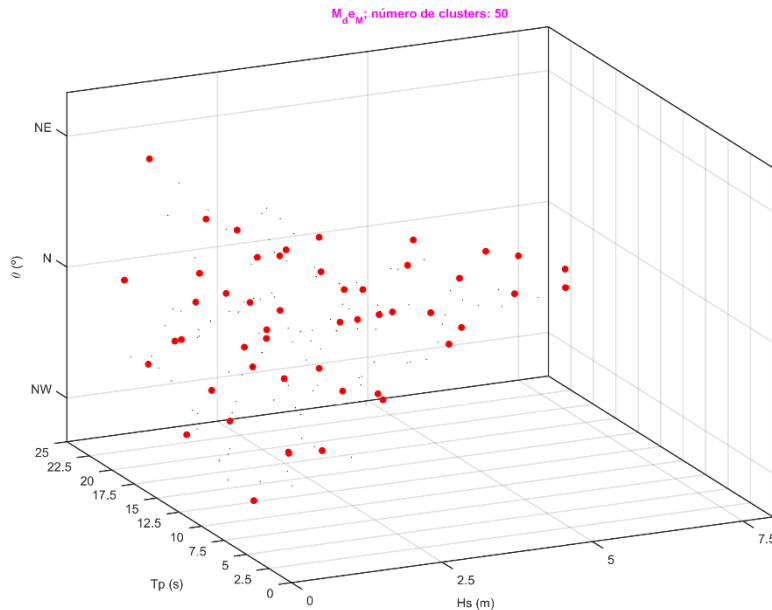


Imagen 11. MAXDISS de los MAXDISSes realizados para los 5 escenarios de estudio. Fuente: elaboración propia.

La utilización del SWAN para realizar la propagación desde offshore hasta la zona de estudio está estrechamente relacionado por los procesos de transformación del oleaje que tiene en consideración, como son la refracción, el asomeramiento, la disipación de energía por fondo, así como los fenómenos que se producen en profundidades reducidas, como la rotura del oleaje y las interacciones no-lineales.

Es imperativo definir bien todos los elementos que necesita el SWAN para obtener una buena propagación a los puntos de control que se definirán más adelante.

En primer lugar, la batimetría ha de incluir todos los elementos batimétricos que puedan producir un efecto en la transformación del oleaje. La batimetría de la que se dispone se puede ver en la siguiente imagen:

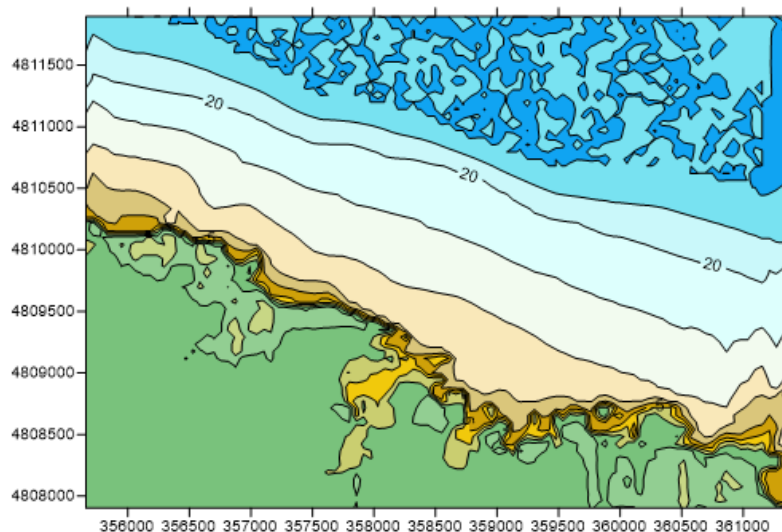


Imagen 12. Batimetría de la zona de estudio. Fuente: elaboración propia.

En segundo lugar, las mallas de cálculo han de tener la suficiente resolución para obtener unos buenos resultados en los puntos de control. Las mallas generadas se pueden ver espacialmente en la Imagen 13, mientras que en la Imagen 14 y en la Imagen 15, se puede apreciar la resolución de la malla general (celdas de 25x25 metros) y de la malla de detalle (celdas de 12,5x12,5 metros), respectivamente.



Imagen 13. Mallas de estudio aplicadas en el SWAN. Fuente: elaboración propia a través de Google Earth.

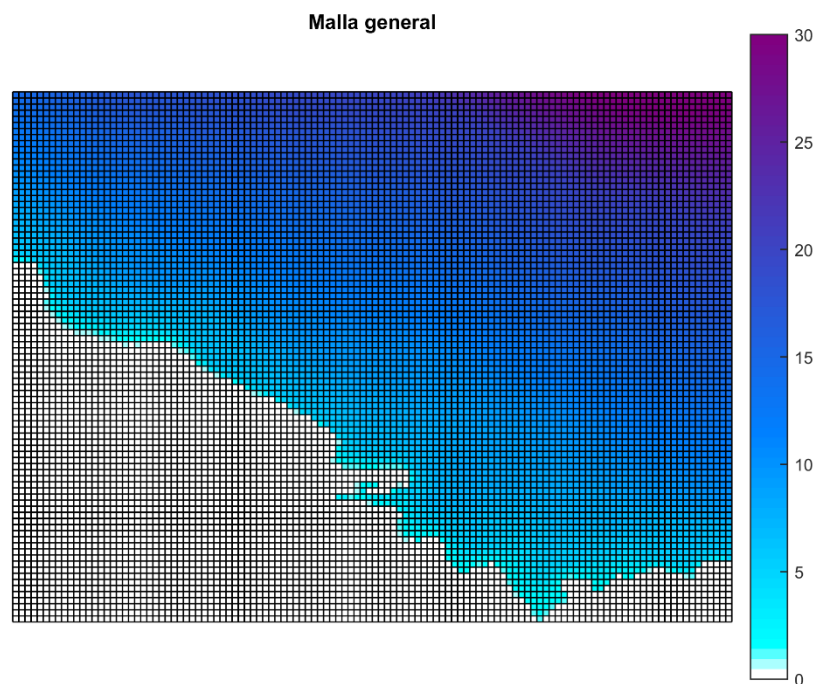


Imagen 14. Resolución de la malla general. Fuente: elaboración propia mediante SWAN.

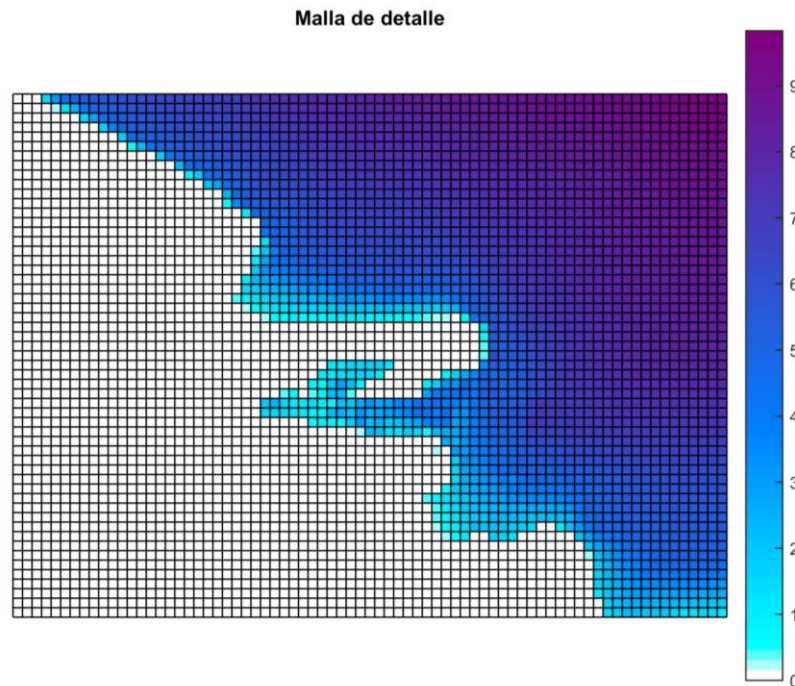


Imagen 15. Resolución de la malla de detalle. Fuente: elaboración propia mediante SWAN.

Cabe destacar que el punto del forzamiento está situado en el centro del contorno norte de la malla general, coincidiendo con las coordenadas del punto del que se poseen los datos climáticos offshore, los cuales hay que propagar hacia los puntos de control.

Una vez definido todo lo anteriormente descrito, se procede a ejecutar la propagación de los 50 casos obtenidos en el MAXDISS de MAXDISSes hacia los puntos de control, los cuales son 3, y se sitúan a pie de dique tal y como se muestra en la Imagen 16.



Imagen 16. Puntos de control del clima a pie de dique. Fuente: elaboración propia a través de Google Earth.

El último paso de la metodología que se aplica consiste en la reconstrucción de la totalidad de los 5 escenarios de estudio, en los 3 puntos de control. Para ello, se emplea la técnica de interpolación no lineal basada en las funciones de base radial (RBF).

6.1. ANÁLISIS DEL CLIMA EN LOS PUNTOS DE CONTROL

Una vez se obtiene la serie temporal climática de los 5 escenarios de estudio (Apartado 4.3) en los 3 puntos de control, es necesario realizar un análisis climático para conocer de primera mano las características del oleaje que llega a la obra de abrigo.

Se podría añadir todas las gráficas que tanto MAXDISS al realizar la reconstrucción como las que se pueden obtener a través de AMEVA, pero se ha decidido realizar varios scatter comparativos entre el oleaje offshore y cada punto de control de la altura de ola y su dirección, las dos variables más representativas de los procesos que se generan en la propagación del oleaje.

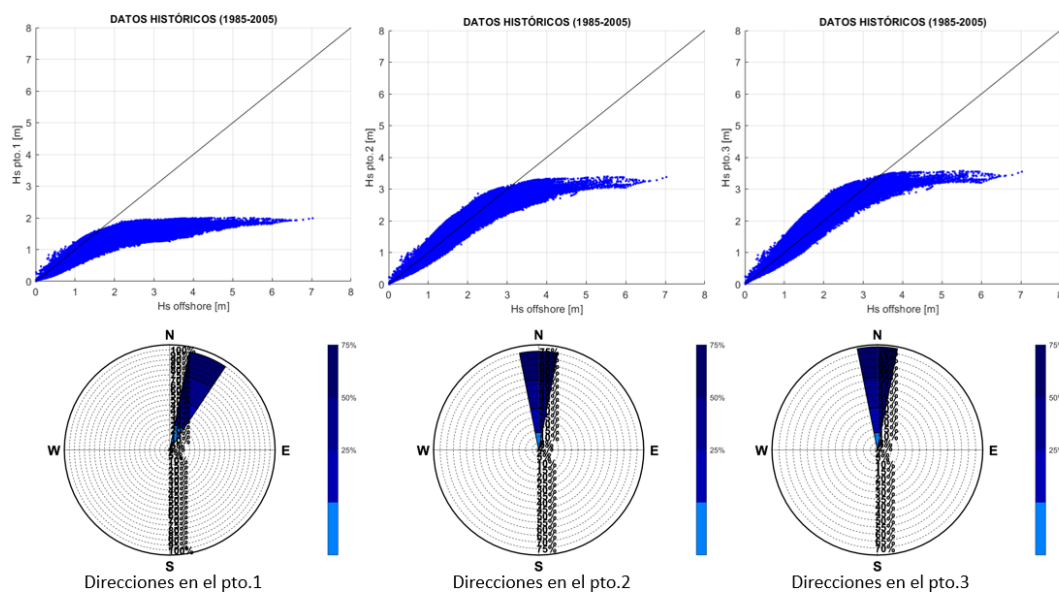


Imagen 17. Datos climáticos para el Escenario 1. Fuente: elaboración propia.

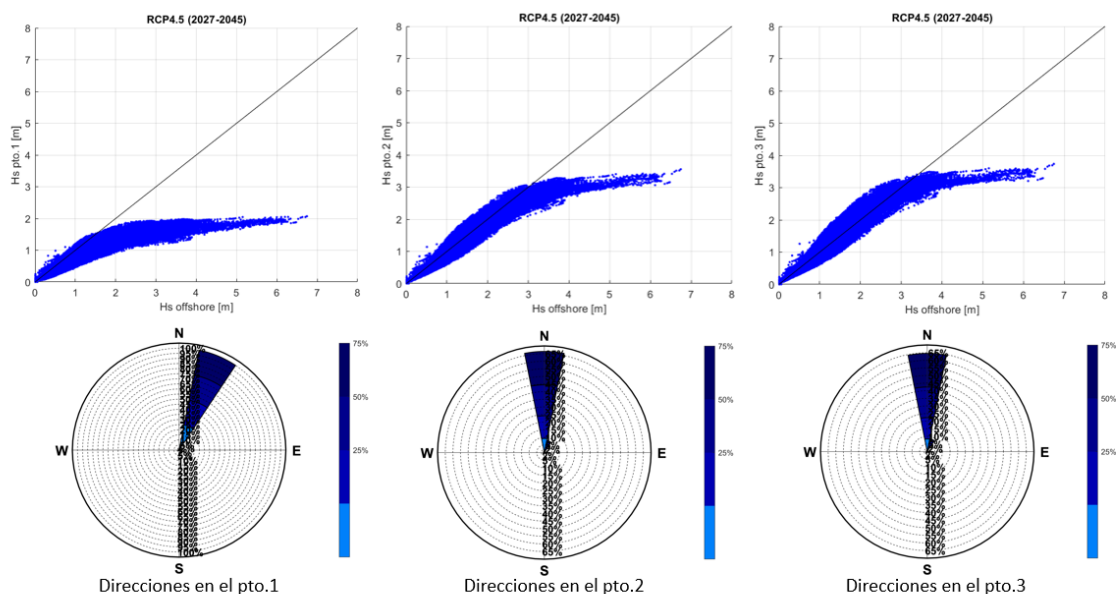


Imagen 18. Datos climáticos para el Escenario 2. Fuente: elaboración propia.

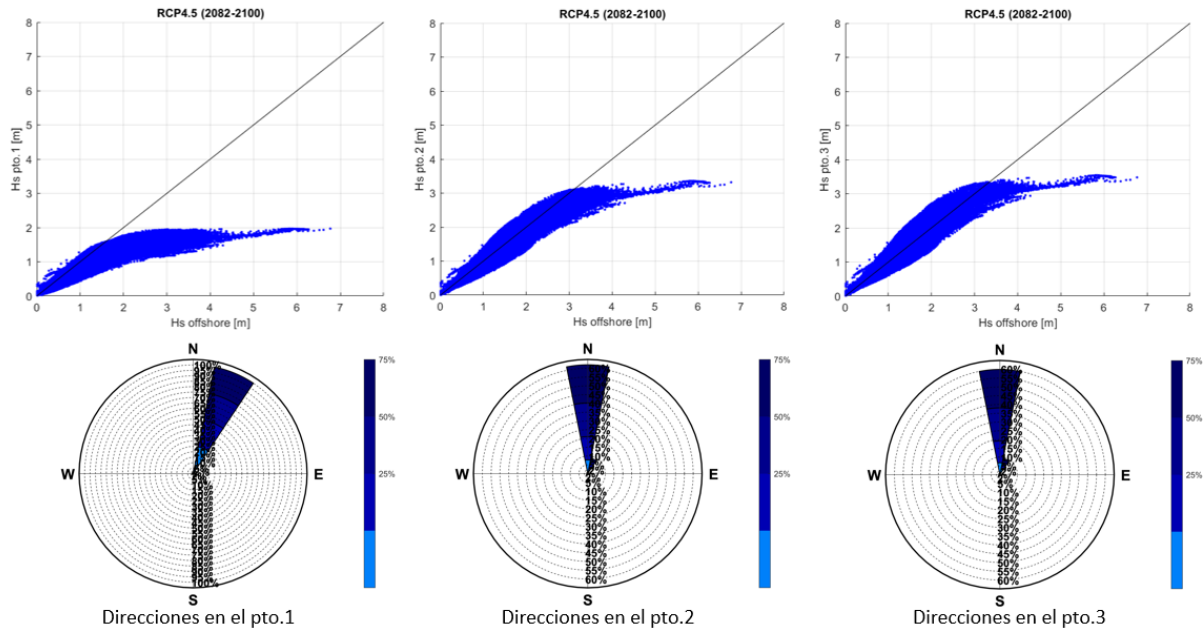


Imagen 19. Datos climáticos para el Escenario 3. Fuente: elaboración propia.

