

# NAP Costas

Impacto del cambio climático en las inundaciones costeras y erosión debido a tormentas. El caso de estudio de la playa Charrúa de la ciudad de Juan Lacaze



Ministerio  
de Ambiente



Con el apoyo de:



**Impacto del cambio climático en las inundaciones costeras y  
erosión debido a tormentas. El caso de estudio de la playa  
Charrúa de la ciudad de Juan Lacaze.**

<u>Documento:</u>	CC_Juan_Lacaze.v0.1	
<u>Versión</u>	0.1	
<u>Fecha:</u>	31/05/2019	
<u>Autores:</u>	Sebastián Solari	IMFIA-FING-UdelaR
	Rodrigo Alonso	IMFIA-FING-UdelaR
	Mónica Fossati	IMFIA-FING-UdelaR

## TABLA DE CONTENIDO

Introducción .....	3
Análisis de extremos .....	3
Escenarios de cambio climático a considerar .....	7
Construcción de las tormentas a simular.....	8
Construcción del perfil de playa.....	10
Modelo Morfodinámico .....	11
Resultados.....	12
Síntesis de Resultados.....	18
Referencias.....	19

## **Introducción**

Este documento presenta un análisis del agravamiento debido al cambio climático de las consecuencias en términos de erosión e inundaciones costeras. En particular se aborda el caso de la playa Charrúa de la ciudad de Juan Lacaze.

Para ello se partió de datos de oleaje y nivel en las proximidades de Juan Lacaze. A partir de un análisis estadístico de extremos de los mismos, se obtuvo una caracterización de las tormentas en la zona correspondiente al escenario climático actual. Estas tormentas se modificaron en base a lo establecido en los informes de IH Cantabria (2019) a los efectos de hacerlas representativas de distintos escenarios de cambio climático.

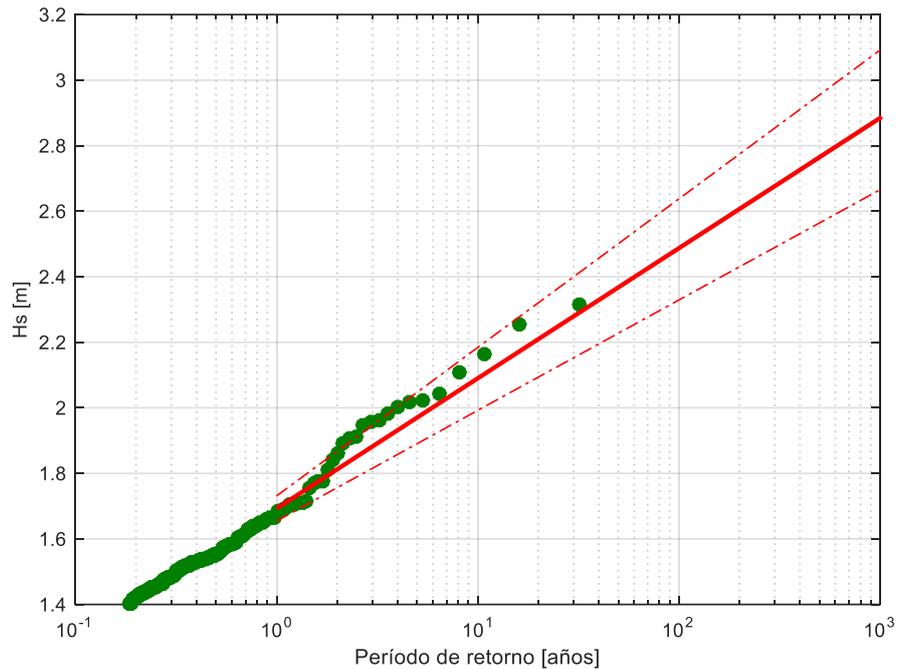
Para evaluar las consecuencias sobre un perfil de playa característico de la zona de estudio, se utilizó el modelo numérico morfodinámico XBeach (Roelvink, 2009). El perfil de playa implementado en el modelo se determinó a partir del modelo digital del terreno disponible y se extendió hacia el mar en base a un perfil subacuático teórico compatible con el sedimento de la zona de estudio. Este perfil fue adaptado para los aumentos de nivel medio del mar correspondientes a los distintos escenarios de cambio climático considerados.

Con el modelo implementado se realizaron 12 simulaciones del impacto de una tormenta sobre el perfil de playa. Estas simulaciones corresponden a la combinación de tres períodos de retorno: 10, 100 y 500 años y 4 escenarios climáticos: actual, cambio leve, cambio medio y cambio severo. Los resultados obtenidos son un aporte cuantitativo para comprender el aumento del riesgo debido al cambio climático de erosión e inundaciones costeras asociadas a tormentas en el sitio de estudio.

## **Análisis de extremos**

Se utilizan los datos de oleaje y nivel del mar correspondientes al nodo de coordenadas 57.39W – 34.49S de la simulación numérica retrospectiva descrita en el entregable E.1.1 del Proyecto URU/18/002 'Integración del enfoque de adaptación en ciudades, infraestructura y ordenamiento territorial en Uruguay'.

Se sigue la metodología Pico Sobre el Umbral o POT por sus siglas en inglés (Coles, 2001). Específicamente se ajustó una función de distribución de probabilidad del tipo Pareto Generalizada (GPD) a los picos de altura de ola significativa ( $H_s$ ) sobre un umbral que define los extremos a caracterizar. El valor umbral con el que se obtuvo el mejor ajuste fue  $H_s = 1.4$  m. El ajuste se presenta en la Figura 1. El promedio de eventos por año que resulta a partir de dicho umbral es de 5.4 eventos por año.



**Figura 1 – Análisis de extremos de Hs. Ajuste de una GPD para picos definidos por el umbral Hs=1.4m**

Para cada dato de Hs utilizado en el análisis de extremos se identifican los datos concomitantes de nivel de mar (SL), período (Tm) y dirección del oleaje. Se establece una relación funcional entre Hs y SL, así como para Hs y Tm, válida para extremos (i.e. Hs >1.4m) a partir de regresión lineal. Estos análisis se presentan en la Figura 2 y en la Figura 3.

En lo que respecta a la dirección, se aprecia en el diagrama de dispersión de la Figura 4 que la dirección correspondiente a los eventos extremos se concentra entorno a 150°. Mientras que en el caso de las duraciones de tormenta, definidas como el tiempo en que Hs está por encima de 1m, se ve que la duración media de las diez mayores tormentas en términos de Hs es 48 horas (Figura 5).

