



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE TRANSPORTES, MOVILIDAD
Y AGENDA URBANA

Puertos del Estado



Ports de Balears

Autoritat Portuària de Balears

PLAN DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO PARA LOS PUERTOS DE LA AUTORIDAD PORTUARIA DE BALEARES

ESCENARIOS Y METODOLOGÍA

JP Sierra, X. Gironella, V. Gracia...**A Sanchez-Arcilla**
(agustin.arcilla@upc.edu)

2 de Noviembre 2022



Laboratori d'Enginyeria Marítima
UPC - BARCELONATECH

1. Introducción
2. Escenarios considerados
3. Datos utilizados
4. Procesos analizados
5. Metodología
6. Futuro

El cambio climático afecta a costas y puertos debido a:

- Subida del nivel medio del mar
- Cambios en las alturas y direcciones del oleaje (atm + h)
- Cambios en las mareas meteorológicas (atm + h)



1. INTRODUCCIÓN. Objetivos del estudio

Objetivos generales:

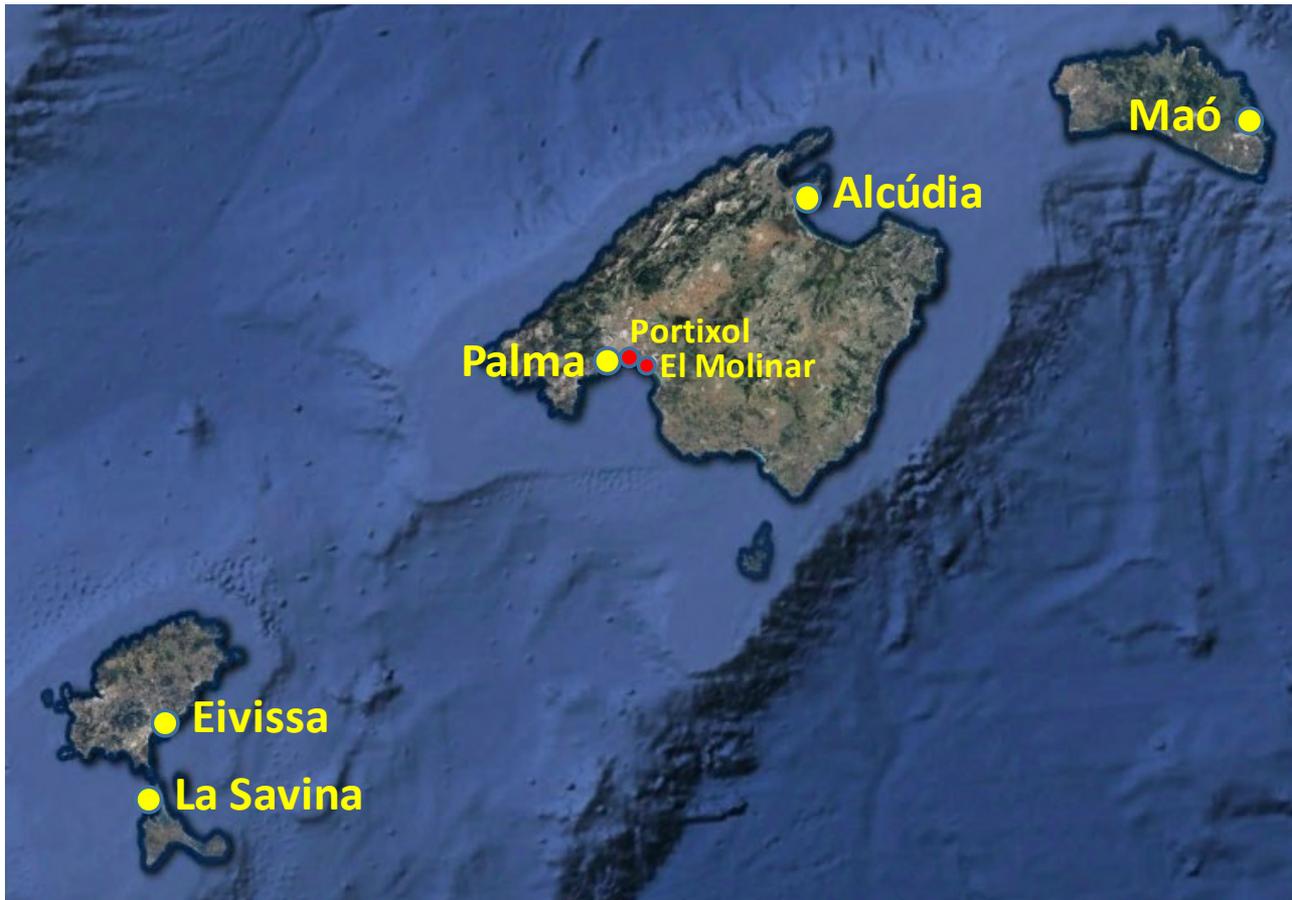
- Evaluación a medio-largo término de los **factores de riesgo asociados al CC** que podrían afectar a los puertos de la APB.
- Proponer **medidas y rutas de adaptación** para eludir los riesgos (resistente + funcional + ambiental).