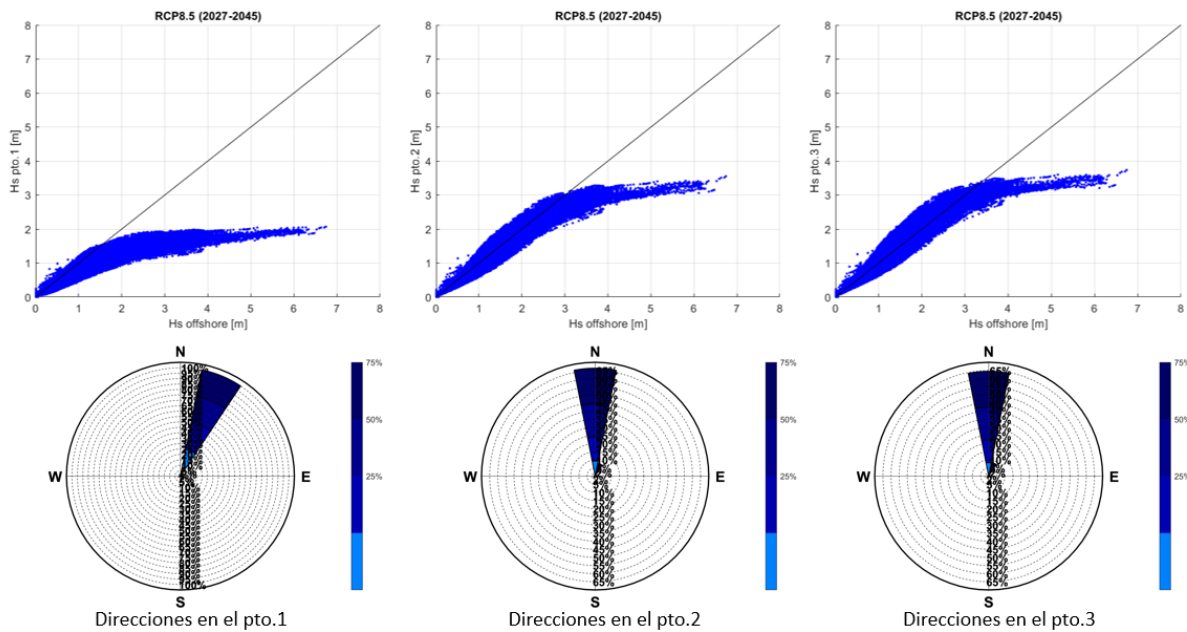


Imagen 20. Datos climáticos para el Escenario 4. Fuente: elaboración propia.

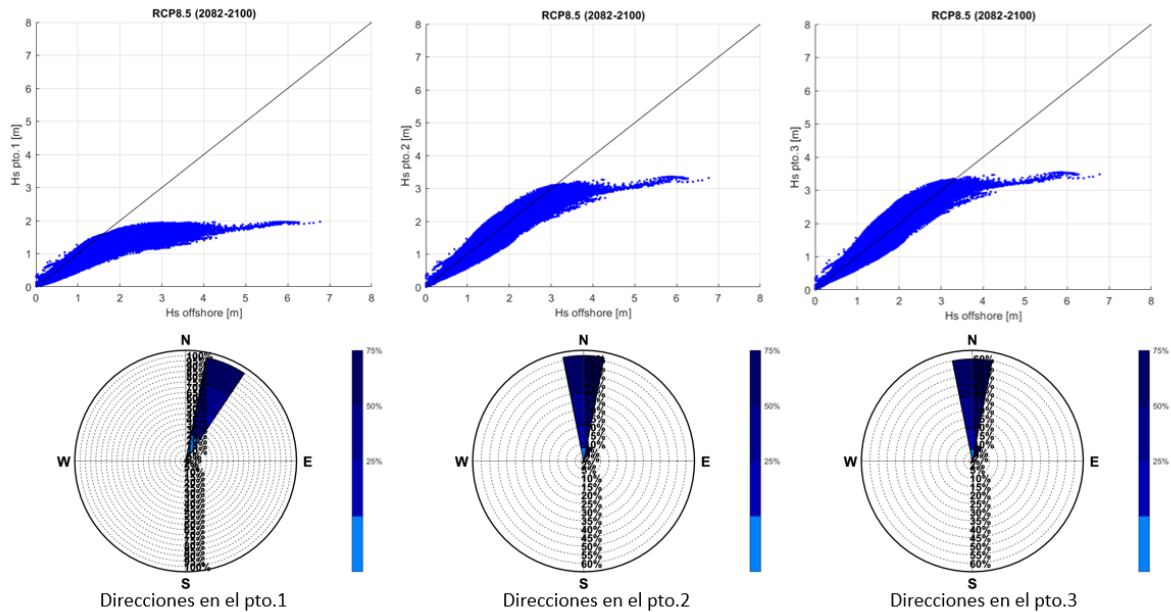


Imagen 21. Datos climáticos para el Escenario 5. Fuente: elaboración propia.

Como era de esperar, el oleaje en el punto 1 es, aproximadamente, un 70% menor que en el punto offshore, mientras que en los puntos 2 y 3 se reduce aproximadamente un 60%. Esto se debe a que el punto 1 se encuentra a una profundidad menor. También se aprecia el efecto de la propagación desde el punto offshore (dirección predominante NW, Imagen 7, Imagen 8 y Imagen 9) hasta los puntos de control, ya que toman una dirección N para los puntos 2 y 3, y una dirección NNE para el punto 1, debido, tal vez, a la laja rocosa que conforma la denominada “Punta del Guruñu”. También se pueden apreciar pequeñas variaciones entre escenarios climáticos (RCP4.5 y RCP8.5) y a corto y medio plazo.

7. OBRA DE ABRIGO

En el marco de actuación objeto de este Trabajo, con respecto al puerto de Llanes, la obra de abrigo estudiada se corresponde con el dique principal del puerto.



Imagen 22. Dique de abrigo del puerto de Llanes. Fuente: elaboración propia a través de Google Earth.

Con los datos de los que se disponen, se puede caracterizar el dique con dos secciones diferenciadas (representadas en panta en la Imagen 22). A continuación, se muestran los planos de la sección tipo de ambas secciones (Gobierno del Principado de Asturias).

Todas las cotas están referenciadas al Cero del Puerto, que coincide con la Bajamar Máxima Viva Equinoccial (BMVE).

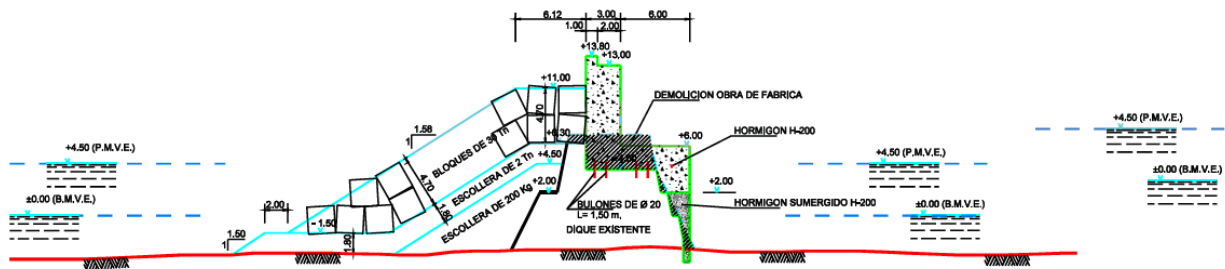


Imagen 23. Sección tipo A. Fuente: Consejería de Infraestructuras, Ordenación del Territorio y Medio Ambiente del Gobierno del Principado de Asturias.

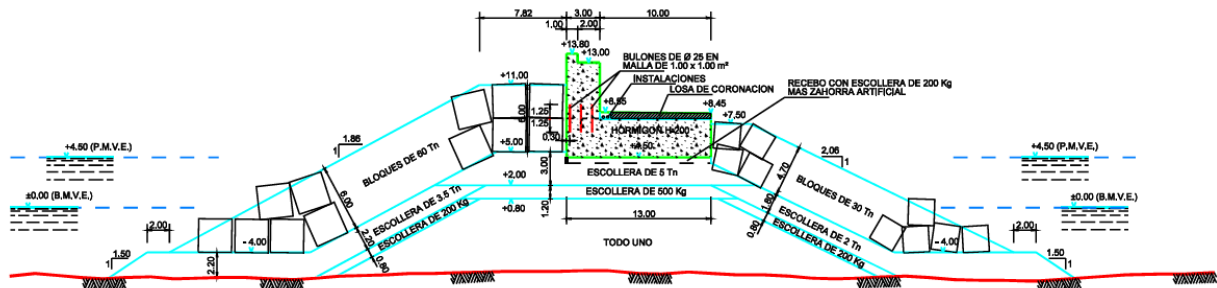


Imagen 24. Sección tipo B. Fuente: Consejería de Infraestructuras, Ordenación del Territorio y Medio Ambiente del Gobierno del Principado de Asturias.

8. EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD

Para evaluar la vulnerabilidad de los impactos producidos por el cambio climático en el puerto de Llanes, se ha dividido en 3 zonas las áreas protegidas por el dique (Imagen 25).



Imagen 25. Zonificación del puerto de Llanes. Fuente: elaboración propia a través de Google Earth.

Los puntos de control del clima a pie de dique (Imagen 16) se corresponden, respectivamente, a las zonas en las que se ha dividido el dique, ya que cada zona tiene un uso distinto, por lo que la operatividad en ellos será también distinta, como se explicará a continuación. Cabe destacar que para la Zona I y la Zona II, la sección tipo del dique se corresponde con la A (Imagen 23), mientras que para la Zona III se corresponde con la sección tipo B (Imagen 24).

8.1. CARACTERIZACIÓN DE LA OBRA DE ABRIGO

En primer lugar, es necesario caracterizar cada tramo de la obra de abrigo, que se corresponde con las zonas anteriormente descritas. Para ello, se siguen las directrices de la ROM 0.0-01, en la que se especifican las bases de cálculo que en una obra marítima se suele analizar, definiendo previamente el carácter general y operativo de cada tramo (Puertos del Estado, 2007).

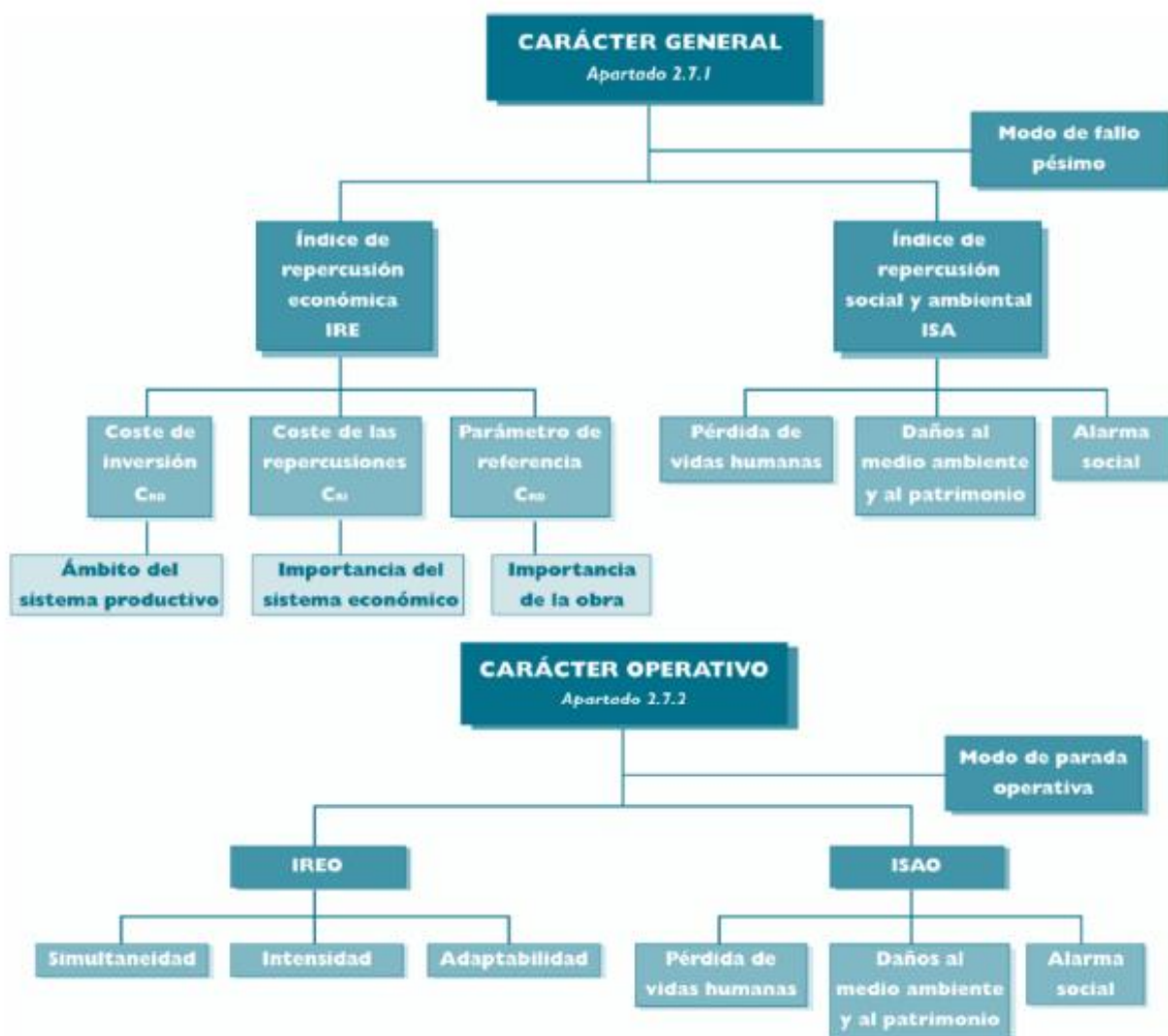


Imagen 26. Caracteres general y operativo de los tramos de la obra. Fuente: ROM 0.0-01.

Dichos caracteres están determinados por diferentes Índices, los cuales se explican a continuación:

- **Carácter general de la obra:**
 - Índice de Repercusión Económica (IRE). Valora cuantitativamente las repercusiones económicas por reconstrucción del tramo de obra, y por cese o afección de las actividades directamente relacionadas con ella, previsibles, en el caso de producirse la destrucción o la pérdida de operatividad total de la misma.
 - Índice de Repercusión Social y Ambiental (ISA). Estima de manera cualitativa el impacto social y ambiental esperable en el caso de producirse la destrucción o pérdida de operatividad total de la obra marítima, valorando la posibilidad y alcance de: pérdida de vidas humanas, daños en el medio ambiente y en el patrimonio histórico-artístico y alarma social generada, considerando que el fallo se produce una vez consolidadas las actividades económicas directamente relacionadas con la obra.
- **Carácter operativo de la obra:**
 - Índice de Repercusión Económica Operativo (IREO). Valora cuantitativamente los costes ocasionados por la parada operativa del tramo de obra.
 - Índice de Repercusión Social y Ambiental Operativo (ISAO). Estima de manera cualitativa el impacto social y ambiental esperable en el caso de producirse un modo de parada operativa de la obra marítima, valorando la posibilidad y alcance de: pérdida de vidas humanas, daños en el medio ambiente y en el patrimonio histórico-artístico y alarma social generada.