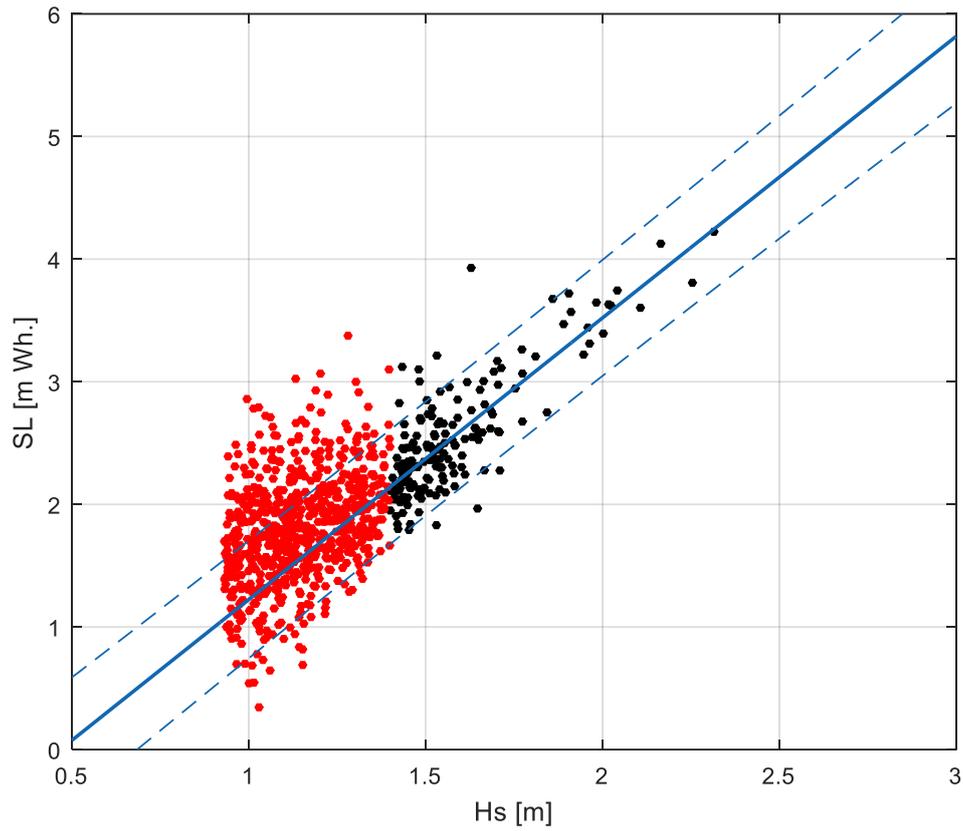


Figura 2 – Regresión lineal entre  $H_s$  pico de la tormenta y nivel de mar concomitante. La regresión se estima únicamente con los puntos negros, los puntos rojos no se tienen en cuenta.

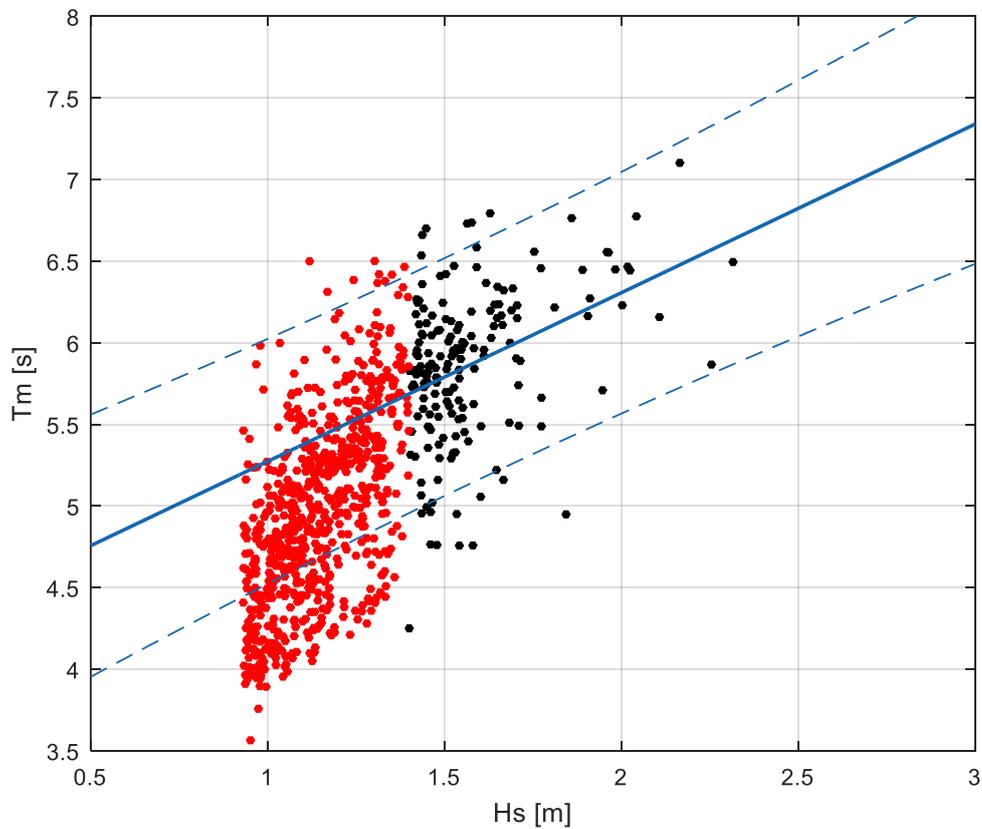
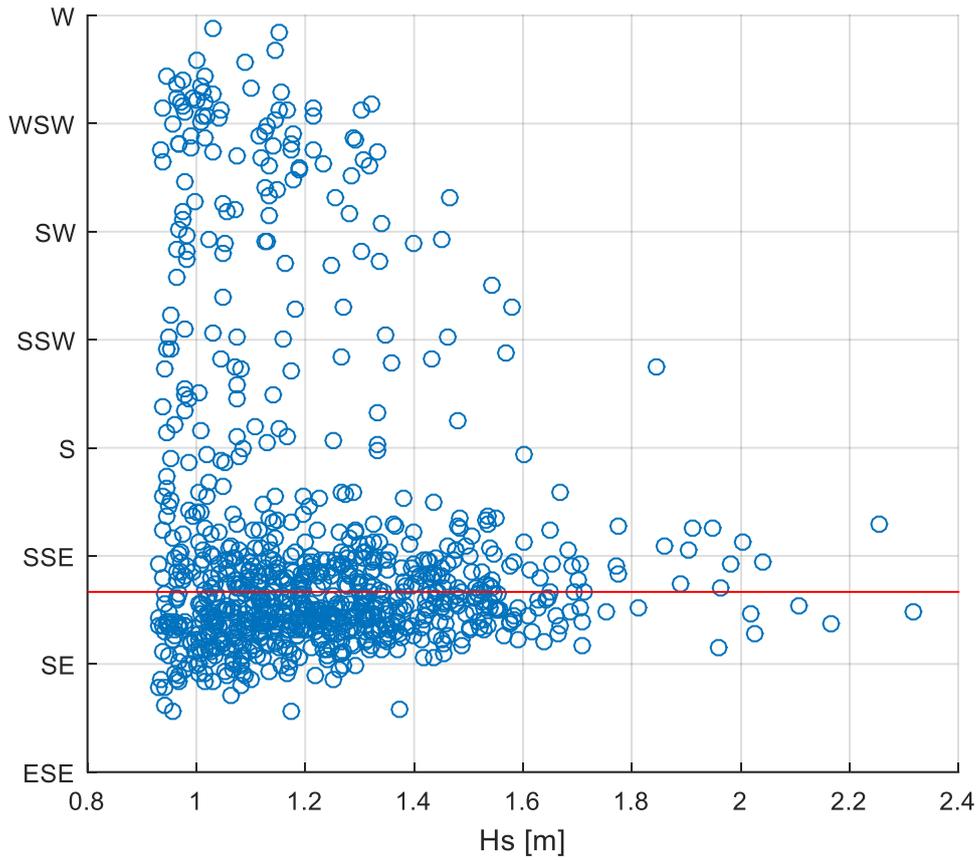
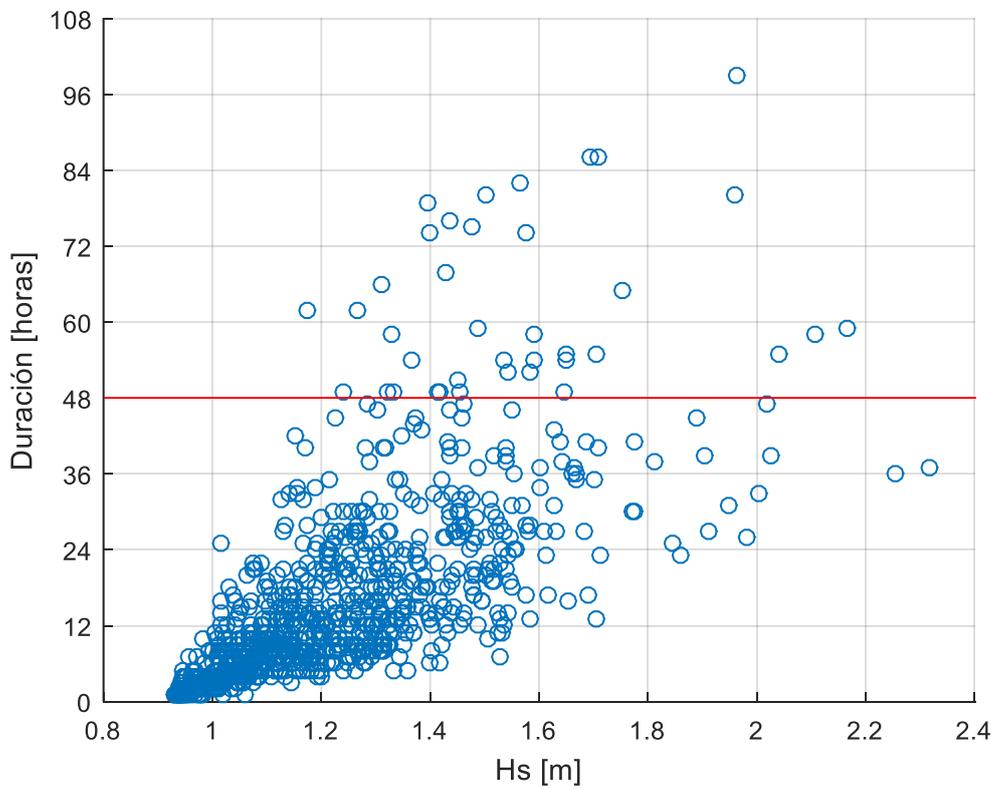