1. INTRODUCCIÓN. Instalaciones a analizar

5 puertos de **interés general**

2 puertos **deportivos** (adscritos a Palma)

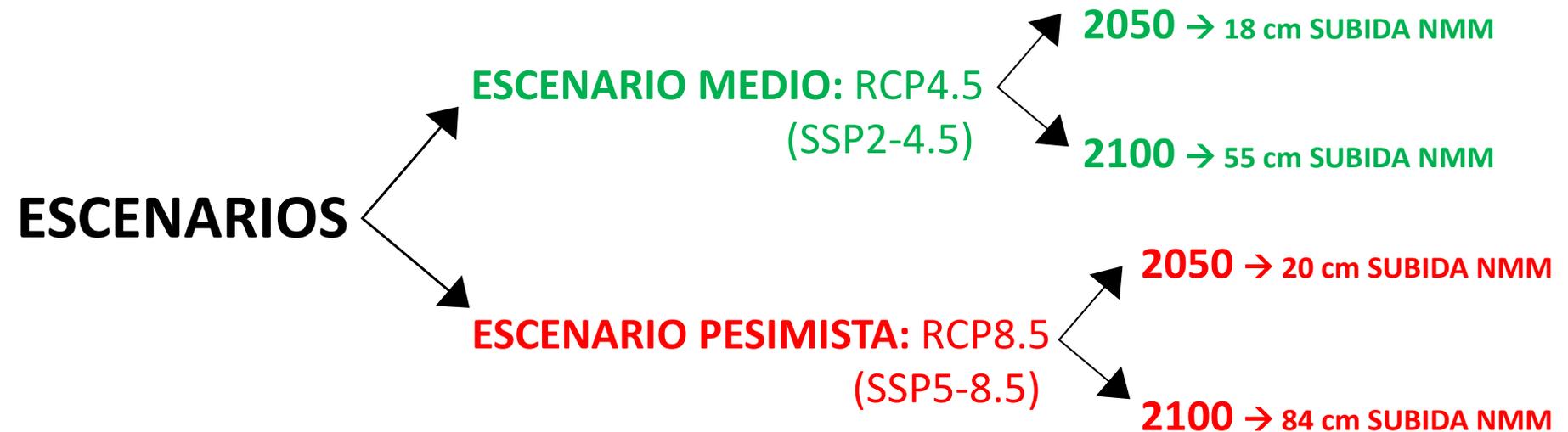


2. ESCENARIOS CONSIDERADOS

2 ESCENARIOS (intermedio y pesimista)

2 HORIZONTES TEMPORALES (2050 y 2100)

Escenario	Horizonte	Oleaje	SLR	MM
Presente	2005	1986-2005	1986-2005	1986-2005
RCP4.5	2050	2026-2045	2030-2050	2026-2045
RCP4.5	2100	2081-2100	2100	2081-2100
RCP8.5	2050	2026-2045	2030-2050	2026-2045
RCP8.5	2100	2081-2100	2100	2081-2100

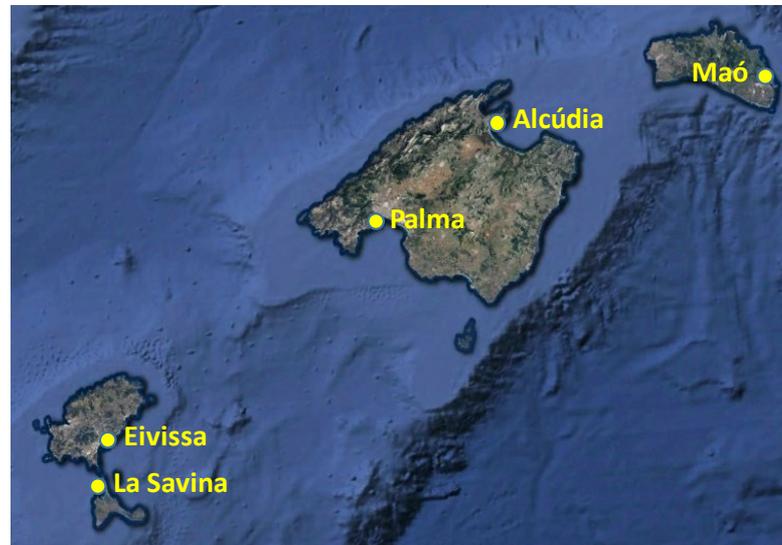


Subida del nivel medio del mar:

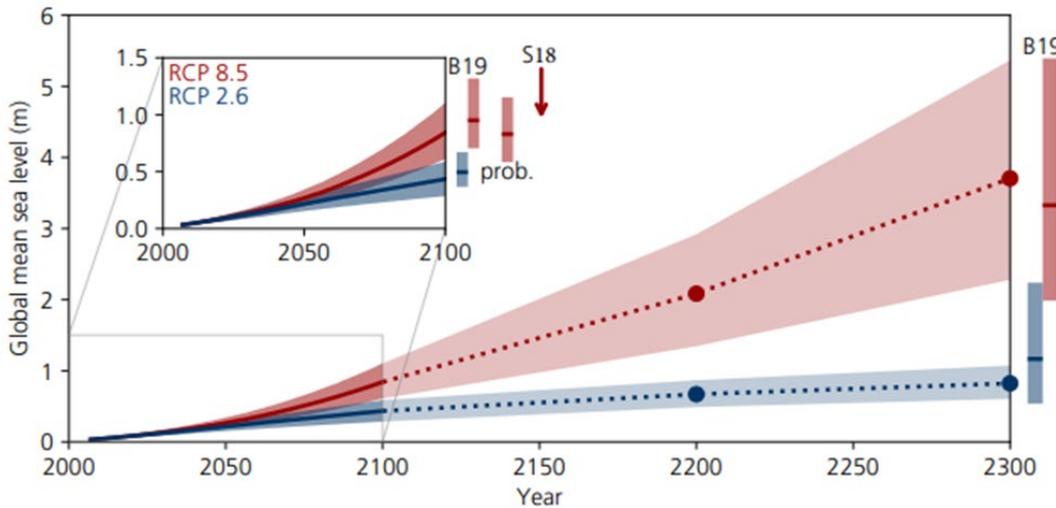
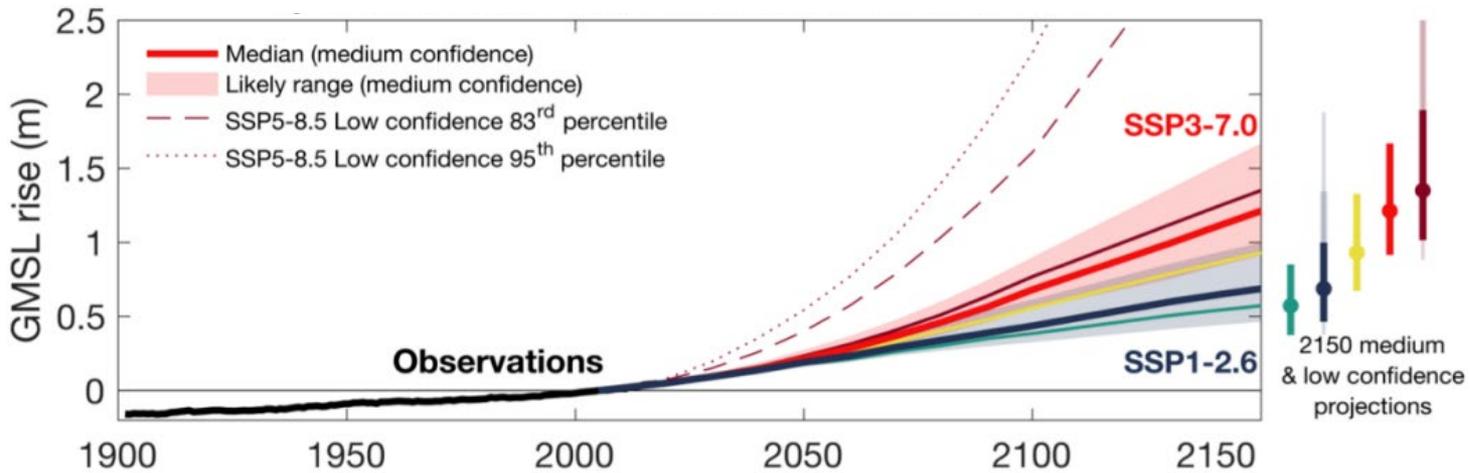
- Datos extraídos del *Special Report on the Ocean and the Cryosphere in a Changing Climate*, SROOC (IPCC, 2019)

Marea astronómica y marea meteorológica:

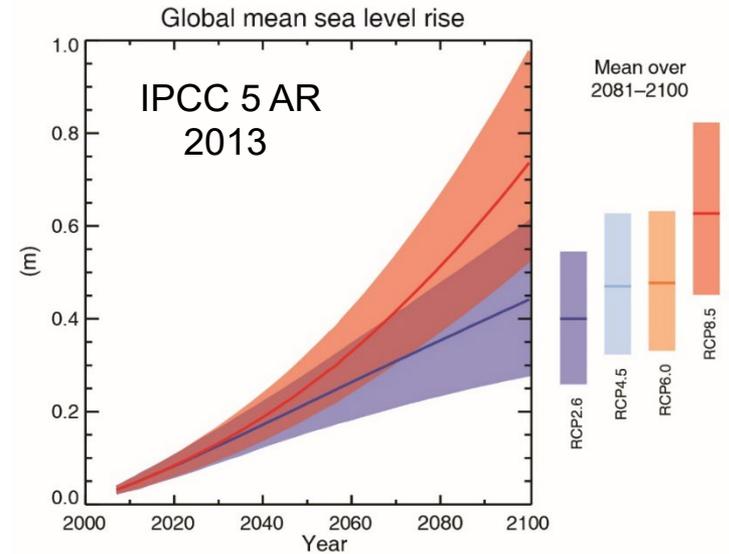
- Datos de la red de mareógrafos de Puertos del Estado.
- Ventana operativa (ROMs): niveles del percentil 99.9



2. ESCENARIOS CONSIDERADOS



With Antarctic component for 2° - 5° C warming (IPCC, 2019)



Variaciones de la marea meteorológica:

- Datos del IHC

Datos de oleaje:

- Datos del IHC



4. PROCESOS ANALIZADOS



Valoración de riesgos:

RIESGOS ANALIZADOS:

1. Operatividad muelles y pantalanes
2. Rebase de diques portuarios
3. Estabilidad de diques portuarios
4. Agitación portuaria
5. Aterramiento

Valoración de riesgos:

- Para cada uno de los procesos, en cada puerto y para cada escenario y horizonte, se establece un nivel de riesgo (según corresponda desde el punto de vista resistente, funcional o ambiental)

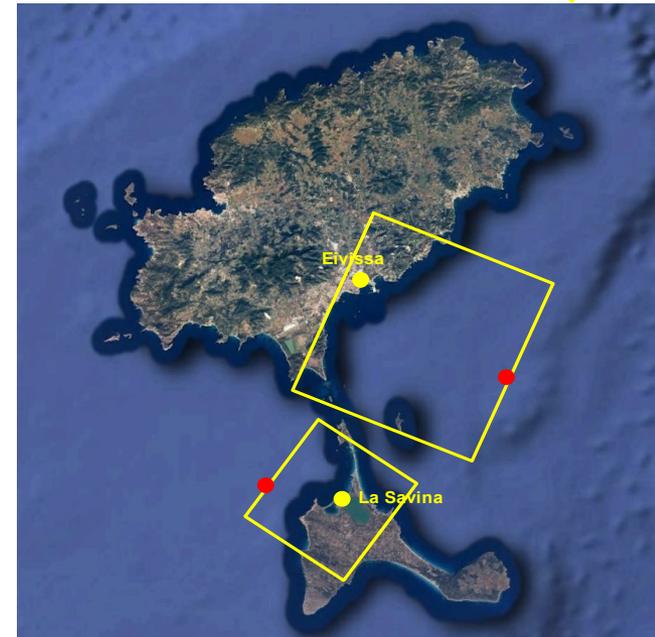
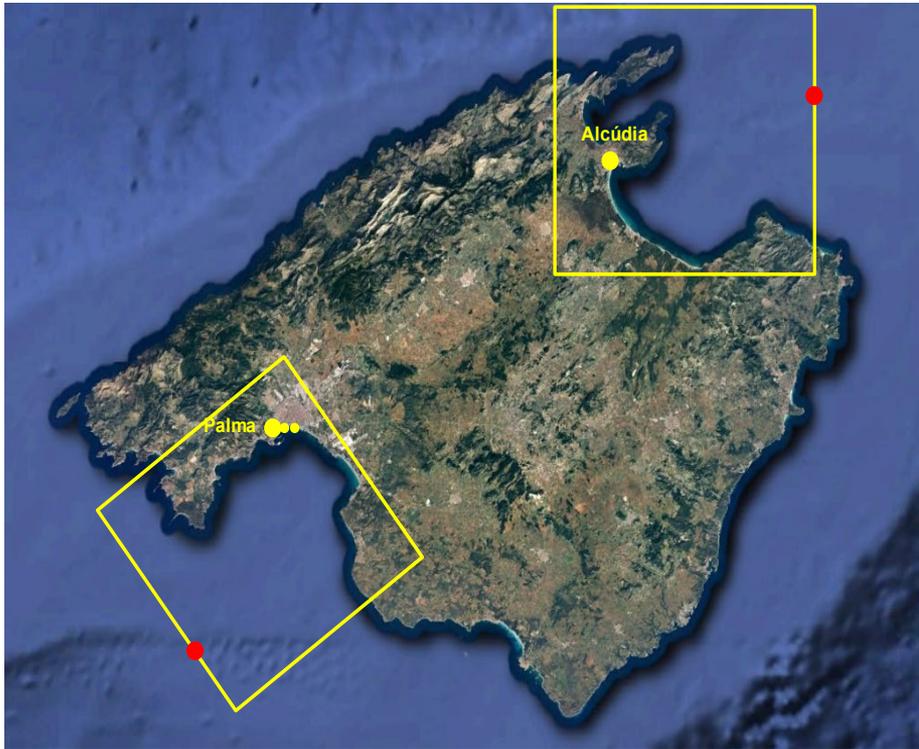
6 NIVELES DE RIESGO

CÓDIGO	NIVEL DE RIESGO
0	Sin riesgo
1	Muy bajo
2	Bajo
3	Medio
4	Alto
5	Muy alto

Análisis del oleaje:

- Para cada puerto, selección del punto de referencia (**estación de control**) en alta mar
- Recopilación de datos (base **futuras observaciones**, PE)
- Estudio del **clima medio** → obtención de tablas de encuentros por direcciones y rangos de altura de ola (condiciones de **operación**)
- Estudio del clima **extremal direccional** → obtención de las características del oleaje para distintos periodos de retorno (condiciones de **supervivencia** en función del proceso analizado)
- **Propagación** de los datos de oleaje desde alta mar hasta los **puertos** mediante el modelo numérico (SWAN+Bouss)