A partir de los valores de los IRE, ISA, IREO e ISAO, se pueden determinar una serie de valores para las bases de cálculo de las infraestructuras portuarias, como son:

- **Vida útil mínima.** Periodo de tiempo mínimo que transcurre durante la fase de servicio de una obra; se expresa en años. En general corresponde al periodo de tiempo mínimo en el que la obra cumple la función principal para la que fue concebida.
- **Máxima probabilidad conjunta de fallo (pf).** Valor máximo admisible de la probabilidad de fallo en la vida útil de la obra frente a todos los modos de fallo principales adscritos a todos los Estados Límite Últimos (ELU) o Estados Límite de Servicio (ELS).
- **Operatividad mínima.** Es el valor mínimo de operatividad anual. A su vez, la operatividad se define como el valor complementario de la probabilidad de parada operativa frente a todos los modos de parada principales adscritos a todos los Estados Límite Operativo (ELO).
- **Número medio de paradas operativas** (número de veces que, en promedio, en el año, un tramo de obra deja de cumplir los requisitos de explotación, debido a la ocurrencia de todos los modos de parada operativas), y **duración máxima de una parada operativa** (tiempo máximo esperado, en el año, que transcurre desde que se produce una parada operativa hasta que se restablece la explotación del tramo de obra; se expresa en horas). Estos dos valores no son objeto de estudio en el presente Trabajo.

INDICE DE REPERCUSIÓN ECÓNOMICA (IRE)

Se calcula de la siguiente forma:

$$IRE = \frac{C_{RD} + C_{RI}}{C_0} \quad (1)$$

De donde:

- C_{RD} es el coste por reconstrucción del tramo de obra; a falta de información real, para este Trabajo se toma el valor de 2M€.
- C_0 es el parámetro económico de adimensionalización, que en España toma el valor de 3M€.
- C_{RI} es el coste por cese o afección de las actividades económicas que se realizan el tramo de obra.

Este parámetro se calcula teniendo en cuenta diferentes variables, de forma que:

$$\frac{C_{RI}}{C_0} = C \cdot (A + B) \quad (2)$$

De donde:

Coeficiente del ámbito del sistema: A		
Local (1)	Regional (2)	Nacional/Internacional (5)
Coeficiente de la importancia estratégica: B		
Irrelevante (0)	Relevante (2)	Esencial (5)
Coeficiente de la importancia económica: C		
Irrelevante (0)	Relevante (1)	Esencial (2)

Tabla 1. Coeficientes para el cálculo del IRE. Fuente: elaboración propia.

Por lo que, el valor del IRE para todo el dique es de 9.

ÍNDICE DE REPERCUSIÓN SOCIAL Y AMBIENTAL (ISA)

Se calcula de la siguiente forma:

$$ISA = ISA_1 + ISA_2 + ISA_3 \quad (3)$$

De donde:

Subíndice de posibilidad y alcance de pérdida de vidas humanas ISA ₁				
Remoto (0)	Bajo (3)	Alto (10)	Catastrófico (20)	
Subíndice de daños en el medio ambiente y patrimonio artístico ISA ₂				
Remoto (0)	Bajo (2)	Medio (4)	Alto (8)	Muy alto (15)
Subíndice de alarma social ISA ₃				
Remoto (0)	Medio (5)	Alto (10)	Maxima (15)	

Tabla 2. Coeficientes para el cálculo del ISA. Fuente: elaboración propia.

Por lo que el valor del ISA para todo el dique es de 12.

ÍNDICE DE REPERCUSIÓN ECONÓMICA OPERATIVO

Se calcula de la siguiente forma:

$$IREO = F \cdot (D + E) \quad (4)$$

De donde:

Coeficiente de simultaneidad D		
Periodos no simultáneos (0)	Periodos simultáneos (5)	
Coeficiente de intensidad E		
Poco intensivo (0)	Intensivo (3)	Muy intensivo (5)
Coeficiente de adaptabilidad F		
Alta (0)	Media (1)	Baja (3)

Tabla 3. Coeficientes para el cálculo del IREO. Fuente: elaboración propia.

Cada tramo de obra, es decir, cada zona, tiene un IREO distinto, aunque en este caso se ha considerado que todas tengan el mismo valor: 24.

ÍNDICE DE REPERCUSIÓN SOCIAL Y AMBIENTAL OPERATIVO (ISAO)

Se calcula de la siguiente forma:

$$ISAO = ISAO_1 + ISAO_2 + ISAO_3 \quad (5)$$

De donde:

Subíndice de posibilidad y alcance de pérdida de vidas humanas ISAO ₁				
Remoto (0)	Bajo (3)	Alto (10)	Catastrófico (20)	
Subíndice de daños en el medio ambiente y patrimonio artístico ISO ₂				
Remoto (0)	Bajo (2)	Medio (4)	Alto (8)	Muy alto (15)
Subíndice de alarma social ISAO ₃				
Remoto (0)	Medio (5)	Alto (10)	Maxima (15)	

Tabla 4. Coeficientes para el cálculo del ISAO. Fuente: elaboración propia.

Cada tramo de obra, es decir, cada zona, tiene un ISAO distinto, aunque en este caso se ha considerado que todas tengan el mismo valor: 5.

Siguiendo los criterios de la ROM, las bases de cálculo de la obra, descritas a través del carácter general y operativo del tramo, se recogen en la Tabla 5.

IRE=9 (5<IRE<20, R ₂)	Vida útil = 25 años
ISA=12 (5<ISA<20, S ₂)	Probabilidad de fallo (ELS-ELU) = 0,1
IREO=24 (20<IREO, RO ₃)	Operatividad mínima (ELO) = 0,99
ISAO=5 (5<ISAO<20, SO ₂)	Número medio de paradas operativas = 5
RO ₃ / SO ₂	Duración máx. de una parada operativa = 3h

Tabla 5. Bases de cálculo del dique de abrigo. Fuente: elaboración propia.

Los modos de fallo en los que puede incurrir la estructura, teniendo en cuenta que en este Trabajo únicamente se analizan los fallos por exceso de carga hidráulica, se recogen en el siguiente esquema:

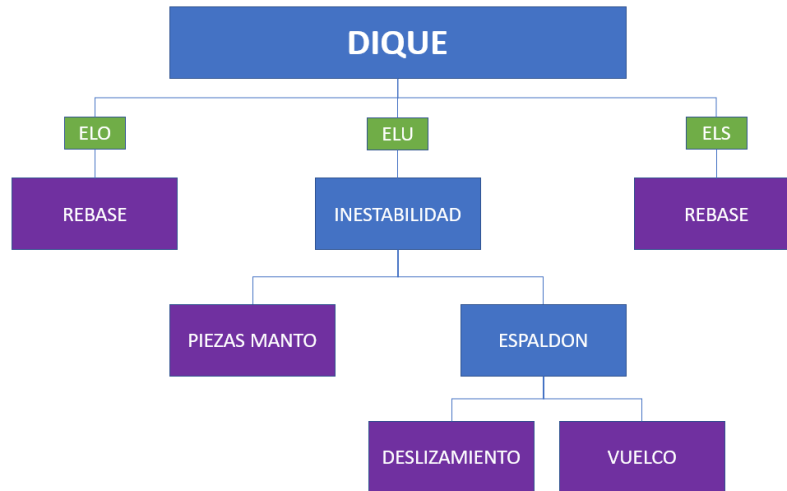


Imagen 27. Árbol de fallo del dique de abrigo. Fuente: elaboración propia.

A continuación, se desarrollan en los siguientes apartados los cálculos necesarios para analizar los fallos por exceso de carga hidráulica.

8.2. ANÁLISIS DE LA FUNCIONALIDAD

La funcionalidad está relacionada con la capacidad de servicio del puerto. Para analizar la funcionalidad de la estructura (ELS), es necesario determinar el rebase asociado al temporal de cálculo de la estructura en cada escenario, para cada punto de control. Por ello, en primer lugar, se calcula el periodo de retorno del temporal de cálculo, mediante la fórmula:

$$T_r = \frac{1}{(1 - p_f)^{\frac{1}{V}}} \quad (6)$$

Donde p_f es la probabilidad de fallo y V es la vida útil de la estructura; ambos valores se pueden consultar en la Tabla 5. Aplicando la ecuación, se obtiene que $T_r=237,7809$ años.

Para calcular el rebase en cada escenario y en cada punto de control, se aplica la formulación expuesta en el Capítulo 6 del EurOtop (EurOtop, 2018):

$$\frac{q}{\sqrt{g \cdot H^3}} = 0,1035 \cdot \exp \left[- \left(1,35 \cdot \frac{R_c}{H \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta} \right)^{1,3} \right] \quad (7)$$

Donde q es el caudal de rebase admisible, g es la gravedad (cuyo valor es $9,81 \text{ m/s}^2$), H es la altura de ola, R_c es el francobordo relativo, γ_f es el factor de rugosidad de la pendiente (cuyo valor es de 0,47 al estar el talud formado por cubos dispuestos de manera aleatoria en dos capas) y γ_β es el factor de oblicuidad del oleaje.

En primer lugar, es necesario determinar el factor de oblicuidad del oleaje, que depende directamente de las direcciones del oleaje. Tal y como se expone en el EurOtop, dependiendo de la dirección que toma el oleaje, el cálculo de este coeficiente es diferente:

- Para ángulos entre 0° y 80°, se aplica la siguiente ecuación:

$$\gamma_{\beta} = 1 - 0,0063|\beta| \quad (8)$$

- Para ángulos entre 80° y 110°, se aplica la misma ecuación, teniendo en cuenta que $\beta=80^\circ$, por lo que γ_{β} toma un valor constante de 0,496.
- Para ángulos mayores de 110°, no se genera rebase ($q=0$).

Posteriormente, se determina el francobordo relativo, teniendo en cuenta que la cota de coronación del dique es de 13,8 metros, igual para todo el dique (Imagen 23 e Imagen 24).

Una vez se obtienen todas las variables, se calcula el caudal de rebase y se realiza un análisis extremal por el método GEV, para cada uno de los 5 escenarios de estudio, en los 3 puntos de control. A continuación, se muestran 3 imágenes demostrativas del régimen extremal, una para cada punto de control y con un escenario distinto.

En apartados posteriores se muestran los resultados para el caudal de rebase asociado al temporal de cálculo de la estructura.

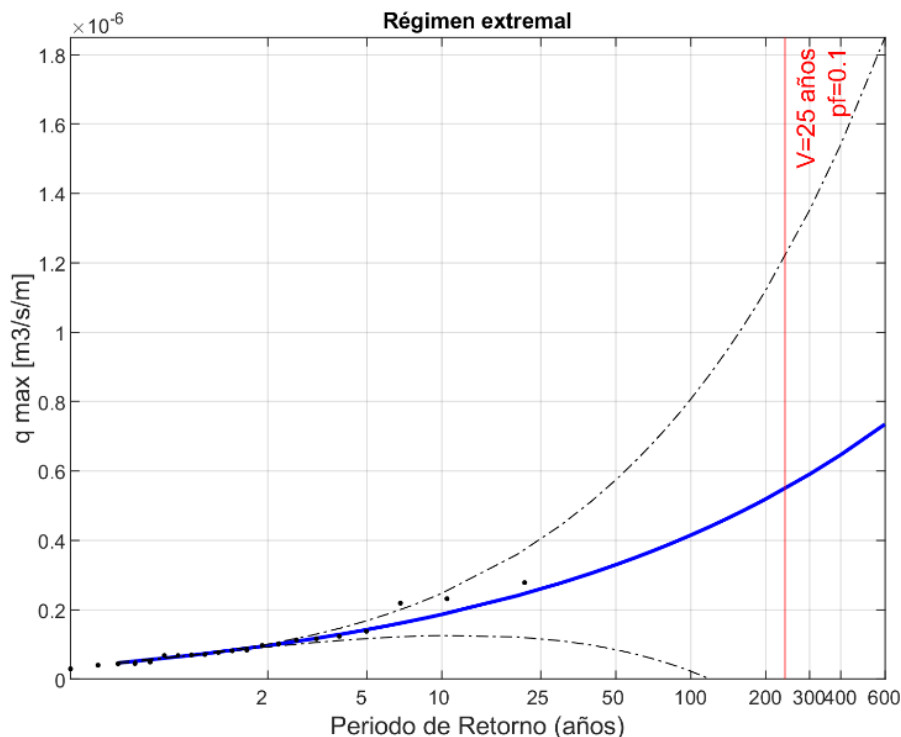


Imagen 28. Régimen extremal en el punto 1, serie histórica. Fuente: elaboración propia.

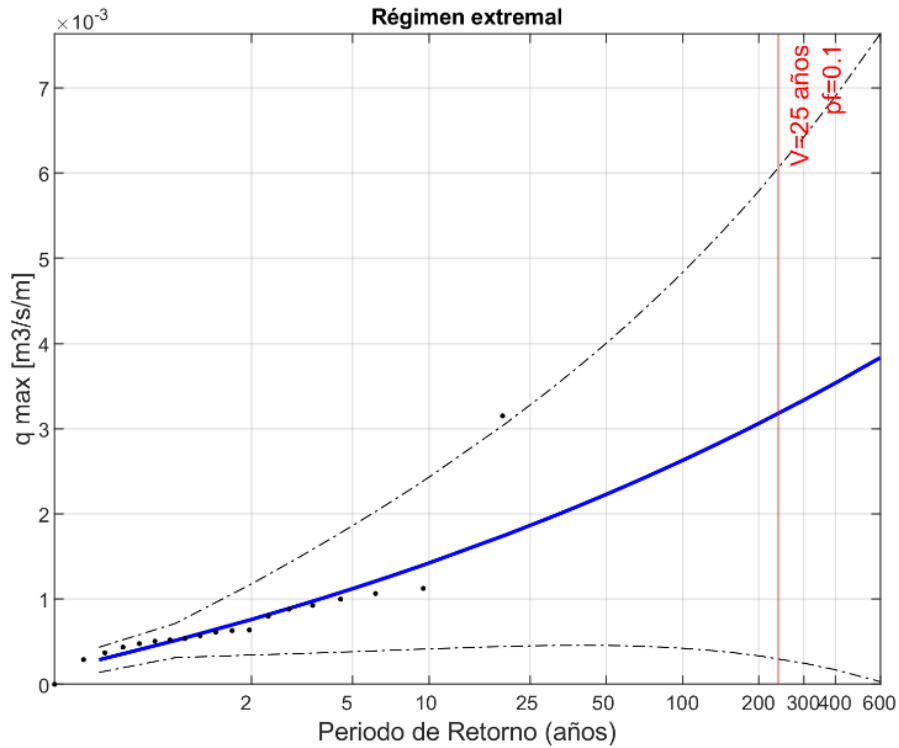


Imagen 29. Régimen extremal en el punto 2, RCP4.5 (2027-2045). Fuente: elaboración propia.