Figura 3 – Regresión lineal entre  $H_s$  pico de la tormenta y período medio concomitante. La regresión se estima únicamente con los puntos negros, los puntos rojos no se tienen en cuenta.



**Figura 4 – Gráfico de dispersión de  $H_s$  pico de la tormenta y dirección media concomitante. En rojo se señala la dirección 150°.**



**Figura 5 – Gráfico de dispersión de  $H_s$  pico y duración de la tormenta. En rojo se señala la duración de 48 horas, correspondiente a la media de las diez tormentas de mayor  $H_s$ .**

Finalmente se obtiene una distribución conjunta de Hs-SL mediante simulación. A partir de la distribución de extremos de Hs (Figura 1), y teniendo en cuenta su incertidumbre, se simulan 10.000 años de tormentas, cada una caracterizada por Hs pico; luego, para cada Hs pico se simula el SL concomitante a partir de la regresión lineal (Figura 2), también teniendo en cuenta la incertidumbre correspondiente. La distribución conjunta de extremos obtenida de esta manera se presenta en la Figura 6. En base a esta y dado un período de retorno, se elige la combinación Hs-SL más exigente en lo que refiere a erosión de un perfil de playa. Las combinaciones correspondientes a los períodos de retorno considerados en este estudio se presentan en la Tabla 1.

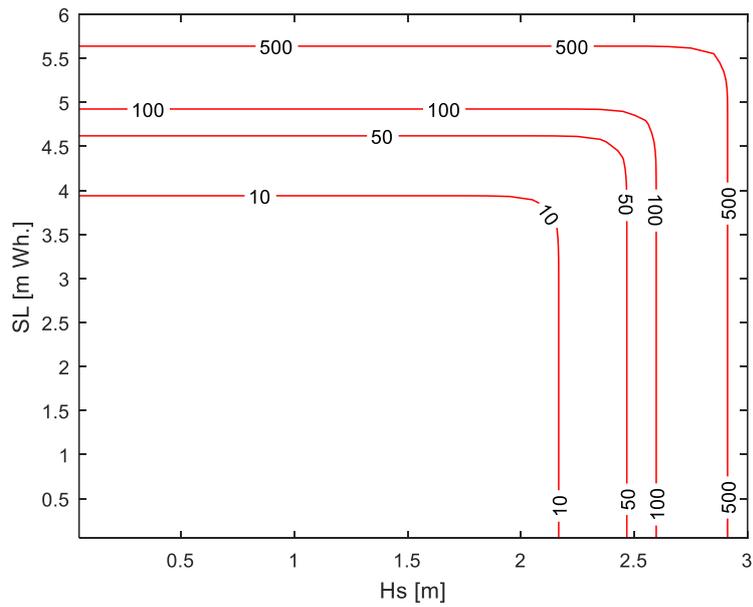


Figura 6 – Distribución conjunta Hs pico de tormenta y nivel de mar simulataneo, obtenido mediante simulación.

Tabla 1.-Combinaciones de Hs y SL obtenidas del análisis de extremo bivariado

Tr (años)	Hs (m)	SL (mWh)
10	2.1	+3.8
100	2.5	+4.8
500	2.9	+5.5

### Escenarios de cambio climático a considerar

En lo que refiere al aumento del nivel medio del mar (NMM), el informe IH-Cantabria (2019) establece los valores medios y rangos esperables en la costa uruguaya en el horizonte 2081-2100 que se presentan en la Tabla 2.

**Tabla 2.-Valores medios y rango, a partir de las bandas de confianza del 90%, de incremento del NMM (en cm) estimado a fin del siglo XXI a partir del ensemble de 21 modelos del CMIP5 para dos escenarios climáticos. Los incrementos se han estimado mediante comparativa del período 2081 – 2100 con respecto a 1986 – 2005. Extraído de IH Cantabria (2019).**

RCP 4.5		RCP 8.5	
Media	[Percentiles 5% - 95%]	Media	[Percentiles 5% - 95%]
41.8	[25.6 – 60.3]	57.9	[35.2 – 85.4]

En lo que respecta a los incrementos en Hs, el informe IH-Cantabria (2019) establece que el cuantil 95 % en el Río de la Plata próximo a Juan Lacaze podría aumentar, para el horizonte 2070-2099, aprox. 2% en RCP4.5 y aprox. 4% en RCP8.5. Mientras que en lo que respecta a marea meteorológica, establece que el residuo meteorológico correspondiente al cuantil 95% en la zona de Juan Lacaze no se vería afectado para el horizonte 2070-2099.