Puntos de control seleccionados (en rojo) y mallas numéricas. Anidamiento oleaje

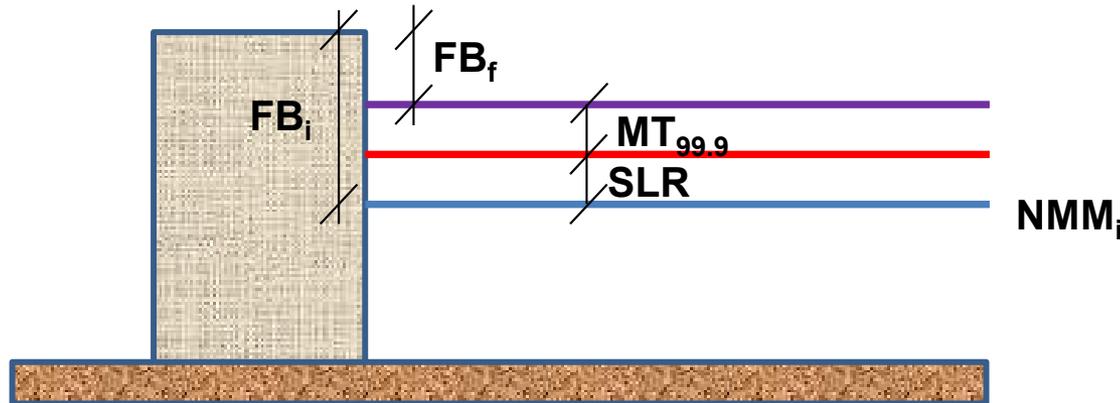


Inoperatividad de muelles y pantalanes (funcional):

- Para cada puerto, escenario y horizonte temporal, **proyección del futuro NMM**.

$$NMM_f = NMM_i + SLR + MT_{99.9} \text{ (actual)} + \Delta MM_{99.9} \text{ (futuro)}$$

- Obtención del **nuevo francobordo** para las estructuras portuarias (atraque, abrigo)



Si $FB_f < FB_u \rightarrow$ Atraque inoperativo

Si $FB_f < 0 \rightarrow$ Atraque inundado

Inoperatividad de muelles y pantalanes (funcional):

- Comparación con el **francobordo umbral mínimo (ROMs)** para que la estructura sea operativa:
 - Embarcaciones deportivas: 0.15 m
 - Embarcaciones de pesca: 0.5 m
 - Buques comerciales: 1.5 m
- Distinción entre estructuras *inoperativas* (FB menor que el valor umbral) e *inundables* (FB negativo)
- En función del % total de estructuras inoperativas asignación de un nivel de riesgo



Inoperatividad de muelles y pantalanes (funcional):

CÓDIGO	NIVEL DE RIESGO	% ATRAQUES INOPERATIVOS
0	Sin riesgo	0%
1	Muy bajo	>0% y ≤20%
2	Bajo	>20% y ≤40%
3	Medio	>40% y ≤60%
4	Alto	>60% y ≤80%
5	Muy alto	>80%

Estabilidad de diques portuarios (resistente):

- Selección del **periodo de retorno** del oleaje en función de las características del **dique**:
 - Puertos de interés general, diques en **talud**: 200 años
 - Puertos de interés general, diques **verticales**: 500 años
 - Puertos **deportivos** (diques en talud): 40 años



Estabilidad de diques portuarios (resistente):

- Cálculo de la estabilidad del dique:
 - Diques en talud (Hudson): $FS = \text{peso calculado} / \text{peso actual}$
 - Diques verticales: $FS = \text{factor de estabilidad (al vuelco o al deslizamiento)} / \text{factor de seguridad (1.4)}$



Estabilidad de diques portuarios (resistente):

- En función del valor de FS se determina el nivel de riesgo

CÓDIGO	NIVEL DE RIESGO	VALOR FS
0	Sin riesgo	≤ 0.75
1	Muy bajo	>0.75 y ≤ 1
2	Bajo	>1 y ≤ 1.1
3	Medio	>1.1 y ≤ 1.2
4	Alto	>1.2 y ≤ 1.3
5	Muy alto	>1.3

Rebase de diques portuarios (funcional):

- Selección de **3 periodos de retorno** del oleaje en función del tipo de **tormenta**:
 - Tormenta frecuente: 1 año
 - Tormenta fuerte: 5 años
 - Tormenta extraordinaria: 25 años
- Se calcula el **caudal de rebase** (q) con formulaciones empíricas (Manual EurOtop, 2018)



Rebase de diques portuarios (funcional):

- En función del valor de q se determina el nivel de riesgo

CÓDIGO	NIVEL DE RIESGO	VALOR q (l/s/m)
0	Sin riesgo	≤ 0.3
1	Muy bajo	>0.3 y ≤ 1
2	Bajo	>1 y ≤ 5
3	Medio	>5 y ≤ 10
4	Alto	>10 y ≤ 20
5	Muy alto	>20

Agitación portuaria (funcional):

- Se utiliza un **modelo numérico** tipo Boussinesq anidado
- Como datos de entrada se utilizan los datos de oleaje (del clima medio) **propagados** mediante el modelo SWAN
- Se tienen en cuenta las **variaciones de profundidad** producidas por el SLR (calentamiento global + MM)
- En cada **zona de atraque** se obtienen los valores de **Hs** para cada oleaje en cada **escenario y horizonte**.