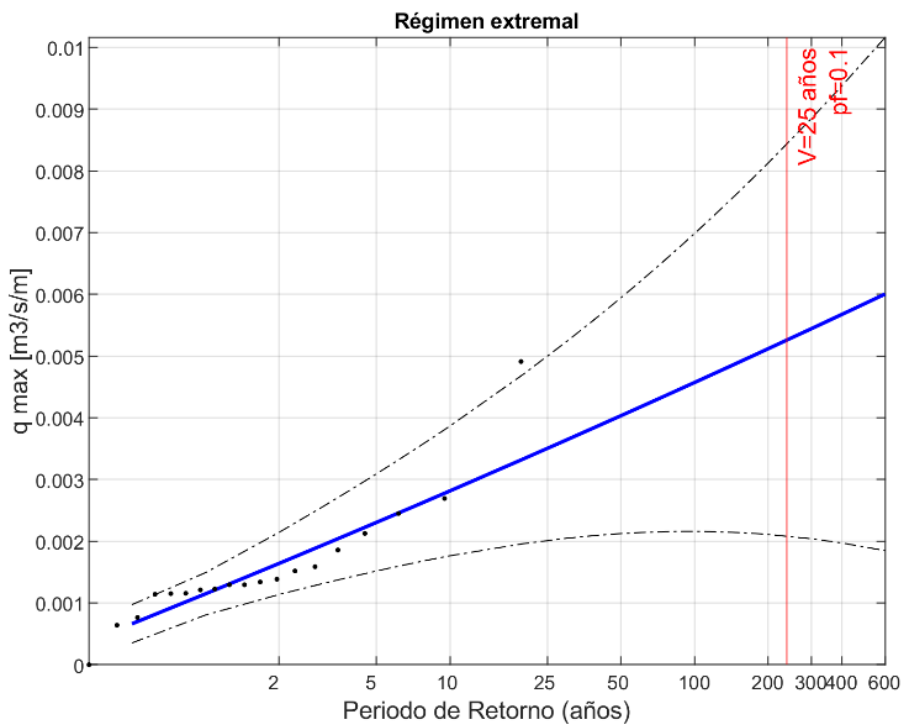


Imagen 30. Régimen extremal en el punto 3, RCP8.5 (2082-2100). Fuente: elaboración propia.

8.3. ANÁLISIS DE LA OPERATIVIDAD

La operatividad se relaciona con las características operativas del puerto, es decir, con su explotación. Para analizar la operatividad (ELO), al igual que para analizar la funcionalidad, es necesario determinar el régimen medio del rebase que se produce.

Tal y como se detalla en la Tabla 5, la operatividad mínima ha de ser del 0,99 a lo largo de todo el dique. Por ello, se calcula el percentil 99 del régimen medio de los caudales de rebase (calculados de igual forma que se explicó en el análisis funcional), para los 5 escenarios de estudio en los 3 puntos de control, cuyos resultados se muestran en apartados posteriores.

A continuación, se muestran 3 imágenes demostrativas del régimen medio, una para cada punto de control y con un escenario distinto.

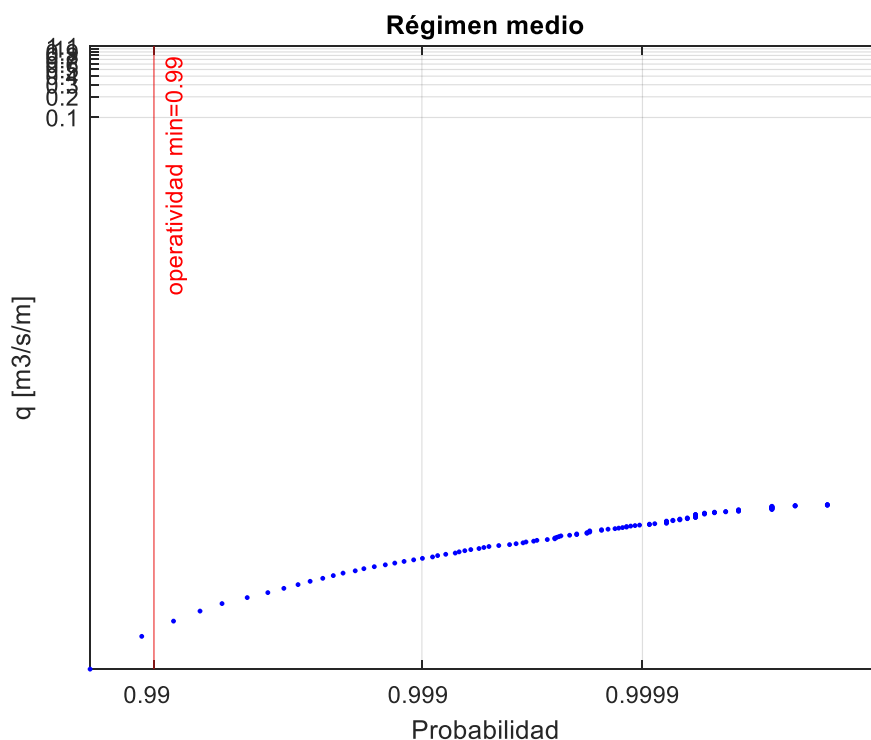


Imagen 31. Régimen medio en el punto 1, serie histórica. Fuente: elaboración propia.

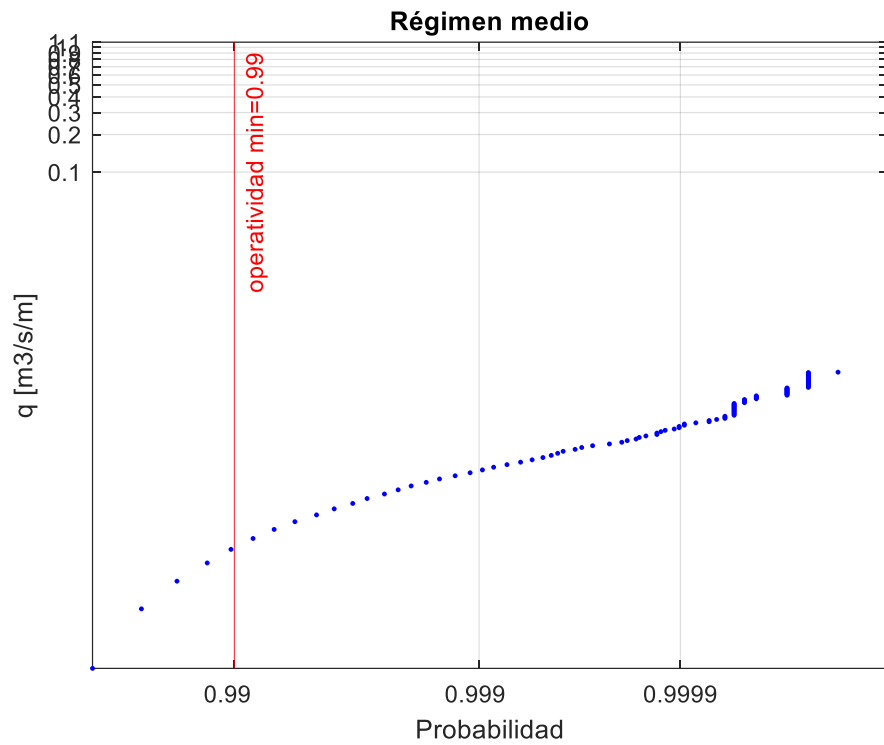


Imagen 32. Régimen medio en el punto 2, RCP4.5 (2027-2045). Fuente: elaboración propia.

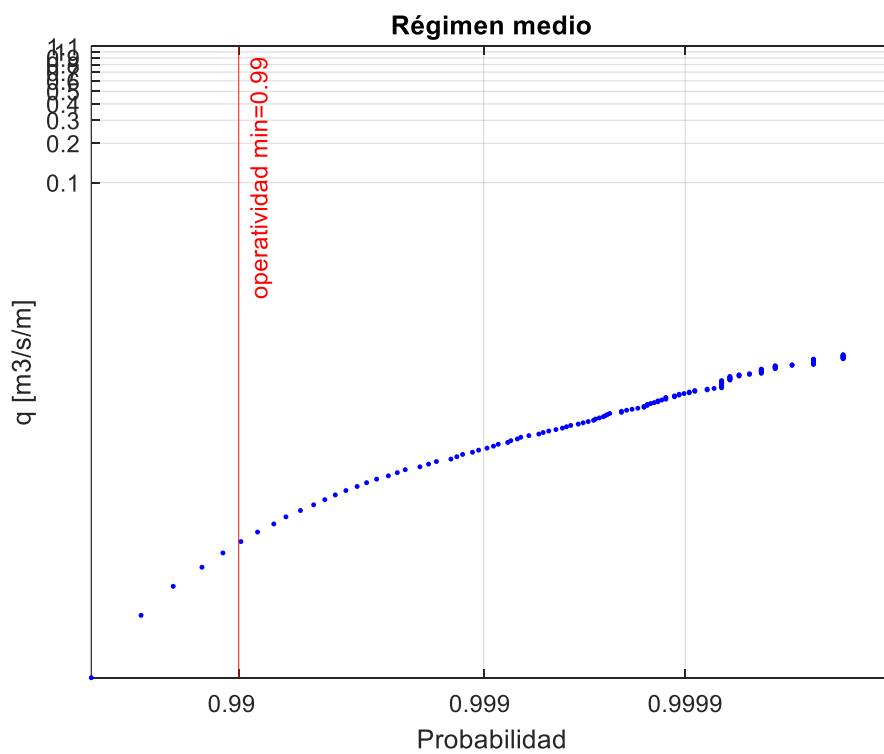


Imagen 33. Régimen medio en el punto 3, RCP8.5 (2082-2100). Fuente: elaboración propia.

8.4. ANÁLISIS DE LA FIABILIDAD ESTRUCTURAL

La fiabilidad estructural se relaciona con la seguridad de la propia estructura (ELU), y se determina mediante el análisis de la estabilidad de las piezas que conforman el manto y la estabilidad al deslizamiento y vuelco de la superestructura (espaldón).

Dicho análisis, se realiza considerando únicamente los temporales que golpean la estructura, al ser un análisis en el que se tienen en cuenta los regímenes extremos. Para determinar qué oleajes se consideran como temporales, se ha decidido seleccionar aquellos oleajes cuyas alturas de ola sean mayores al percentil 99 del régimen medio de cada uno de los 5 escenarios, en cada uno de los 3 puntos de control.

La estabilidad de las piezas del manto exterior se determina mediante el parámetro de daño acumulado de dichos temporales (N_{od}). Para calcular dicho parámetro, se aplica la formulación de Van der Meer para cubos (Coastal Engineering Manual, 2002), ya que el manto del dique del puerto de Llanes está formado por cubos de hormigón ($\rho=2100 \text{ kg/m}^3$) de 30 toneladas para la sección A (arranque del dique, Imagen 23), con un talud de aproximadamente 1V:1,5H, y de 60 toneladas para la sección B (morro del dique, Imagen 24), con un talud de aproximadamente 1V:2H. La formulación de Van der Meer es la siguiente:

$$\frac{H_s}{\Delta \cdot D_n} = \left(6,7 \cdot \frac{N_{od}^{0,4}}{N_z^{0,3}} + 1 \right) \cdot (S_{om})^{-0,1} \quad (9)$$

Donde H_s es la serie de oleaje considerados como temporales; Δ es la relación de la densidad sumergida (usando como densidad del agua del mar 1030 kg/m^3); D_n es el tamaño de los bloques; N_z es el número de olas del estado de mar; y S_{om} es el peralte de la ola en profundidades indefinidas.

Armour type	Damage number	Damage level		
		Start of damage	Intermediate damage	Failure
Cube	N_{od}	0.2-0.5	1	2
Tetrapod		0.2-0.5	1	1-5
Accropode		0	-	> 0.5
Cube	N_d	-	4%	-
Dolos		0-2%	-	$\geq 15\%$
Accropode		0%	1-5%	$\geq 10\%$

Tabla 6. Tabla 5.33 del Rock Manual Capítulo 5. Fuente: Rock Manual Ch. 5.

De acuerdo con la tabla anterior (The Rock Manual), se considera inicio de avería de los cubos cuando el N_{od} alcanza un valor aproximado entre 0,2 y 0,5, y el fallo cuando se alcanza un valor de 2,0.

Los resultados del parámetro de daño acumulado para cada uno de los 5 escenarios de estudio en los 3 puntos de control se recogen en apartados posteriores.

Para analizar la estabilidad al deslizamiento y vuelco del espaldón se utiliza el Método de Martín (Martín, 1995), que posee dos hipótesis de carga independientes: las presiones dinámicas y las presiones pseudohidrostáticas. Desde el punto de vista estructural, el espaldón presenta dos zonas de acción de cargas: su cara frontal, y su parte inferior.

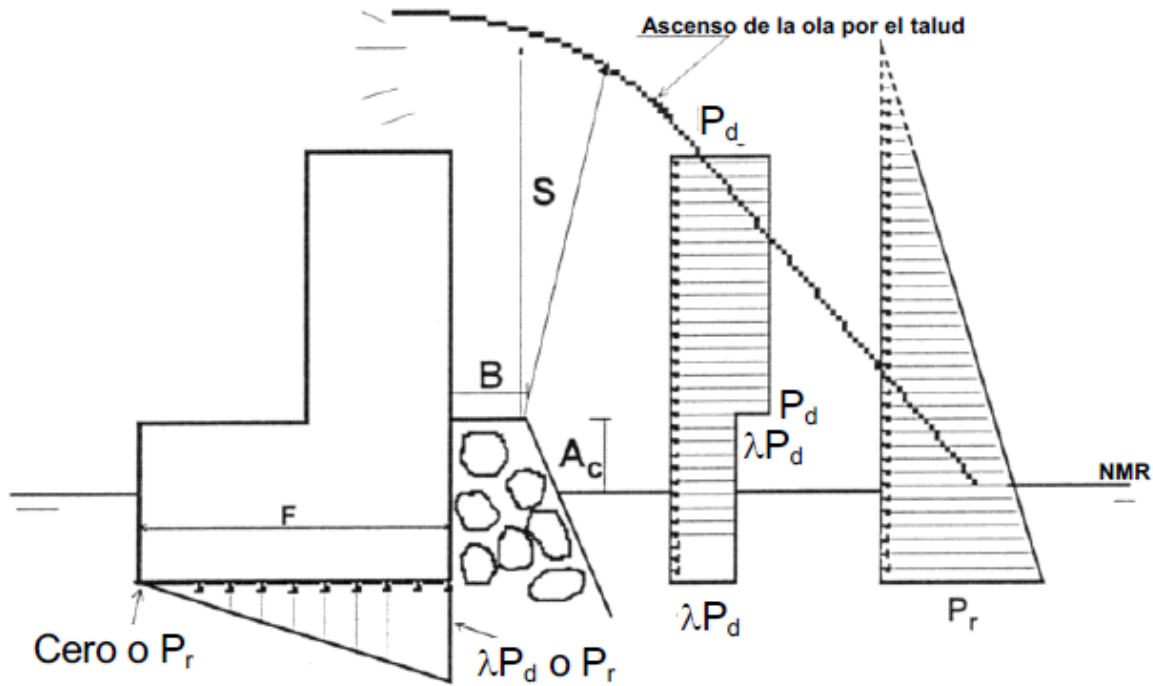


Imagen 34. Método de Martín (1999), Fuente: apuntes de Fundamentos de Obras Marítimas.