Por otra parte en IMFIA (2019) (Entregable 2.1) se establece que los incrementos en el nivel de mar total y en la altura de ola significativa, para condiciones extremas, no se verían afectados de forma significativa por efecto del aumento del nivel medio del mar o, en todo caso, las variaciones quedarían reducidas a valores no significativos en comparación con la incertidumbre involucrada en el cálculo de extremos.

Visto lo anterior, los tres escenarios de cambio climático a considerar se definen a partir de los valores de aumento de NMM y de aumento de Hs que se presentan en la Tabla 3.

**Tabla 3.- Aumento de NMM y de Hs que definen los escenarios de cambio climático evaluados.**

<i>Escenario</i>	<i>Aumento NMM</i>	<i>Aumento HS</i>
Leve	+25 cm	+2%
Medio	+55 cm	+4%
Severo	+85 cm	+4%

### **Construcción de las tormentas a simular**

Para el escenario de referencia denominado Actual, se construyen las tormentas a simular en base a los siguientes criterios:

- La tormenta tiene 48 horas de duración, que corresponde con la media de las diez tormentas registradas de mayor Hs (ver Figura 5).
- La evolución de la tormenta es triangular, con el pico en el centro del tiempo. El oleaje crece desde Hs = 1 m hasta el pico y luego decrece nuevamente. El nivel crece del nivel medio hasta el pico y luego decrece.
- El período medio del oleaje en cada estado de mar es el dado por la regresión lineal  $T_m = 1.03 \cdot H_s + 4.2$  (Figura 3).
- La dirección media del oleaje es de 150°, la esperable para los eventos extremos (Figura 4).

Siguiendo los puntos mencionados, se construyeron las tres tormentas representativas de la climatología vigente (i.e. Escenario Actual) y que corresponden a los tres períodos de retorno que se analizan. Las mismas se presentan en la Figura 7.

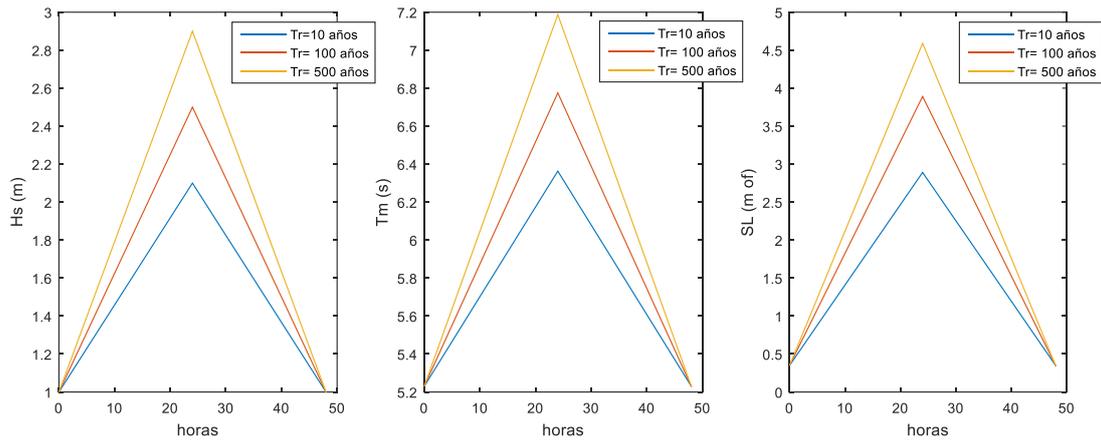


Figura 7.- Escenario Actual

En el caso de los escenarios de cambio climático, las tormentas correspondientes al escenario actual se transforman de acuerdo a los valores establecidos en la Tabla 3. En las figuras 8, 9 y 10 se presentan como quedan las tormentas transformadas para representar los distintos escenarios de cambio climático

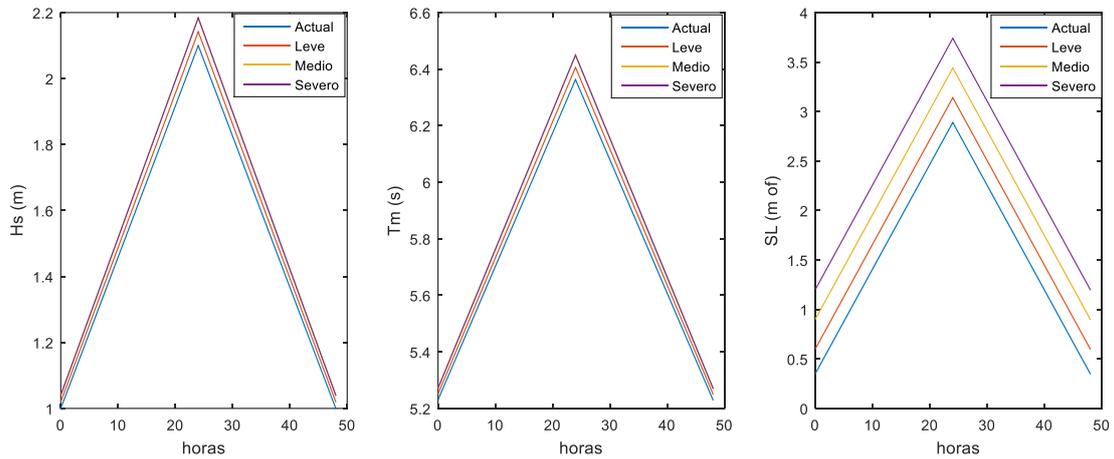


Figura 8.- Tormentas de 10 años de período de retorno para distintos escenarios de cambio climático.

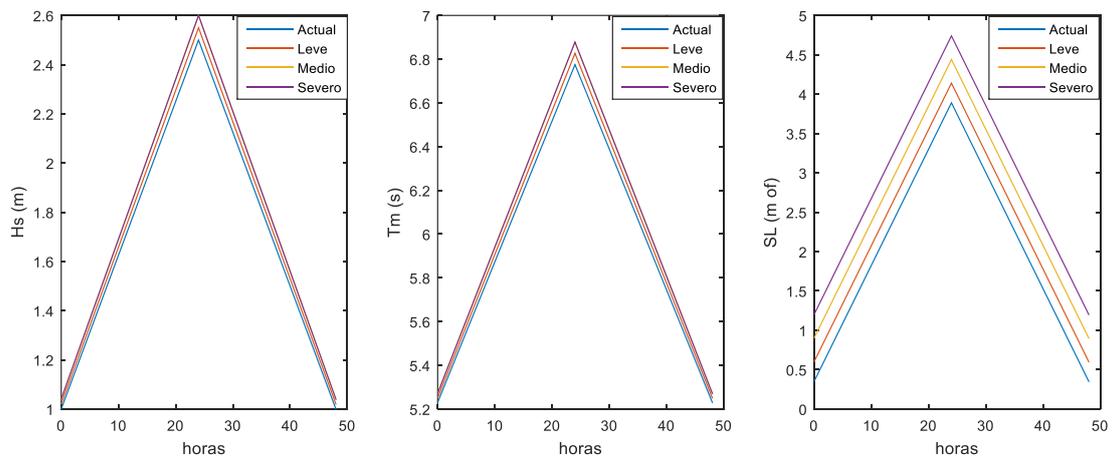


Figura 9.- Tormentas de 100 años de período de retorno para distintos escenarios de cambio climático.