Agitación portuaria (funcional):

- Se comparan los valores de Hs con los **valores umbral de operatividad** (ROMs) que dependen del tipo de buque que usa el atraque.
- Si se **excede** el valor umbral, se multiplica la **frecuencia de presentación** del oleaje por el nº de horas del año
- Sumando todas las horas del año en las que se excede el valor umbral, se obtienen las **horas de inoperatividad** al año debido a un exceso de **agitación**



Agitación portuaria (funcional):

- En función del nº de horas de inoperatividad se establece el nivel de riesgo

CÓDIGO	NIVEL DE RIESGO	INOPERATIVIDAD (h/año)
0	Sin riesgo	≤ 200
1	Muy bajo	>200 y ≤ 240
2	Bajo	>240 y ≤ 280
3	Medio	>280 y ≤ 320
4	Alto	>320 y ≤ 360
5	Muy alto	>360

Aterramiento (ambiental):

- Se estudian los antecedentes del puerto
- Se analizan las potenciales **fuentes de sedimento** (playas cercanas, torrentes...). En el futuro: considerar alimentaciones



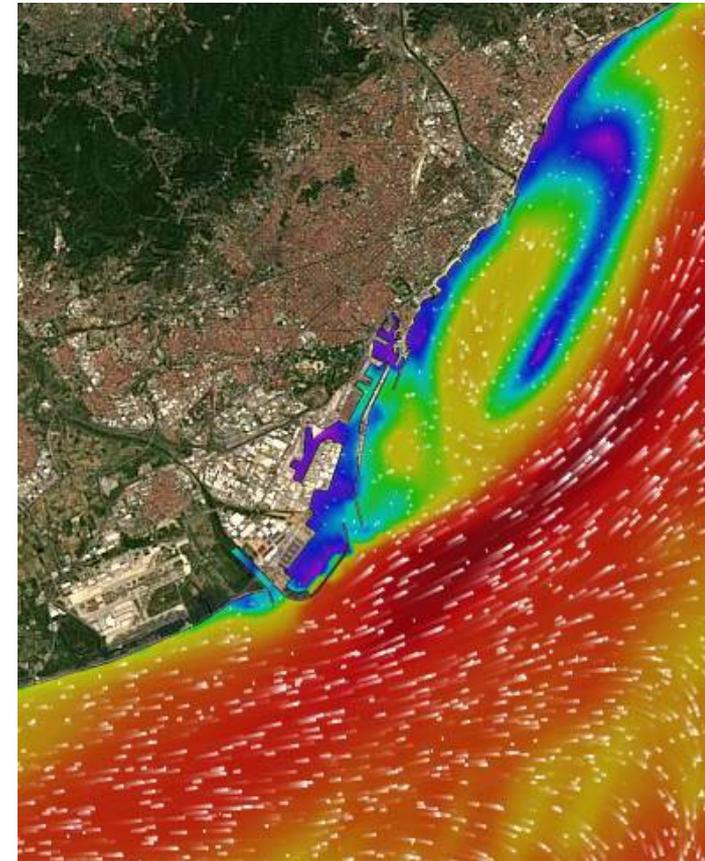
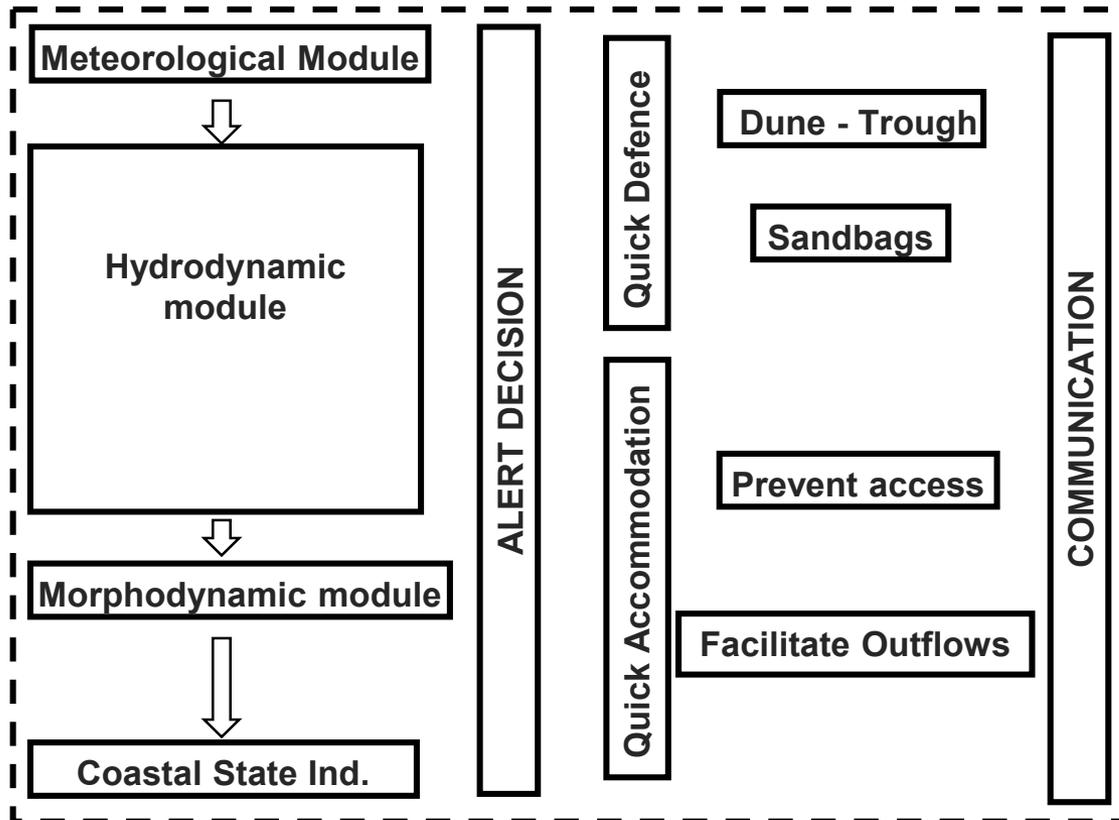
Aterramiento (ambiental):