Las presiones dinámicas sobre la cara frontal del espaldón se dividen en dos partes: una pertenece a la zona expuesta del espaldón y otra a la zona protegida por los mantos.

$$P_{d,exp} = \alpha \cdot \rho \cdot g \cdot s \quad (10)$$

$$P_{d,pro} = \lambda \cdot \alpha \cdot \rho \cdot g \cdot s \quad (11)$$

Los parámetros usados se calculan de la siguiente manera:

$$\alpha = 2,9 \cdot \left(\frac{Ru}{H_{max}} \cdot \cos(\beta) \right)^2 \quad (12)$$

$$s = H_{max} \cdot \left(1 - \frac{Ac}{Ru} \right) \quad (13)$$

$$\lambda = 0,8 \cdot e^{-10,9 \cdot \left(\frac{B}{L} \right)} \quad (14)$$

H_{max} es la altura de ola máxima de los temporales, y varía para cada escenario y cada punto de control, comprobando si el oleaje es posible o si, por el contrario, se trata de una ola rota; el valor de A_c es igual a la cota de coronación del manto (que es igual a lo largo de todo el dique y su valor es +11 metros) menos el nivel del mar asociado a la H_{max} ; B es el ancho de la berma del manto (que varía a lo largo del dique); L es la longitud de onda a pie de dique asociado a la H_{max} ; β es el ángulo del talud; Ru es el Run-up que se produce, el remonte del oleaje por el talud, y se calcula siguiendo la Formulación de Losada y Giménez-Curto (1981) para oleaje regular:

$$Ru = Hmax \cdot Au \cdot (1 - e^{Bu \cdot Ir0}) \quad (15)$$

Donde Au y Bu son dos parámetros asociados al tipo de bloques que se encuentran en el talud, que, al ser cubos de hormigón, sus valores son 1,05 y -0,67, respectivamente. El número de Iribarren (I_{r0}), se calcula de la siguiente manera:

$$I_{r0} = \frac{\tan \alpha}{\left(\frac{H}{L_0}\right)^{0.5}} \quad (16)$$

Las subpresiones dinámicas siguen una ley triangular; el valor en la zona delantera de la base del espaldón es igual a la presión dinámica de la zona protegida, y el valor en la zona posterior de la base es despreciable.

Las presiones pseudohidrostáticas sobre la cara frontal del espaldón siguen una ley triangular, y se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$P_h = \mu \cdot \rho \cdot g \cdot (s + Ac - z) \quad (17)$$

Donde μ se calcula gráficamente:

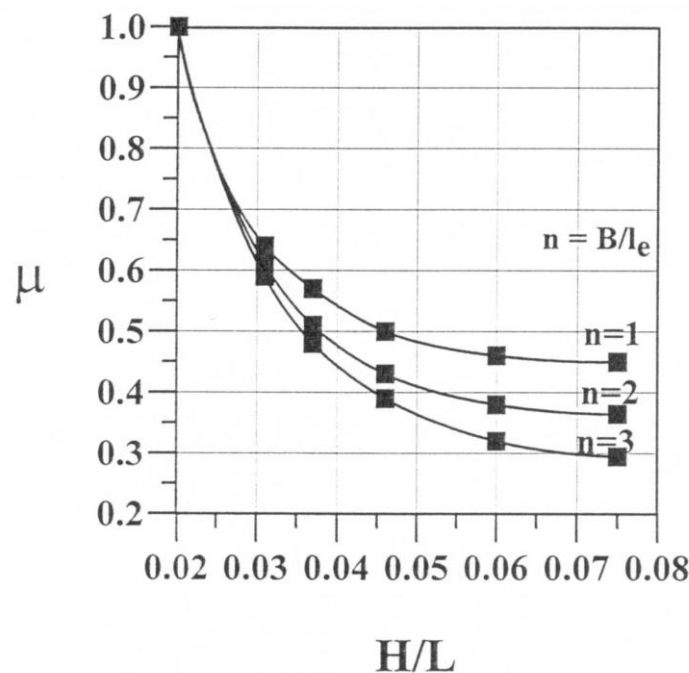


Imagen 35. Variación de μ . Fuente: Apuntes de Fundamentos de Obras Marítimas.

Las subpresiones pseudohidrostáticas siguen una ley trapezoidal, pero como la cota de cimentación no está en contacto con el agua, la subpresión en la parte posterior es igual a cero, por lo que la distribución que se forma es triangular, siendo el valor sobre la parte delantera igual al valor de la presión pseudohidrostática en el punto más bajo del espaldón.

Una vez obtenidas todas las presiones que actúan en las dos hipótesis de carga, se calculan los coeficientes al deslizamiento y vuelco, que han de ser mayores a 1,2, considerando que el valor de la fricción (μ) del espaldón con el núcleo sobre el que se apoya es de 0,6.

$$C_{deslizamiento} = \frac{\mu \cdot (W - F_v)}{F_h} > 1,2 \quad (18)$$

$$C_{vuelco} = \frac{M_w}{M_h + M_v} > 1,2 \quad (19)$$

Donde W es el peso de la superestructura, es decir, del espaldón; Fv son las fuerzas verticales (las subpresiones que se producen bajo el espaldón); y Fh son las fuerzas horizontales (las presiones sobre la pared frontal del espaldón). Así mismo, Mw son los momentos estabilizadores generados por el peso del espaldón; y Mh y Mv son los momentos desestabilizadores generados por las fuerzas horizontales y verticales, respectivamente.

En el apartado siguiente, se recogen los resultados de los coeficientes de deslizamiento y vuelco para las dos hipótesis de carga, en los 5 escenarios de estudio, para los 3 puntos de control.

8.5. RESULTADOS OBTENIDOS

En primer lugar, se recogen en la Tabla 7 los resultados obtenidos en el análisis de la funcionalidad del dique.

REBASE [l/s/m]	PTO1	PTO2	PTO3
Datos históricos (1985-2005)	5,50E-04	1,92	3,70
RCP4.5 (2027-2045)	1,15E-03	3,20	5,90
RCP4.5 (2082-2100)	1,45E-03	2,55	4,75
RCP8.5 (2027-2045)	5,30E-04	3,22	5,91
RCP8.5 (2082-2100)	1,62E-03	2,85	5,26

Tabla 7. Resultados obtenidos en el análisis de la funcionalidad. Fuente: elaboración propia.

Como ya se ha explicado con anterioridad, cada punto se corresponde con los datos climáticos a pie de dique para cada zona en la que se ha zonificado la obra de abrigo. Cada zona tiene un uso, por lo que, usando la clasificación de Leo Franco (Franco, 1994) para caudales de rebase (ver Tabla 8), se han determinado diferentes curvas de daño para caracterizar la vulnerabilidad al rebase de cada zona.

q (l/s/m)	SEGURIDAD FUNCIONAL		
1000	Inseguro a cualquier velocidad	Muy peligroso	Daños estructurales
10		Dique de hierba: peligroso	
1		Dique en talud: peligroso	
0,6	Dique en talud: inseguro aparcado		
0,3			
0,1	Dique vertical: inseguro aparcado	Dique vertical: peligroso	
0,03			
0,01	Inseguro a velocidad alta	Inconfortable pero no peligroso	Pequeños daños a accesorios
0,004			
0,001	Seguro a cualquier velocidad	Humedo pero no inconfortable	Sin peligro
	VEHÍCULOS	PEATONES	EDIFICIOS

Tabla 8. Clasificación de Leo Franco para caudales de rebase tolerables. Fuente: elaboración propia.

Como se puede ver en la Imagen 25, en la Zona I (datos climáticos del punto 1) se encuentra la lonja, por lo que, siguiendo la clasificación de Leo Franco, queda encuadrada en “edificios”; la Zona II (datos climáticos del punto 2) es donde se encuentra la dársena del puerto, donde los usuarios acceden con su coche, por lo que, siguiendo la clasificación de Leo Franco, queda encuadrada en “vehículos”; la Zona III (datos climáticos del punto 3), se trata del paseo por donde los transeúntes visitan el morro del dique, por lo que, siguiendo la clasificación de Leo Franco, queda encuadrada en “peatones”.

A continuación, se muestran unas gráficas donde se relaciona los valores recogidos en la Tabla 9 con las curvas de daño para evaluar la vulnerabilidad de cada zona.

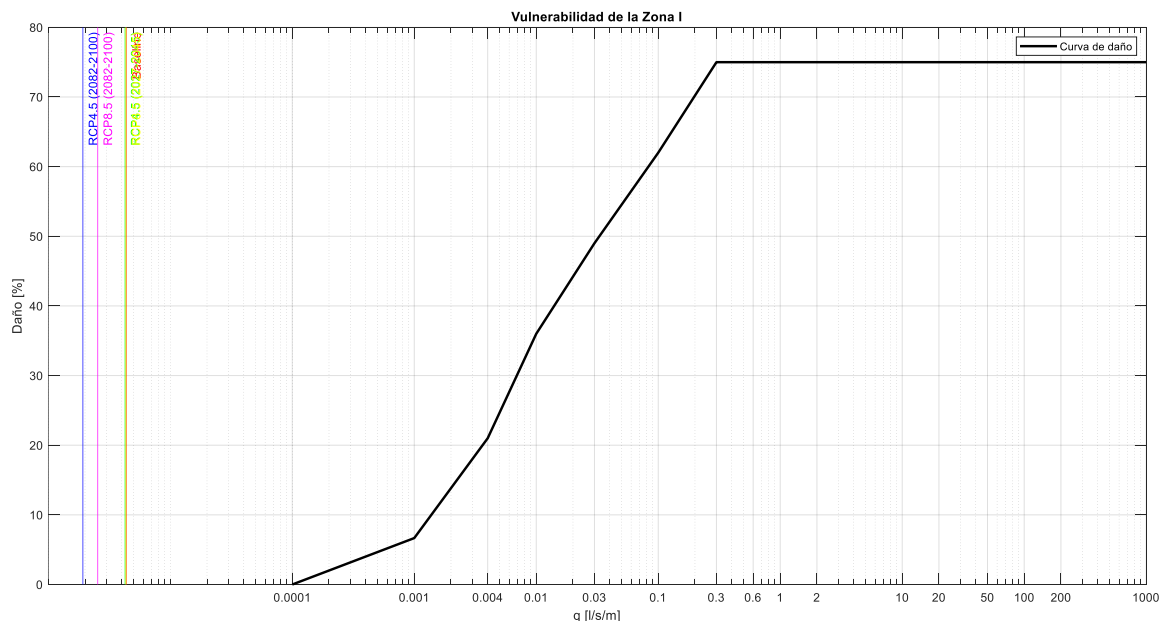


Imagen 36. Vulnerabilidad de la Zona I. Fuente: elaboración propia.

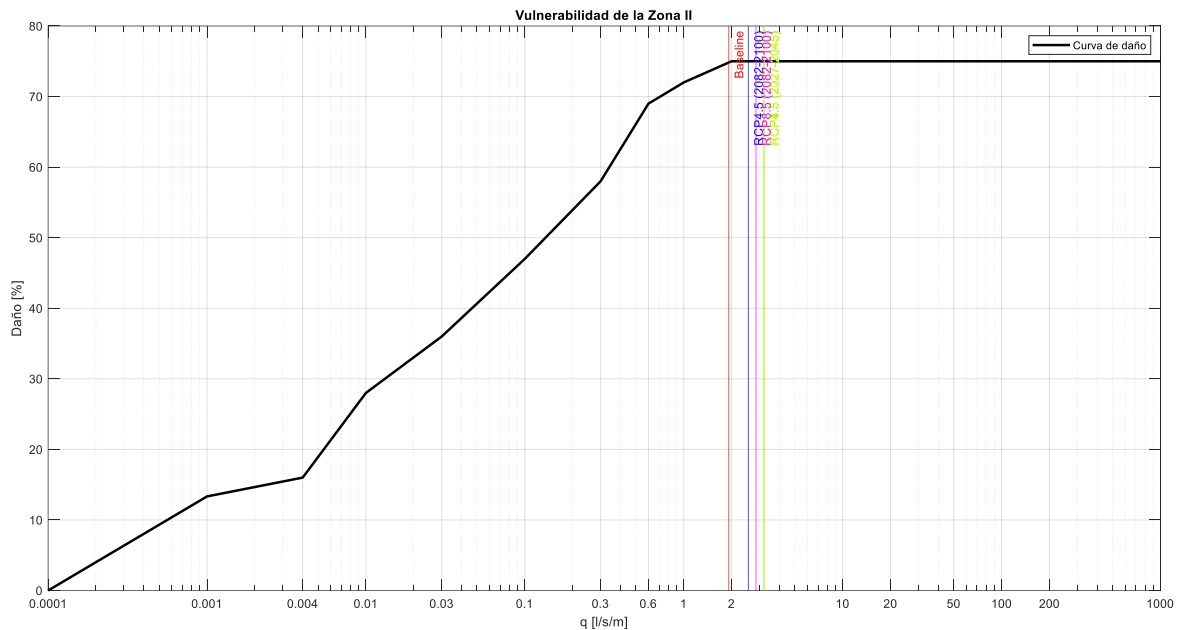


Imagen 37. Vulnerabilidad de la Zona II. Fuente: elaboración propia.

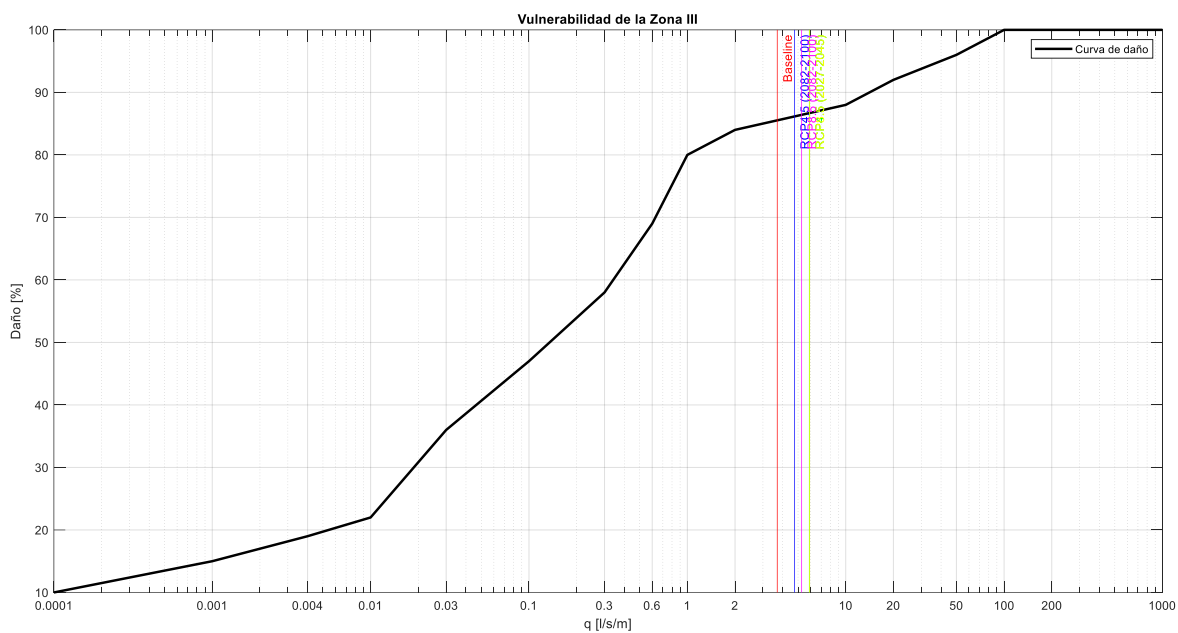


Imagen 38. Vulnerabilidad de la Zona III. Fuente: elaboración propia.

Si bien en la Zona I los resultados obtenidos arrojan que no se produce daño alguno, para las Zonas II y III parece que ya en la actualidad se genera un daño del 75% y 85% respectivamente, manteniéndose prácticamente constante para todas proyecciones y periodos estudiados en el caso de la Zona II, y aumentando levemente en el caso de la Zona III debido al cambio climático.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en el análisis de la operatividad.

REBASE [l/s/m]	PTO1	PTO2	PTO3
Datos históricos (1985-2005)	4,36E-06	0,102	0,267
RCP4.5 (2027-2045)	4,26E-06	0,108	0,280
RCP4.5 (2082-2100)	1,92E-06	0,058	0,167
RCP8.5 (2027-2045)	4,33E-06	0,109	0,282
RCP8.5 (2082-2100)	2,54E-06	0,067	0,191

Tabla 9. Resultados obtenidos en el análisis de la operatividad. Fuente: elaboración propia.