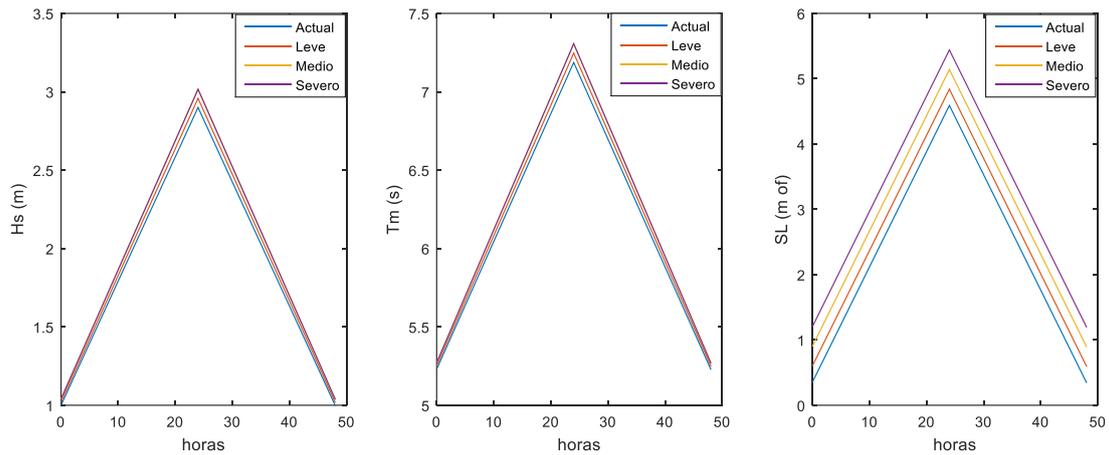


Figura 10.- Tormentas de 500 años de período de retorno para distintos escenarios de cambio climático.

### Construcción del perfil de playa

Se construyó un perfil transversal representativo de la playa Charrúa de Juan Lacaze. Los pasos a seguir fueron:

- A partir del modelo digital de terreno (MDT) se obtuvieron las cotas correspondientes al perfil que se indica en la Figura 11.
- Se estableció el perfil de playa subacuático en base al modelo de equilibrio de Dean (Dean, 1991) considerando un tamaño de sedimento medio  $D_{50}=0.35$  mm.
- Se compatibilizó el MDT y el perfil subacuático con una pendiente de 7%
- Se extendió el perfil hacia la ciudad a cota constante.

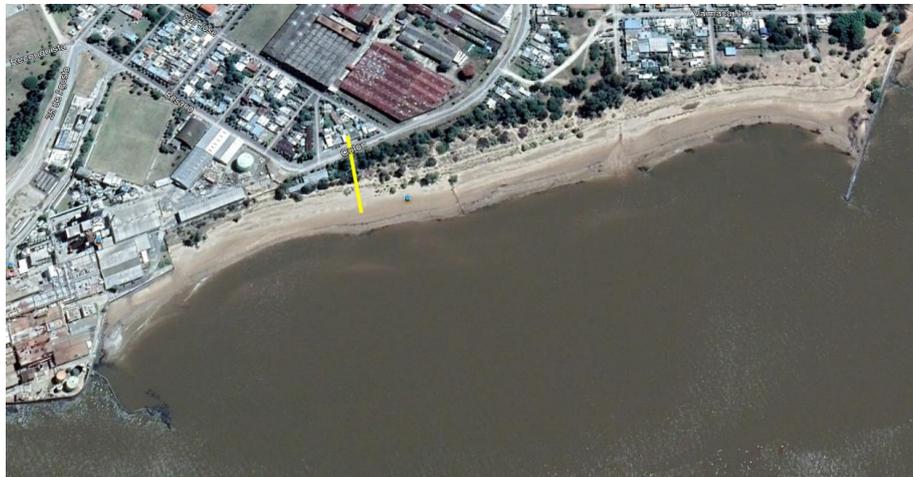


Figura 11.- Posición del perfil obtenido del MDT (Segmento amarillo).

El perfil obtenido se presenta en la Figura 12, donde se indican las distintas partes que lo componen.

Este perfil se lo considera representativo del escenario actual. Para el análisis de los escenarios de cambio climático se lo modifica de la siguiente manera:

- Se adapta el perfil subacuático y el frente de playa al aumento de NMM en base a la regla de Bruun (Bruun, 1962).

- La duna y la parte posterior se los mantiene igual, asumiendo que no tienen el tiempo ni el espacio suficiente como para adaptarse al aumento del NMM.

En la Figura 13 se presentan los perfiles obtenidos de esta forma para los distintos escenarios de cambio climático.

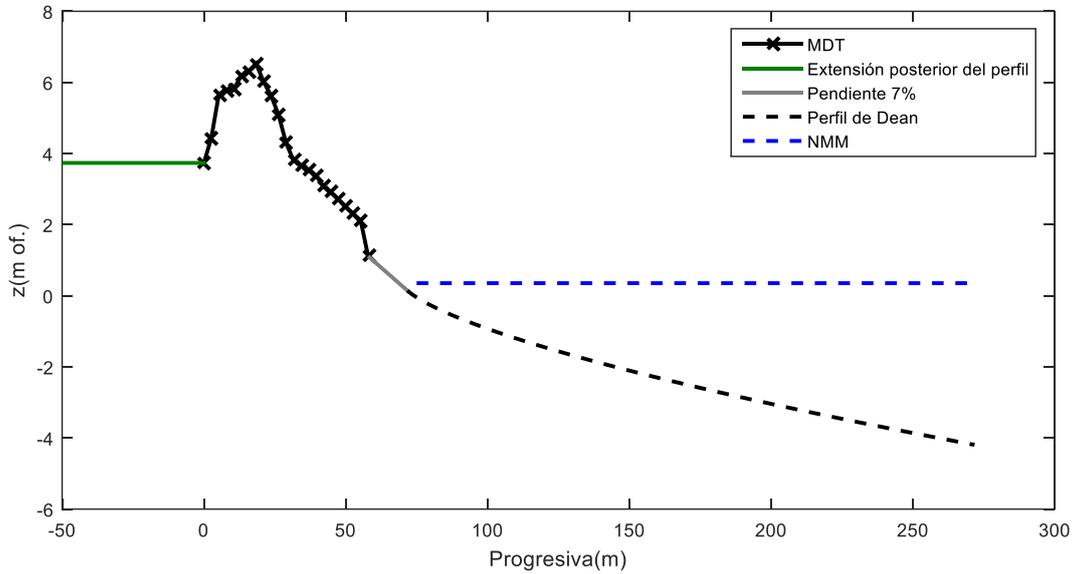


Figura 12.-Perfil de la playa Charrúa considerado en el trabajo. Escenario Actual.