- Se calcula, para cada escenario y horizonte, la **profundidad de cierre** de la zona costera activa
- Se calcula, para cada escenario y horizonte, el **flujo de energía** (magnitud y dirección) del oleaje incidente
- En función de lo anterior, se estima si el *flujo de sedimentos* hacia el puerto aumentará o disminuirá y se evalúa si el *riesgo de aterramiento* aumenta o disminuye
- SLR aumenta el calado y disminuye este riesgo en general



EWS for storm (days) and climatic alarms (years)

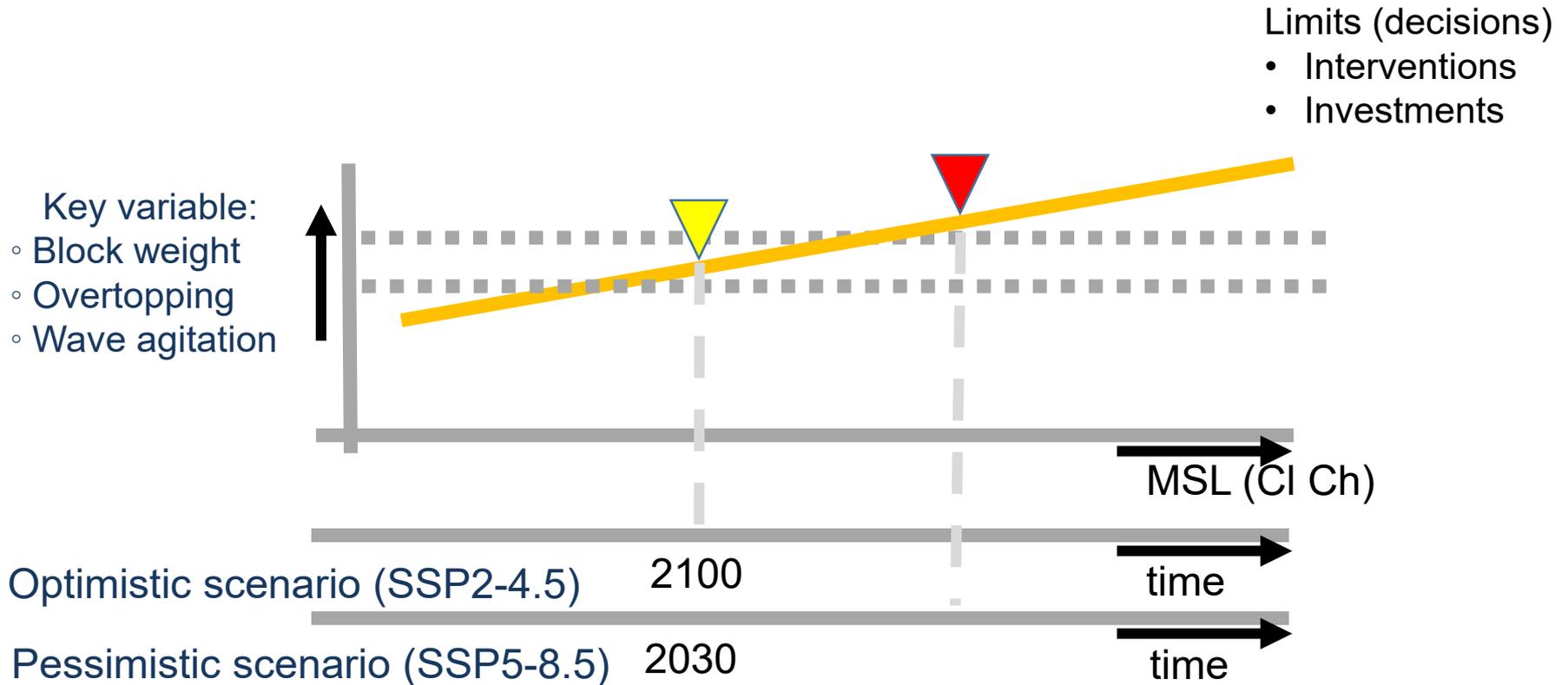
Predictive Maintenance



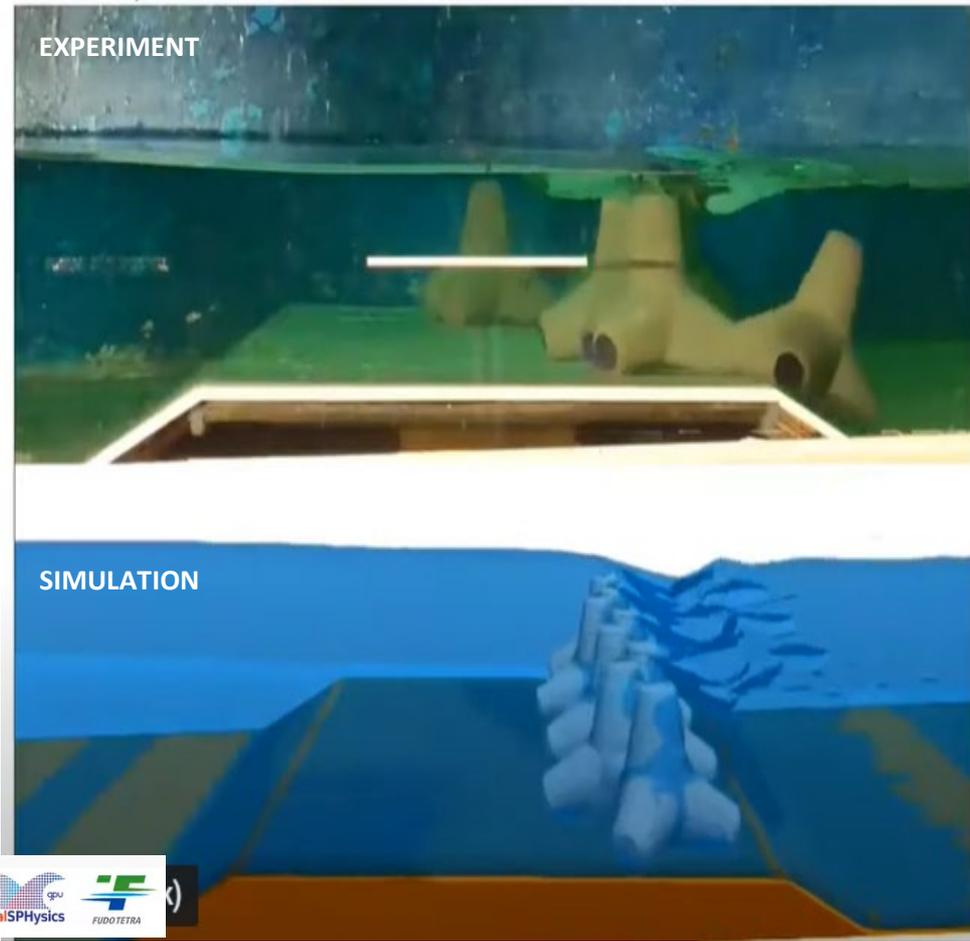
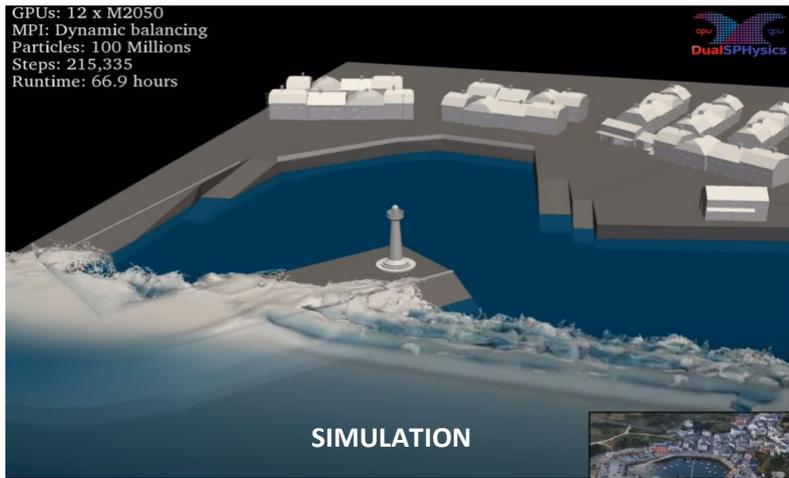
EWS developed and tested: **Ports operational > 10 years** (Puertos del Estado, Programa Clima Marítimo) and beaches tested 2017

Climate warnings and climatic alarms (decades)

Predictive Maintenance



- **Medios técnicos** disponibles para proyectar/planificar la adaptación
- Proyectos **específicos** para cada **puerto, escenario y horizonte**
- Reducción **riesgo** con **sistemas de alerta** hoy disponibles (mods + obs + criterios)
- Reducción **costes** con **Mantenimiento Predictivo**: inspecciones y **adaptación** secuenciadas/optimizadas





GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE TRANSPORTES, MOVILIDAD
Y AGENDA URBANA

Puertos del Estado



Ports de Balears

Autoritat Portuària de Balears

PLAN DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO PARA LOS PUERTOS DE LA AUTORIDAD PORTUARIA DE BALEARES

ESCENARIOS Y METODOLOGÍA

JP Sierra, X. Gironella, V. Gracia...**A Sanchez-Arcilla**
(agustin.arcilla@upc.edu)

2 de Noviembre 2022



Laboratori d'Enginyeria Marítima
UPC - BARCELONATECH