En este caso, para caracterizar la vulnerabilidad al rebase de cada zona, se utilizan los límites marcados por el EurOtop:

Hazard type and reason	Mean discharge q (l/s per m)	Max volume V _{max} (l per m)
People at structures with possible violent overtopping, mostly vertical structures	No access for any predicted overtopping	No access for any predicted overtopping
People at seawall / dike crest. Clear view of the sea. H _{m0} = 3 m H _{m0} = 2 m H _{m0} = 1 m H _{m0} < 0.5 m	0.3 1 10-20 No limit	600 600 600 No limit
Cars on seawall / dike crest, or railway close behind crest H _{m0} = 3 m H _{m0} = 2 m H _{m0} = 1 m	<5 10-20 <75	2000 2000 2000
Highways and roads, fast traffic	Close before debris in spray becomes dangerous	Close before debris in spray becomes dangerous

Imagen 39. Límites de rebase para peatones y vehículos. Fuente: Tabla 3.3 del EurOtop.

Conocido el clima a pie de dique, para la Zona I se considera una altura de ola de 2 metros, por lo que el caudal límite de rebase para la operatividad en esa zona es de 1 l/s/m, mientras que para la Zona II y III se considera una altura de ola de 3 metros, por lo que el caudal límite de rebase para la operatividad en esa zona es de 0,3 l/s/m, al considerarse que todo el dique debe ser operativo por peatones y poseer valores limitantes más restrictivos que para los vehículos.

Observando los valores de la Tabla 9, se observa que en para la Zona I se obtienen unos caudales despreciables teniendo en consideración el límite tomado. Para la Zona II, si bien los caudales de rebase obtenidos son más elevados que en la Zona I, están por debajo del límite tomado, pudiendo apreciar que el caudal de rebase en las proyecciones a largo plazo se reducen en comparación con el periodo histórico y las proyecciones a medio plazo. Sin embargo, en la Zona III, se obtienen unos caudales muy próximos al límite tomado, siendo apreciable también el aumento a medio plazo y la reducción de los mismos para las proyecciones a largo plazo.

En la siguiente tabla, se muestran los resultados obtenidos en el análisis de la fiabilidad estructural, en relación con la estabilidad de las piezas del manto.

Nod	PTO1	PTO2	PTO3
Datos históricos (1985-2005)	0,539	0,882	0,577
RCP4.5 (2027-2045)	0,632	1,191	0,978
RCP4.5 (2082-2100)	0,707	1,265	1,089
RCP8.5 (2027-2045)	0,836	1,186	0,968
RCP8.5 (2082-2100)	0,934	1,608	1,073

Tabla 10. Resultados del análisis de la fiabilidad estructural de las piezas del manto. Fuente: elaboración propia.

Como ya se detalló anteriormente, siguiendo el criterio establecido en el Rock Manual, los parámetros de daño obtenidos a lo largo de todo el dique, superan los valores de inicio de avería, situándose la gran mayoría en una avería intermedia, incluso muy próxima a la destrucción, como ocurre en la Zona II para el RCP8.5 a largo plazo, debido a que los cubos en esta zona son de 30 toneladas soportando oleajes de 3 metros de altura. Sin embargo, en la Zona III, donde aproximadamente el oleaje también es de 3 metros, los cubos son de 60 toneladas, y por ello el parámetro de daño es menor en la Zona III comparado con la Zona II.

Se puede apreciar que los valores de Nod aumentan para las proyecciones a corto y medio plazo. Esto se debe al aumento del nivel del mar, si bien el oleaje se reduce, ya que posibilita que el oleaje rompa más cerca de la estructura, permitiendo que llegue con más energía, capaz de generar un daño mayor sobre los bloques del manto.

Finalmente, se muestran las tablas con los resultados del análisis de la fiabilidad estructural en relación con la estabilidad del espaldón, donde se muestran los coeficientes de seguridad al desplazamiento (CSD) y al vuelco (CSV) para ambas hipótesis de carga (presiones dinámicas y presiones pseudohidrostáticas).

CSD, presiones dinámicas	PTO1	PTO2	PTO3
Datos históricos (1985-2005)	206,593	1,859	1,738
RCP4.5 (2027-2045)	inf	2,998	2,272
RCP4.5 (2082-2100)	inf	5,032	2,603
RCP8.5 (2027-2045)	inf	2,974	1,785
RCP8.5 (2082-2100)	inf	3,902	2,466

Tabla 11. Resultados del análisis de la fiabilidad estructural del espaldón. Fuente: elaboración propia.

CSV, presiones dinámicas	PTO1	PTO2	PTO3
Datos históricos (1985-2005)	257,446	1,479	1,327
RCP4.5 (2027-2045)	inf	1,604	2,751
RCP4.5 (2082-2100)	inf	6,626	3,154
RCP8.5 (2027-2045)	inf	1,575	2,634
RCP8.5 (2082-2100)	inf	5,215	2,982

Tabla 12. Resultados del análisis de la fiabilidad estructural del espaldón. Fuente: elaboración propia.

CSD, presiones pseudohidr.	PTO1	PTO2	PTO3
Datos históricos (1985-2005)	inf	24,196	11,565
RCP4.5 (2027-2045)	inf	19,709	8,533
RCP4.5 (2082-2100)	129,173	16,626	6,737
RCP8.5 (2027-2045)	inf	19,513	7,782
RCP8.5 (2082-2100)	109,638	15,629	7,100

Tabla 13. Resultados del análisis de la fiabilidad estructural del espaldón. Fuente: elaboración propia.

CSV, presiones pseudohidr.	PTO1	PTO2	PTO3
Datos históricos (1985-2005)	inf	21,093	10,287
RCP4.5 (2027-2045)	inf	18,866	7,773
RCP4.5 (2082-2100)	inf	14,704	6,600
RCP8.5 (2027-2045)	inf	18,700	8,491
RCP8.5 (2082-2100)	inf	13,863	7,413

Tabla 14. Resultados del análisis de la fiabilidad estructural del espaldón. Fuente: elaboración propia.

Como era de esperar, los valores de los CSD y CSV respecto a las presiones dinámicas aumentan en las proyecciones a medio y largo plazo debido a que estas presiones disminuyen, al ser las presiones que induce el oleaje (el cual disminuye en las proyecciones climáticas MIROC5) sobre la estructura.

Por el contrario, los valores de los CSD y CSV respecto a las presiones pseudohidroestáticas, las presiones que el nivel del mar ejercer sobre la estructura, disminuyen al aumentar el nivel del mar.

Cuando el resultado de los CSD y CSV es infinito, quiere decir que no se generan presiones, dinámicas o pseudohidroestáticas, por lo que tampoco se generan fuerzas horizontales y/o verticales sobre el espaldón.

Teniendo en cuenta los límites mínimos que marca la ROM para los CSD y CSV (1,2 en ambos casos), se cumplen todos los coeficientes de estabilidad al vuelco y deslizamiento en todos los escenarios de estudio.

9. ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO

Tal y como se detalla en los resultados mostrados, el dique del puerto de Llanes es vulnerable al cambio climático en su funcionalidad, es decir, en el caudal de rebase que se produce en los eventos extremos. Por ello, a continuación, se muestran algunas alternativas propuestas, para después, mediante un análisis multicriterio, seleccionar la alternativa óptima.

9.1. ALTERNATIVAS PROPUESTAS

Las alternativas propuestas son las siguientes:

- Alternativa 1: ampliación de la cota de coronación del dique, es decir, un aumento del muro vertical del espaldón, para evitar que las olas que lleguen puedan pasar al lado protegido del dique.
- Alternativa 2: variación del manto exterior, ya sea aumentando la rugosidad del talud añadiendo una nueva capa, o aumentando el ancho de la berma superior, ambas medidas para evitar que el oleaje remonte con tanta facilidad por el talud.
- Alternativa 3: implantación de un botaolas en la pared expuesta del espaldón, para devolver a barlomar el oleaje que pueda llegar.
- Alternativa 4: actuación sobre la denominada “Punta del Guruñu” para conseguir en las Zonas II y III un clima a pie de dique similar al existente en la Zona I.

Las consideraciones que se toman para realizar el análisis multicriterio son varias: según su funcionalidad, su operatividad, su fiabilidad estructural y el impacto social.

Para evaluar cada alternativa mediante el análisis multicriterio, se ha usado una escala numérica de 0 a 4, siendo:

- 0: impacto nulo.
- 1: impacto bajo.
- 2: impacto medio.
- 3: impacto alto.
- 4: impacto muy alto.

Una vez valorado cada criterio, se suma el valor dado para cada criterio en cada alternativa, siendo la de menor valor la que menor impacto negativo generaría y, por tanto, la alternativa seleccionada.

Teniendo en cuenta su funcionalidad, es decir, el rebase producido a sotamar del dique en eventos extremos, la Alternativa 1 cumpliría a la perfección, ya que, elevando la cota de coronación el rebase sería bastante menor que el actual. La Alternativa 2, también cumpliría los objetivos de reducir el rebase perfectamente, al tener el oleaje que recorrer mayor recorrido sobre el talud y la berma, perdiendo energía. La Alternativa 3 cumpliría su función, pero en menor medida, ya que, si llega un oleaje superior a la cota de coronación, rebasará la estructura y el botaolas no cumpliría con su función. La Alternativa 4, cumpliría el objetivo, al conseguir que el oleaje rompa antes de llegar a la estructura, pero al ser una medida indirecta, es decir, que no se aplica sobre el dique del puerto, se considera que no es tan eficaz como las Alternativas 1 y 2.

Teniendo en cuenta la operatividad del dique del puerto de Llanes, todas las alternativas tendrían un impacto negativo nulo, ya que ninguna de ellas afectaría negativamente a la operatividad, y, como ya se analizó anteriormente, el dique es totalmente operativo para todos los escenarios analizados.

En cuanto la fiabilidad estructural, las Alternativas 1 y 2 afectan directamente a las fuerzas estabilizadoras y desestabilizadoras que se ejercen sobre el espaldón, por lo que su estabilidad no está asegurada. También ocurre con la Alternativa 3, pero como las dimensiones de los botaolas son menores, se considera que el impacto negativo es menor que las dos Alternativas anteriores. En cambio, la Alternativa 4 no afecta a la fiabilidad del dique del puerto de Llanes.

Para analizar el impacto social, hay que analizar la ubicación del puerto de Llanes y de las actividades que se desarrollan tanto en el propio puerto como en la localidad que lo acoge. Como ya se detalló anteriormente, el puerto de Llanes es un pequeño puerto pesquero con un pasado muy activo, pero que en la actualidad su actividad pesquera es meramente testimonial de la gente local. Llanes es una ciudad muy turística en los meses estivales, y el puerto y sus cubos (Imagen 4) son uno de las atracciones turísticas más visitadas. Por ello, cualquier modificación que se ejecute en ellos tendrá un gran impacto visual, y por seguro la población se opondrá a ellos. De las alternativas planteadas, la Alternativa 1y la Alternativa 2, generarían grandes impactos en el dique actual, por lo que se descartan. La Alternativa 3, si bien no generaría un gran impacto visual, se descarta por la posible afección que se podría producir sobre los denominados Cubos de La Memoria. La Alternativa 4, en cambio, generaría muy poco impacto visual, al ubicarse en la Punta del Guruñu y no sobre el propio dique del puerto.

A continuación, se recoge en la Tabla 15, las valoraciones de cada impacto y la suma total para cada alternativa.

	Funcionalidad	Operatividad	Fiabilidad	Impacto social	TOTAL
Alternativa 1	0	0	3	5	8
Alternativa 2	0	0	2	4	6
Alternativa 3	1	0	1	2	4
Alternativa 4	1	0	0	1	2

Tabla 15. Análisis multicriterio de las alternativas propuestas. Fuente: elaboración propia.

Como se puede apreciar, la alternativa que menos impacto generaría es la Alternativa 4, la actuación sobre la Punta del Guruñu, por lo que es la alternativa seleccionada.

9.2. ALTERNATIVA SELECCIONADA

La Punta del Guruñu es un pequeño cabo de laja rocosa que emerge del mar Cantábrico con una orientación similar al dique del puerto de Llanes, a una distancia de aproximadamente 150 metros de éste. En aguas protegidas de este cabo, se encuentra la única playa urbana que posee la localidad de Llanes, la playa del Sablón.



Imagen 40. Ubicación de la punta del Guruñu. Fuente: elaboración propia a través de Google Earth.

Su extremo se ubica a la misma altura que el arranque del dique, siendo un polo de difracción para el oleaje, tal y como se puede ver en las diferentes rosas del oleaje en el punto 1 (Imagen 17 a Imagen 21), provocando que el oleaje pase de tener una dirección N (como en los puntos de control 2 y 3), a una dirección NNW (punto de control 1).

Como se ha visto anteriormente, la Punta del Guruñu tiene un efecto directo sobre el clima que llega a pie de dique, actuando como elemento reductor del oleaje y provocando que el oleaje llegue con una dirección oblicua al dique, motivo por el cual el rebase que se produce en la Zona I del dique es casi despreciable.

A continuación, se muestran dos imágenes de un temporal en noviembre de 2010 tomadas desde el mirador de la Moria, próximo al arranque del dique, en las que se puede ver cómo el oleaje rompe en la Punta del Guruñu (Imagen 41), y cómo llega al dique posteriormente (Imagen 42), pudiéndose apreciar claramente la diferencia del oleaje que llega al arranque (Zona I) y al morro del dique (Zona III).



Imagen 41. Oleaje rompiendo en la punta del Guruñu. Fuente: www.verderin.blogspot.com



Imagen 42. Oleaje que llega al dique. Fuente: www.verderin.blogspot.com

Una posible actuación sobre la Punta del Guruñu que tenga el efecto deseado, es decir, que provoque que los eventos extremos de oleaje no generen tanto rebase sobre el dique del puerto de Llanes, sería ubicar el polo de difracción más adelantado, mar adentro. Esto se conseguiría implantando un pequeño dique de baja coronación, que permita reducir el coeficiente de transmisión a su lado de sotamar, que a su vez es el lado de barlomar del dique de puerto de Llanes.

Además, al ubicar este dique en la Punta del Guruñu, se aumentaría la zona abrigada, permitiendo así que la línea de costa en la playa del Sablón avance, aumentando la playa seca, un gran aliciente para los usuarios de la playa, quienes se quejan porque en época estival, en pleamar, la zona seca se reduce mucho, temiendo que, con el cambio climático y la subida del nivel del mar, la playa pueda desaparecer por completo.

9.3. DISEÑO DE LA ALTERNATIVA SELECCIONADA

En este apartado, se realizará un diseño y dimensionamiento del dique rebasable que se ubicaría en la Punta del Guruñu, siguiendo la metodología desarrollada por César Vidal (Vidal, Losada, & Mansard, 1995), teniendo en cuenta únicamente su diseño estructural.

Los diques de baja coronación se dimensionan teniendo en cuenta los distintos sectores en los que se divide: taludes exterior e interior, coronación, y morro exterior e interior.

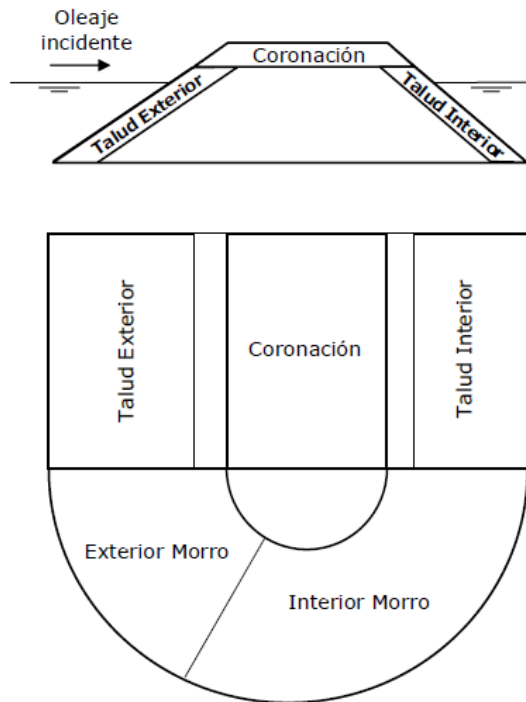


Imagen 43. Sectores de un dique de baja coronación. Fuente: Apuntes de Fundamentos de Obras Marítimas.