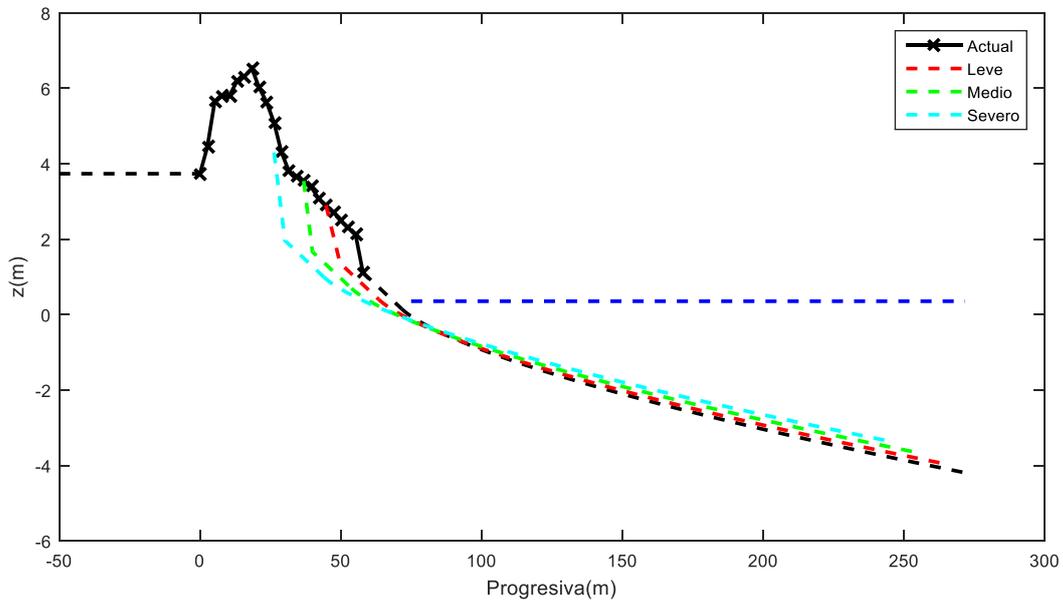


Figura 13.- Perfiles de playa adaptados al aumento del NMM de los distintos escenarios de cambio climático considerados.

### Modelo Morfodinámico

Se utilizó el software XBeach (Roelvinck et al., 2009) para modelar la respuesta del perfil de playa ante una tormenta. Se realizaron 12 simulaciones correspondientes a 3 períodos de retorno (10, 100 y 500) y 4 escenarios (Actual, Leve, Medio y Severo).

En cada una de estas simulaciones se utilizó la tormenta y perfil de playa correspondientes al escenario y período de retorno, tal como se lo describió en los apartados anteriores. Lo que se mantuvo igual en todas las simulaciones fue el tamaño de sedimento ( $D_{50}=0.35\text{mm}$ ), y la discretización del modelo numérico, definida por un  $\Delta x=0.5\text{m}$  y un número CFL=0.9.

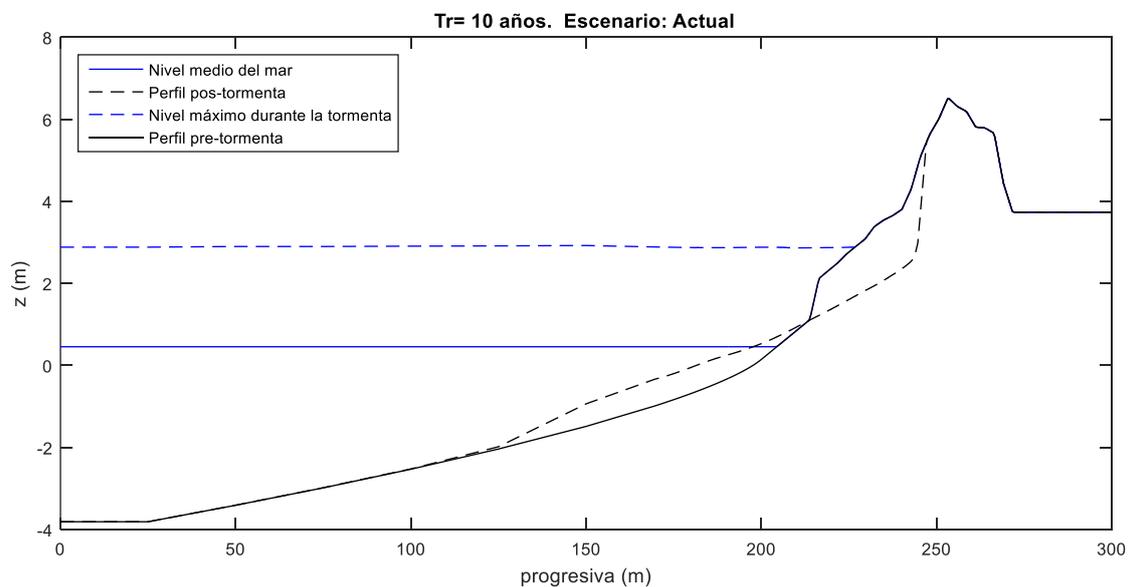
Para definir la tormenta en términos de oleaje irregular se asume un espectro del tipo JONSWAP.

## Resultados

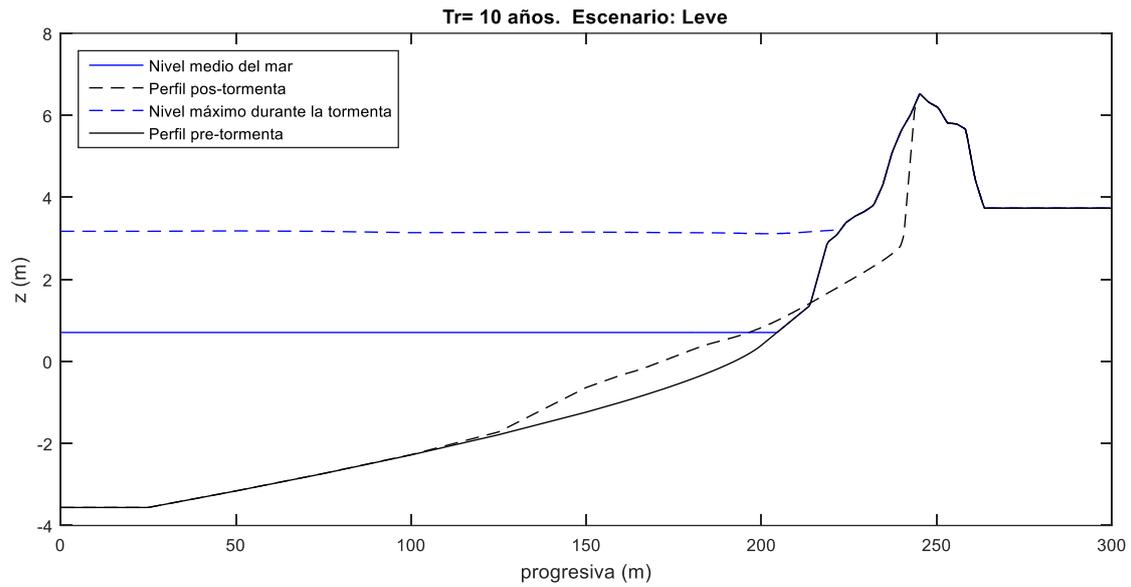
En las figuras 14 a 25 se presentan los resultados de las 12 simulaciones. Se presentan los perfiles pre y post tormenta y el nivel máximo que alcanzó el mar en la tormenta. A su vez se cuantifican los siguientes indicadores de la severidad de la erosión e inundación costera debido a la tormenta:

- VDE: Volumen de duna erosionada. Al tratarse de un modelo de perfil de playa las unidades son  $\text{m}^3/\text{m}$ . Se interpreta como un volumen que ocupa la arena erosionada por unidad de ancho de playa.
- $\Delta ZD$ : Diferencias en la cota de coronamiento (i.e. punto más alto) de la duna entre la condición pos y pre tormenta.
- R: Diferencia de cotas mínima entre la duna y el nivel del mar. De esta forma R positivos significa que el agua no inundó la parte posterior a la duna, mientras que R negativos es un indicador de inundación costera.