Se usan como datos climáticos los que se obtienen para la serie histórica en un punto de control situado en la ubicación que se correspondería con el morro del dique de baja coronación (ver Imagen 48), tras haber recurrido a la propagación realizada con el SWAN y, posteriormente, reconstruida la serie temporal histórica en dicha ubicación.

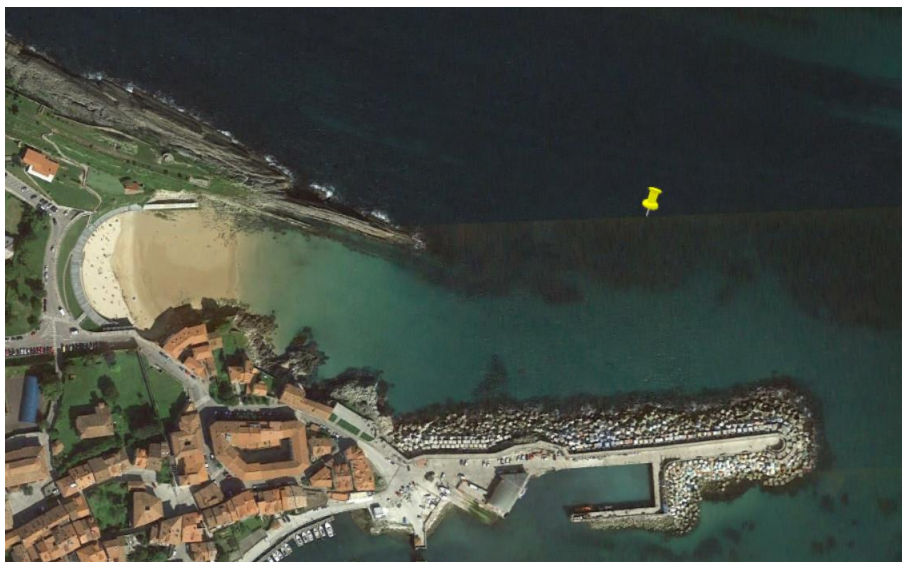


Imagen 44. Ubicación del punto de control para dimensionar el dique de baja coronación. Fuente: elaboración propia a través de Google Earth.

Para calcular la altura de ola de diseño, es necesario, en primer lugar, determinar el periodo de retorno de la tormenta de diseño de la estructura. Para ello, se utilizan las tablas 2.2.33 y 2.2.34 de la ROM 1.0-09.

Figura 2.2.33. IRE, ISA y vida útil mínima en función del tipo de área abrigada

TIPO DE ÁREA ABRIGADA O PROTEGIDA		ÍNDICE IRE ⁷		VIDA ÚTIL MÍNIMA (V _m) ⁷ (años)	
ÁREAS PORTUARIAS	PUERTO COMERCIAL	Puertos abiertos a todo tipo de tráfico	r ₃	Alto	50
		Puertos para tráfico especializados	r ₂ (r ₃) ¹	Medio (alto) ¹	25 (50) ¹
	PUERTO PESQUERO		r ₂	Medio	25
	PUERTO NAÚTICO-DEPORTIVO		r ₂	Medio	25
	INDUSTRIAL		r ₂ (r ₃) ¹	Medio (alto) ¹	25 (50) ¹
	MILITAR		r ₂ (r ₃) ²	Medio (alto) ²	25 (50) ²
	PROTECCIÓN DE RELLENOS O DE MÁRGENES		r ₂ (r ₃) ³	Medio (alto) ³	25 (50) ³
ÁREAS LITORALES	DEFENSA ANTE GRANDES INUNDACIONES ⁴		r ₃	Alto	50
	PROTECCIÓN DE TOMA DE AGUA O PUNTO DE VERTIDO		r ₂ (r ₃) ⁵	Medio (alto) ⁵	25 (50) ⁵
	PROTECCIÓN Y DEFENSA DE MÁRGENES		r ₁ (r ₃) ⁶	Bajo (alto) ⁵	15 (50) ⁷
	REGENERACIÓN Y DEFENSA DE PLAYAS		r ₁	Bajo	15

¹ El índice IRE se elevará a r₃ cuando el tráfico esté asociado con el suministro energético o con materia primas minerales estratégicos y no se disponga de instalaciones alternativas adecuadas para su manipulación y/o almacenamiento.

² El índice IRE se elevará a r₃ cuando la instalación militar se considere esencial para la defensa nacional.

³ En obras de protección de rellenos o de defensa de márgenes se tomará un índice IRE igual al señalado para el área portuaria en que se localiza.

⁴ Se entienden como diques de defensa ante grandes inundaciones, aquellos que en caso de fallo podrían producir importantes inundaciones en el territorio.

⁵ El índice IRE se elevará a r₃ cuando la toma de agua o el punto de vertido esté asociado con el abastecimiento de agua para uso urbano o con la producción energética.

⁶ El índice IRE se elevará a r₂ cuando en su zona de afección se localicen edificaciones o instalaciones industriales.

⁷ Los índices inferiores a r₂ de la tabla se elevarán un grado por cada 30 ME de coste de inversión inicial de la obra de abrigo.

Figura 2.2.34. ISA y probabilidad conjunta de fallo para ELU y P_{ELU}

TIPO DE ÁREA ABRIGADA O PROTEGIDA				ÍNDICE ISA		P _{ELU}	P _{ELU}
ÁREAS PORTUARIAS	COMER- CIAL	Con zonas de almacenamiento u operación de mercancías o pasajeros adosadas al dique ¹	Mercancías peligrosas ²	s ₃	Alto	0.01	0.07
			Pasajeros y Mercancías no peligrosas ¹	s ₂	Bajo	0.10	0.10
		Sin zonas de almacenamiento u operación de mercancías o pasajeros adosadas al dique		s ₁	No significativo	0.20	0.20
	PESQUERO	Con zonas de almacenamiento u operación adosadas al dique		s ₂	Bajo	0.10	0.10
		Sin zonas de almacenamiento u operación adosadas al dique		s ₁	No signif.	0.20	0.20
	NÁUTICO- DEPORT.	Con zonas de almacenamiento u operación adosadas al dique		s ₂	Bajo	0.10	0.10
		Sin zonas de almacenamiento u operación adosadas al dique		s ₁	No signif.	0.20	0.20
	INDUS- TRIAL	Con zonas de almacenamiento u operación de mercancías o pasajeros adosadas al dique ¹	Mercancías peligrosas ²	s ₃	Alto	0.01	0.07
			Mercancías no peligrosas	s ₂	Bajo	0.10	0.10
		Sin zonas de almacenamiento u operación de mercancías o pasajeros adosadas al dique		s ₁	No significativo	0.20	0.20
MILITAR	Con zonas de almacenamiento u operación adosadas al dique ¹		s ₃	Alto	0.01	0.07	
	Sin zonas de almacenamiento u operación adosadas al dique		s ₁	No signif.	0.20	0.20	
PROTEC- CIÓN *	Con zonas de almacenamiento adosadas al dique ¹	Mercancías peligrosas ²	s ₃	Alto	0.01	0.07	
		Mercancías no peligrosas	s ₂	Bajo	0.10	0.10	
ÁREAS LITORALES	DEFENSA ANTE GRANDES INUNDACIONES ³			s ₄	Muy alto	0.0001	0.07
	PROTECCIÓN DE TOMA DE AGUA O PUNTO DE VERTIDO			s ₂ (s ₃) ⁴	Bajo (alto) ⁴	0.10 0.0001	0.10 0.07
	PROTECCIÓN Y DEFENSA DE MÁRGENES			s ₂ (s ₄) ⁵	Bajo (muy alto) ⁵	0.10 0.0001	0.10 0.07
	REGENERACIÓN Y DEFENSA DE PLAYAS			s ₁	No signif.	0.20	0.20

* PROTECCIÓN DE RELLENOS O MÁRGENES.

¹ En el caso de que en la superficie adosada al dique esté previsto que se ubiquen edificaciones (p.e. estaciones marítimas, lonjas...), depósitos o silos que pudieran resultar afectados en el caso de fallo de la obra de abrigo, se considerará un índice ISA muy alto (s₄) (P_{ELU}=0.0001; P_{ELU}=0.007).

² Se consideran mercancías peligrosas los grupos de sustancias prioritarias incluidas en el anexo X de la Directiva Marco del Agua (Decisión 2455/2001/CE), en el inventario europeo de emisiones contaminantes (EPER, Decisión 2004/479/CE), y en el Reglamento Nacional de Admisión, Manipulación y Almacenamiento de Mercancías Peligrosas (Real Decreto 1451/1989). (Ver ROM 5.1-05).

³ Se entiende como diques de defensa ante grandes inundaciones, aquellos que en caso de fallo podrían producir importantes inundaciones en el territorio.

⁴ El índice ISA se elevará a s₃ cuando la toma de agua o el punto de vertido estén asociados con el abastecimiento de agua para uso urbano o industrial o con la producción energética.

⁵ El índice ISA se elevará a s₄ cuando en caso de fallo pudieran resultar afectadas edificaciones u otras instalaciones industriales.

Imagen 45. Tablas 2.2.33 y 2.2.34. Fuente: ROM 1.0-09.

Se considera que el dique de baja de coronación se trata de una obra de abrigo de un área litoral, con un IRE bajo, por lo que se vida útil es de 15 años, y con un ISA no significativo, por lo que la probabilidad de fallo es de 0,2. Teniendo en cuenta esto, se obtiene que el periodo de retorno de la tormenta de diseño es de aproximadamente 68 años.

Realizando un análisis extremal de la serie histórica usada, se obtiene que la altura de diseño es de aproximadamente 4,4 metros.

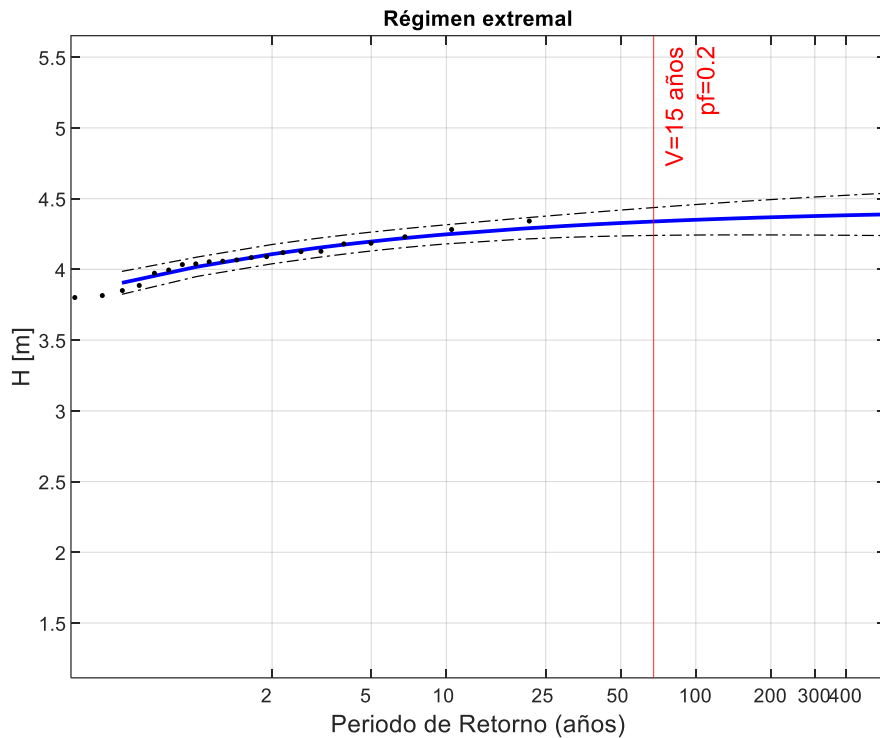


Imagen 46. Régimen extremal de los datos climáticos históricos en el punto de control para el diseño del dique de baja coronación.
Fuente: elaboración propia.

Se dimensiona con un talud de 1V:1,5H y piezas de escollera de densidad igual a 2600 kg/m³, y con un francobordo (F) de 1 metro.

Las piezas del talud exterior se calculan aplicando la siguiente ecuación:

$$N_{s50} = 2,60 - 0,33 \cdot F_d \quad (20)$$

Cuyo valor mínimo para el talud considerado es de 1,94. \$N_{s50}\$ es el número de estabilidad, y se calcula aplicando la ecuación 21; \$F_d\$ es el francobordo adimensional, y se calcula aplicando la ecuación 22:

$$N_{s50} = \frac{H}{\Delta \cdot D_n} \quad (21)$$

$$F_d = \frac{F}{D_n} \quad (22)$$

Donde \$H\$ es la altura de ola de diseño; \$\Delta\$ es la densidad sumergida relativa (cuyo valor es 1,57) y \$D_n\$ es el tamaño de las piezas de escollera. Aplicando las diferentes ecuaciones, se obtiene que la escollera del talud exterior ha de ser de aproximadamente 1,20 metro de lado. Con estas piezas, el número de estabilidad es de 2,33, superior al límite mínimo. Las piezas deben tener un peso de 4,5 toneladas.

Las piezas de la coronación se calculan aplicando la siguiente ecuación:

$$N_{s50} = -1,21 \cdot F_d - 0,28 \text{ para } -4 \leq F_d \leq -2$$

$$N_{s50} = 2,15 \text{ para } -2 < F_d < 2 \quad (23)$$

$$N_{s50} = 1,02 \cdot F_d + 0,115 \text{ para } 2 \leq F_d \leq 4$$

Tras un proceso iterativo, se obtiene que las piezas de la coronación han de ser de 1,3 metros de lado, por lo que deben tener un peso de aproximadamente 5,7 toneladas.

Las piezas del talud interior se calculan aplicando la siguiente ecuación:

$$N_{s50} = -0,48 \cdot F_d + 2,86 \text{ para } -4,5 \leq F_d \leq 2$$

$$N_{s50} = 1,9 \text{ para } 2 < F_d \quad (24)$$

Tras un proceso iterativo, se obtiene que las piezas de la coronación han de ser de 1,1 metros de lado, por lo que deben tener un peso de aproximadamente 3,5 toneladas.

Las piezas del morro se calculan aplicando la siguiente ecuación:

$$N_{s50} = -0,58 \cdot F_d + 1,99 \quad (25)$$

Cuyo valor mínimo para el talud considerado es de 1,69. Se obtiene que las piezas del morro han de ser de 1,6 metros de lado, pero para esas piezas el número de estabilidad es de 1,75, superior al límite mínimo. Las piezas han de tener un peso de aproximadamente 10,6 toneladas.

Teniendo en consideración los rangos de pesos de canteras españolas, el mayor peso que pueden tener las escolleras es de 7 toneladas. Por ello, se recalculan las piezas del morro del dique de baja coronación utilizando cubos de hormigón de densidad 2100 kg/m³. Aplicando la fórmula 25, se obtiene que los cubos han de ser de 2,4 metros de lado (obteniendo un N_{s50} de 1,75, mayor que el valor mínimo), por lo que deben de tener un peso de aproximadamente 29 toneladas.

A modo de resumen, se recogen los resultados de las piezas de escollera del dique de baja de coronación en la siguiente tabla, teniendo en consideración los rangos de pesos de canteras españolas:

SECTOR	Dn [m]	P [t]	MATERIAL
Talud exterior	1,2	4,5	Rocas 4000-7000 kg
Coronación	1,3	5,7	Rocas 4000-7000 kg
Talud interior	1,1	3,5	Rocas 4000-7000 kg
Morro	2,4	29	Cubos hormigón 30T

Tabla 16. Piezas que conforman el dique de baja coronación. Fuente: elaboración propia.