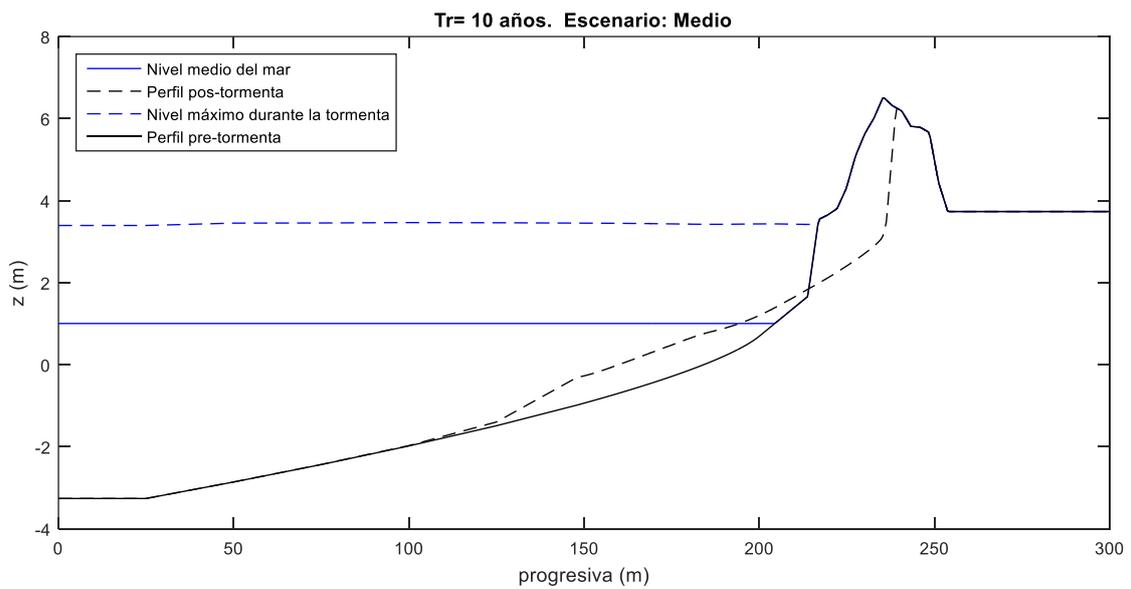
En las tablas 4, 5 y 6 se presentan los resultados de VDE,  $\Delta ZD$  y R obtenidos.



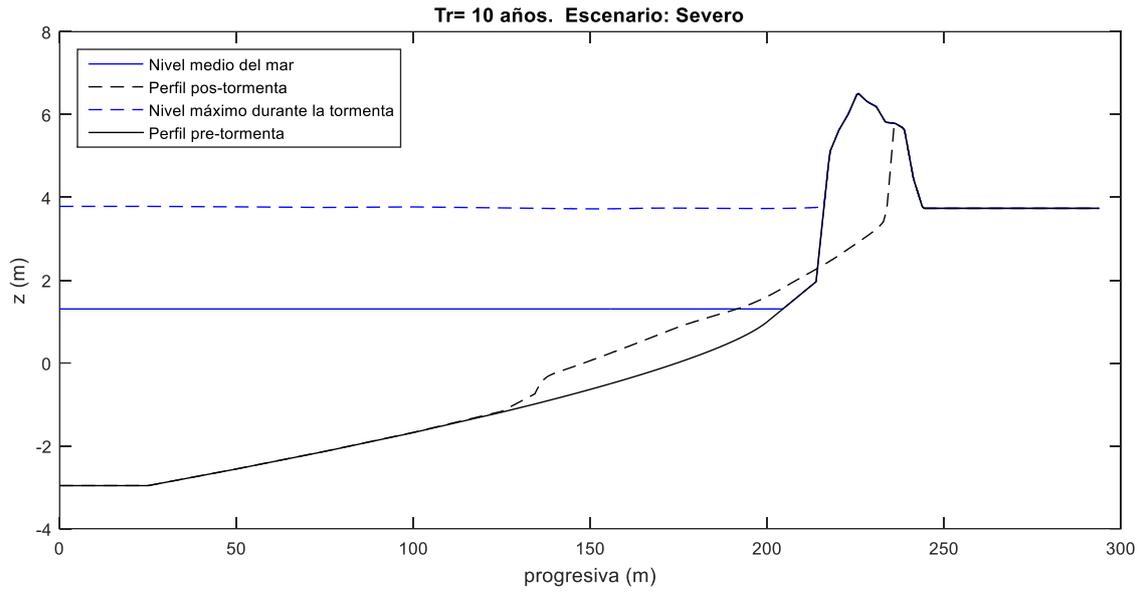
**Figura 14.- Resultados. Simulación correspondiente al escenario actual y a una tormenta de 10 años de período de retorno.**



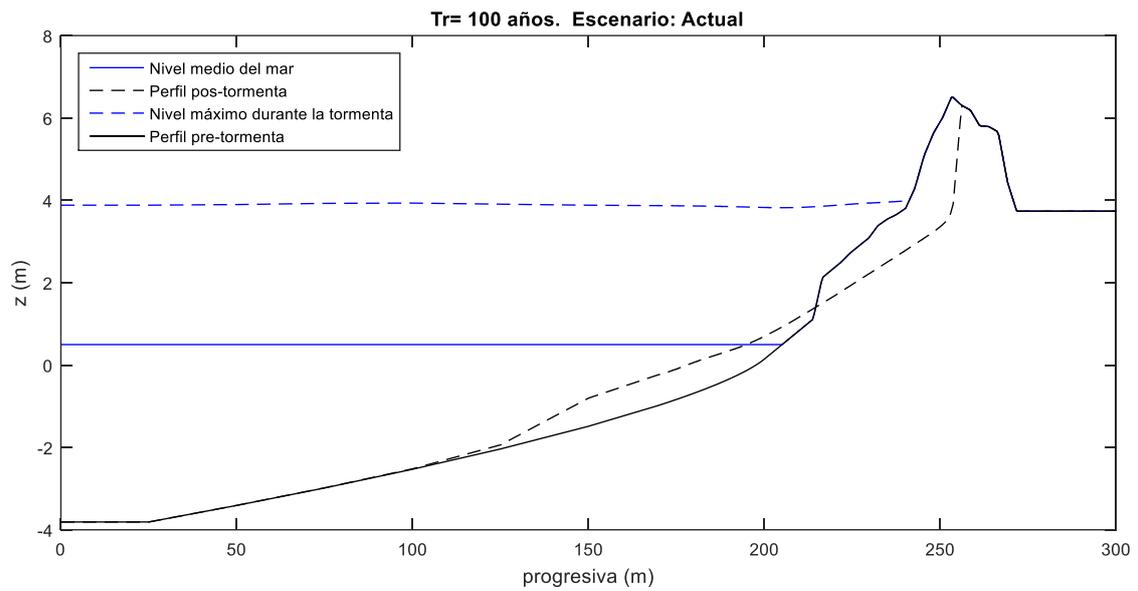
**Figura 15.- Resultados. Simulación correspondiente al escenario cambio climático Leve y a una tormenta de 10 años de período de retorno.**