Una vez dimensionado el dique de baja coronación, se calcula el coeficiente de transmisión para conocer cuánto se reduciría el oleaje que llega a pies del dique del puerto de Llanes. Para ello, se aplica la formulación de Briganti para estructuras de escollera estrechas (Briganti, Van der Meer, Buccino, & Calabrese, 2004), es decir, que la relación entre el ancho de coronación del dique (B) y la altura de ola sea menor de 10.

Se considera que B sea igual a 3 piezas, por lo que el ancho de coronación del dique es de 3,9 metros. La ecuación para calcular el coeficiente de transmisión es la siguiente:

$$C_t = -0,4 \cdot \frac{F}{H} + 0,64 \cdot \left(\frac{B}{H}\right)^{-0,31} \cdot (1 - \exp(-0,5 \cdot I_{rp})) \quad (26)$$

I_{rp} es el número de Iribarren calculado a pie de dique.

Se obtiene un coeficiente de transmisión de aproximadamente 0,54, por lo que el oleaje que pasa por el dique de baja coronación en la punta del Guruñu se reduciría aproximadamente un 50%.

Por último, ha de dimensionarse la posición en planta y la longitud que tendría el dique, es decir, dónde se ubicaría el morro del dique que actuaría como polo de difracción, permitiendo que el oleaje incida oblicuamente en el dique del puerto de Llanes y reduciendo aún más el rebase sobre el mismo.

Como los temporales más extremos suelen ocurrir durante el invierno, la dirección predominante del oleaje en el mar Cantábrico durante esta estación es el NW.

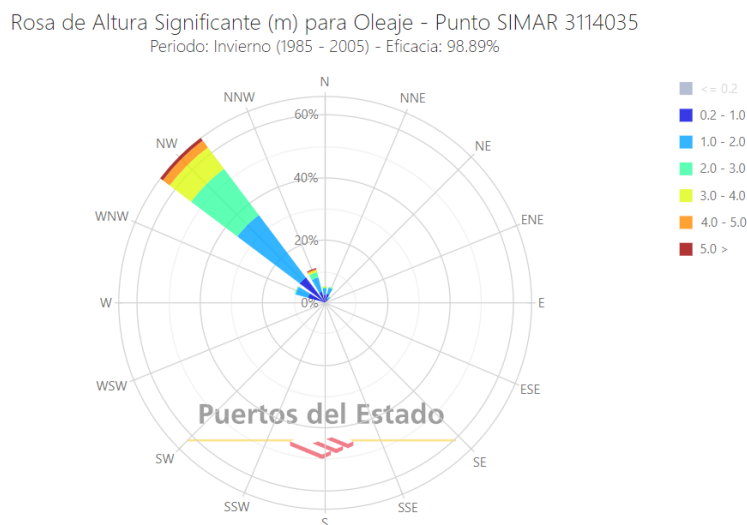


Imagen 47. Rosa del oleaje durante los inviernos de la serie histórica (1985-2005) en el punto SIMAR 3114035, situado frente la costa de Llanes. Fuente: Puertos del Estado.

Por tanto, el morro del dique ha de ubicarse en un punto en el que, para los oleajes que provienen del NW, genere una zona protegida que cubra prácticamente la totalidad del dique del puerto de Llanes. Se estima que, un dique de baja coronación en la Punta del Guruñu de aproximadamente 200 metros, siguiendo una orientación paralela al dique del puerto (Imagen 48), generaría una zona protegida suficientemente grande como para cubrir la totalidad del dique.

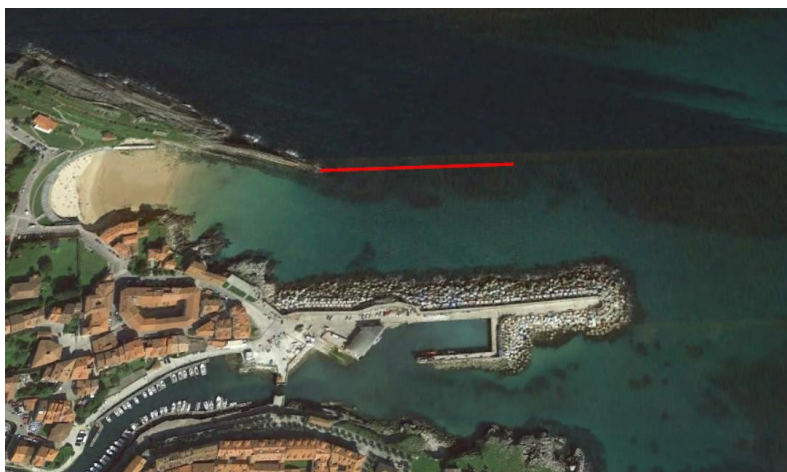


Imagen 48. Ubicación del dique de baja coronación de 200 metros de longitud. Fuente: elaboración propia a través de Google Earth.

A continuación, se muestran dos imágenes en las que se puede ver la sección del dique de baja coronación, y su forma en planta con una vista 3D.

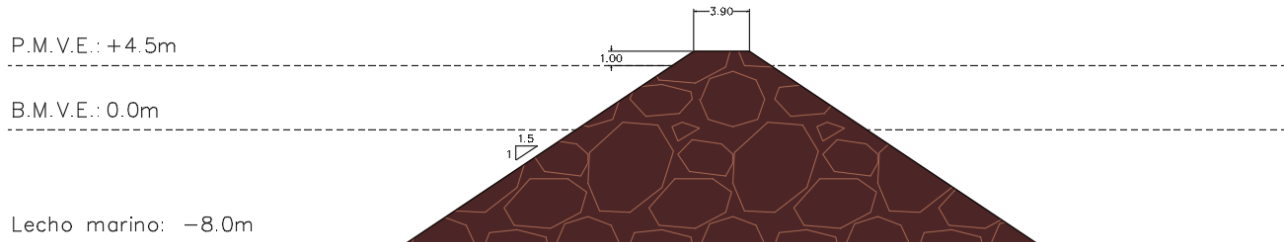


Imagen 49. Sección del dique de baja coronación. Fuente: elaboración propia a través de AutoCAD.

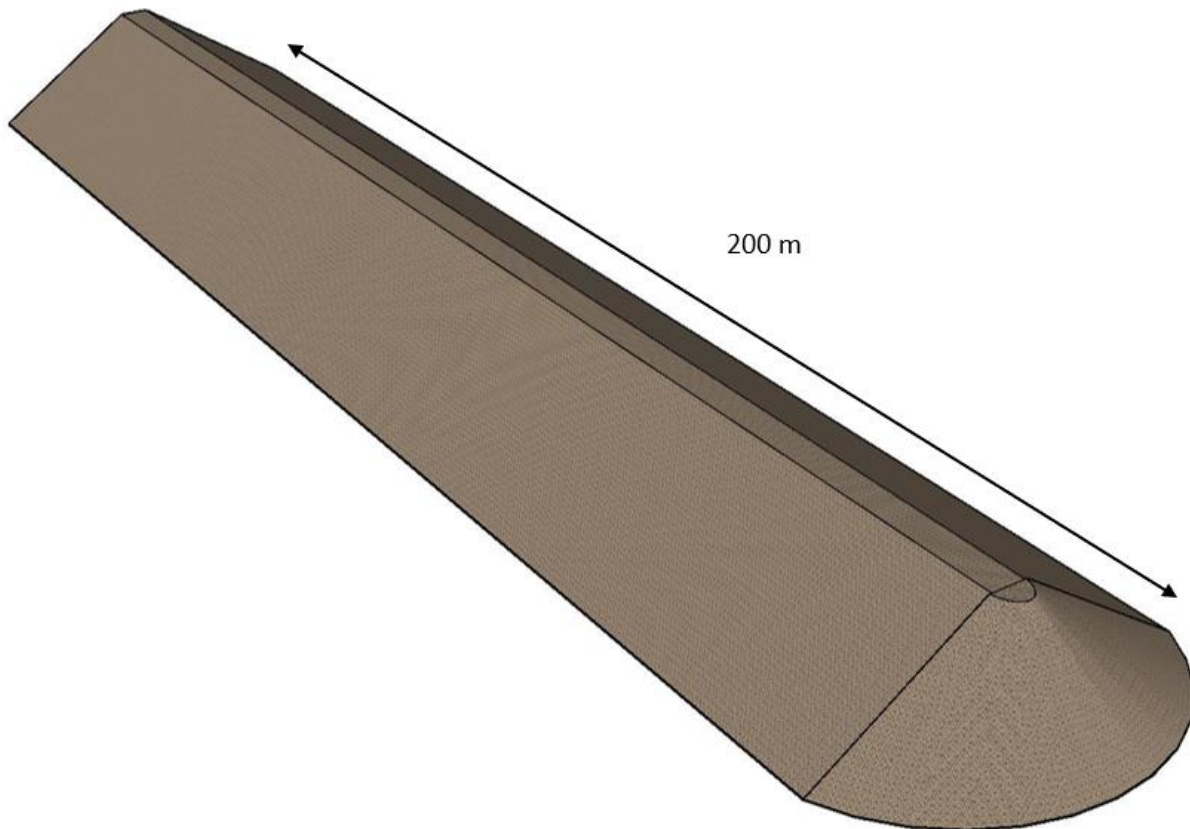


Imagen 50. Forma en planta del dique de baja coronación. Fuente: elaboración propia a través de SketchUp.

10.CONCLUSIONES

Teniendo en consideración únicamente la reducción de la altura de ola del oleaje que rebasa la estructura, ya que determinar la oblicuidad con la que el oleaje pudiera llegar al dique objeto de estudio de este Trabajo (producida por la difracción que se genera en el morro del dique de baja coronación) conllevaría un tiempo del cual no se dispone, se recalculan los caudales de rebase en eventos extremos, es decir, la funcionalidad del dique del puerto de Llanes, razón principal por la cual se diseña esta alternativa.

Como, por falta de tiempo, no se puede ejecutar de nuevo la propagación considerando en planta el dique de baja coronación, se calcula el caudal de rebase del puerto de Llanes teniendo en cuenta la reducción que se produce al pasar el oleaje sobre el dique de baja coronación. Aplicando una reducción del 50% al oleaje (valor aproximado que se obtiene en el coeficiente de transmisión), el valor obtenido para la serie histórica en el dique del puerto de Llanes es de 0,12 l/s/m. Se considera que este oleaje es el que se produce en la Zona II, ya que tendría una afección directa del dique de baja coronación.

Cabe destacar que el caudal obtenido para la misma serie temporal en la situación actual, es decir, sin el dique de baja coronación, es de 1,92 l/s/m (Tabla 7), por lo que se reduciría el caudal aproximadamente un 94%.

A continuación, se muestran una gráfica donde se relaciona el nuevo valor del caudal de rebase sobre el dique del puerto de Llanes con la curva de daño para evaluar la vulnerabilidad la zona estudiada.

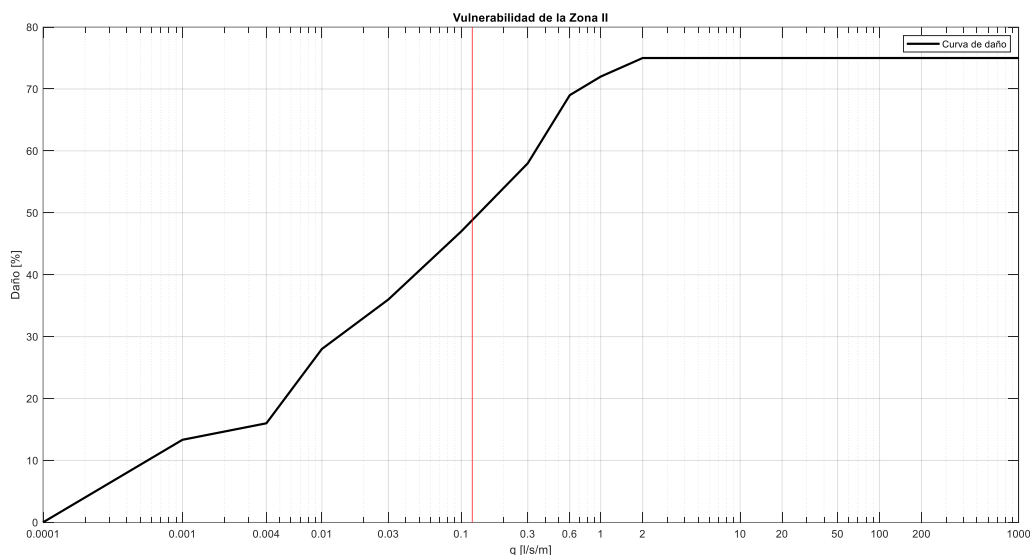


Imagen 51. Vulnerabilidad de la Zona III teniendo en cuenta el dique de baja coronación. Fuente: elaboración propia.

Comparando la Imagen 51 con la Imagen 37, el daño generado pasa de un 75% a menos de un 50%, por lo que el daño que se genera se reduce un 25% aproximadamente.

En resumen, en este Trabajo se ha realizado un análisis de la peligrosidad (propagación del oleaje), un análisis de vulnerabilidad hólístico del puerto (funcionalidad, operatividad y fiabilidad), un análisis del impacto por cambio climático, así como un estudio de las alternativas para adaptar al puerto al cambio climático, con un análisis multicriterio para seleccionar la mejor alternativa.

Para poder determinar el efecto real de la alternativa seleccionada, sería necesario analizar la difracción que produciría el dique de baja coronación, para poder calcular la oblicuidad con la que el oleaje llegaría al dique del puerto de Llanes, factor esencial en rebase de estructuras. También, para completar el análisis multicriterio, se podrían tomar como criterios los factores económicos y ambientales, así como el efecto que el cambio climático produciría sobre la propia alternativa seleccionada.

BIBLIOGRAFÍA

- Booij, N., Ris, R. C., & Holthuijsen, L. H. (n.d.). *A third generation wave model for coastal regions, 1, Model description and validation*.
- Briganti, R., Van der Meer, J., Buccino, M., & Calabrese, M. (2004). *Wave transmission behind low-crested structures*.
- Camus, P. e. (2011). *Analysis of Clustering and Selection Algorithm*.
- EurOtop. (2018). *Manual on wave overtopping of sea defences and related structures*.
- Franco, L. (1994). *Wave Overtopping on Vertical and Composite Breakwaters*.
- Gobierno del Principado de Asturias. (n.d.). *Inventario del Puerto de Llanes*.
- IPCC. (2014). *Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*.
- Lemos, G., Semedo, A., & Dobrynin, M. (2019). *Midtwenty-first century global wave climate projections: Results from a dynamic CMIP5 based ensemble*. Global and Planetary Change.
- Lucio, D., Tomás, A., & Losada, I. (2020). *Elaboración de la metodología y base de datos para la proyección de impactos de cambio climático a lo largo de la costa española*.
- Martín, F. V. (1995). *“Un método para el cálculo de las acciones del oleaje sobre los espaldones de los diques rompeolas*.
- Puertos del Estado. (2007). *Recomendaciones para Obras Marítimas (ROM)*.
- Rojelj, J., Meinshausen, M., & Knutti, K. (2012). Global warming under old an new scenarios using IPCC climate sensivity range estimates. *Nature Climate Change*, 248-253.
- Stenek, V. (2011). *Climate risk and business: ports - terminal marítimo Muelles el Bosque Cartagena, Colombia*. World Bank Group.
- The Rock Manual. (n.d.). *Chapter 5: Physical process and design tools*.
- US Army Corps of Engineers. (2002). *Coastal Engineering Manual*.
- Vidal, C., Losada, M., & Mansard, E. (1995). *Stability of low-crested rubble-mound breakwater heads*.