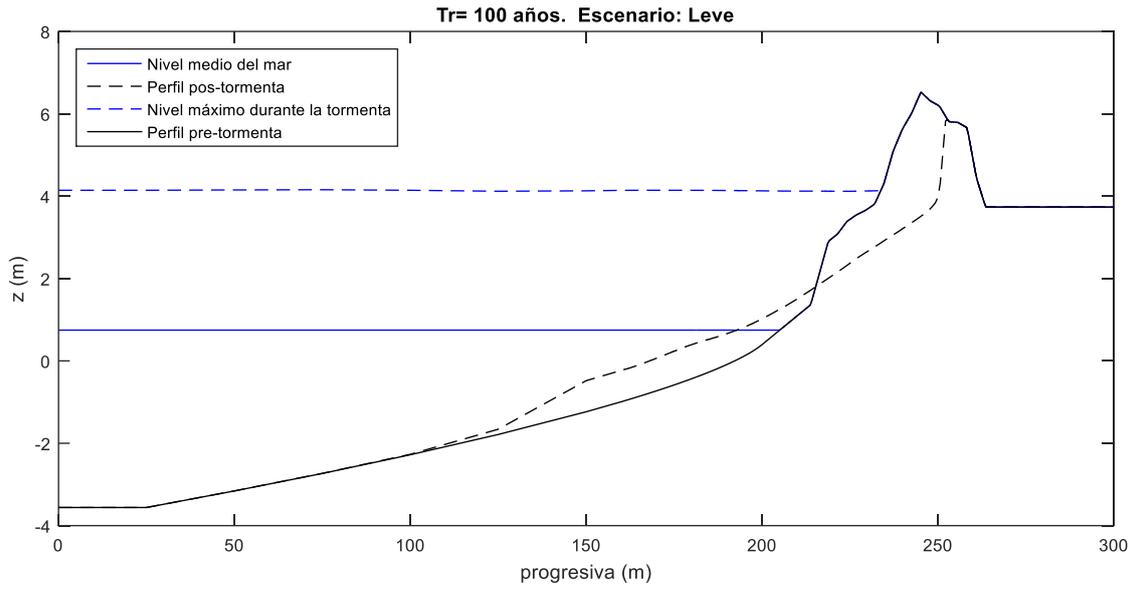
**Figura 16.- Resultados. Simulación correspondiente al escenario de cambio climático Medio y a una tormenta de 10 años de período de retorno.**



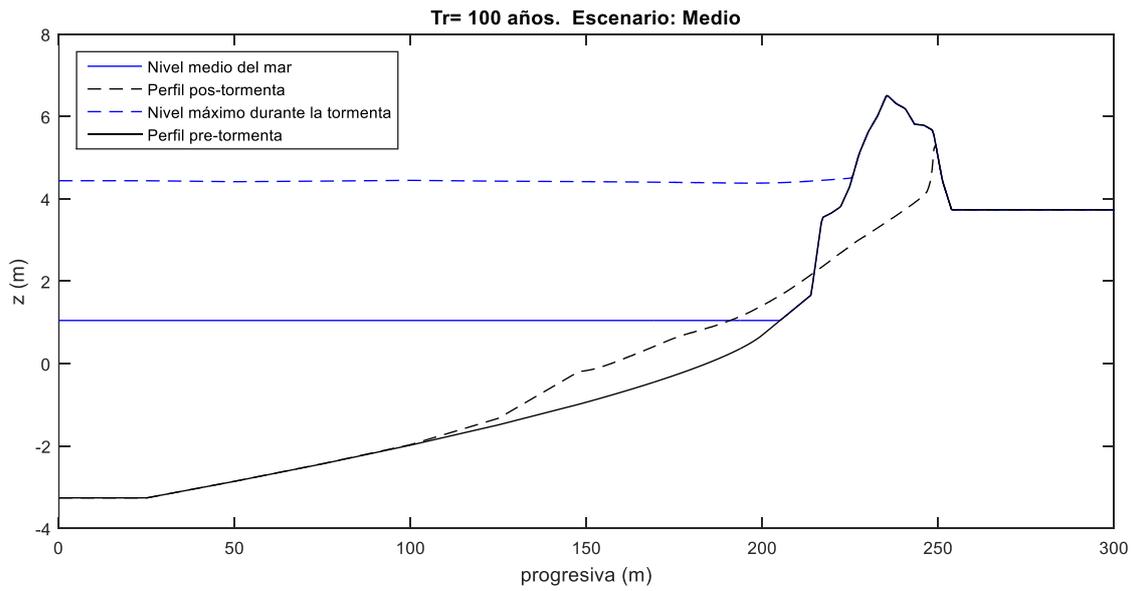
**Figura 17.- Resultados. Simulación correspondiente al escenario de cambio climático Severo y a una tormenta de 10 años de período de retorno.**



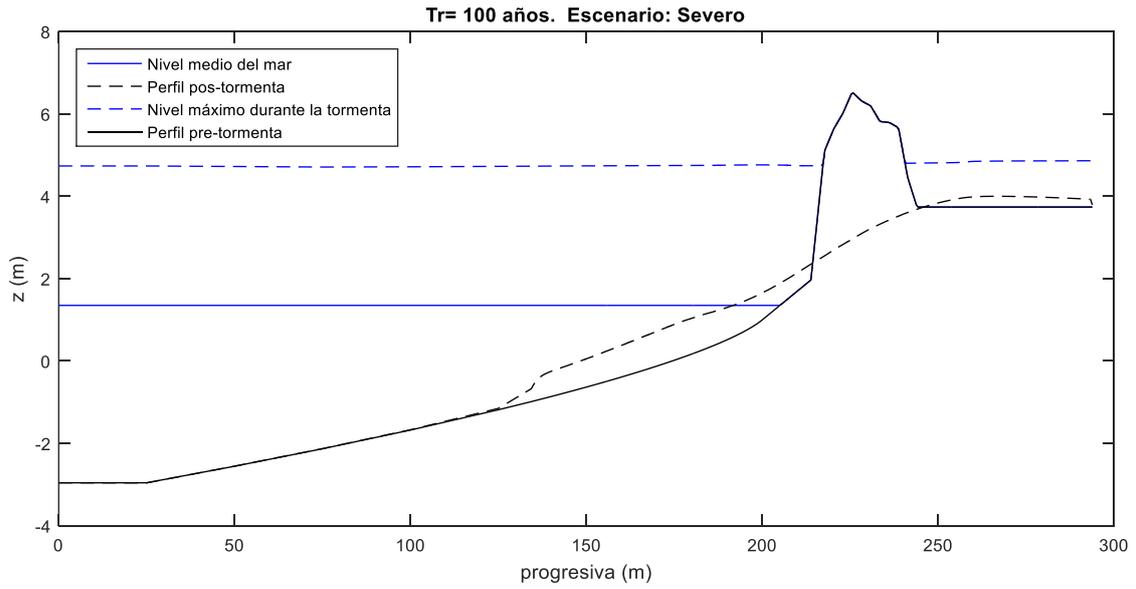
**Figura 18.- Resultados. Simulación correspondiente al escenario actual y a una tormenta de 100 años de período de retorno.**



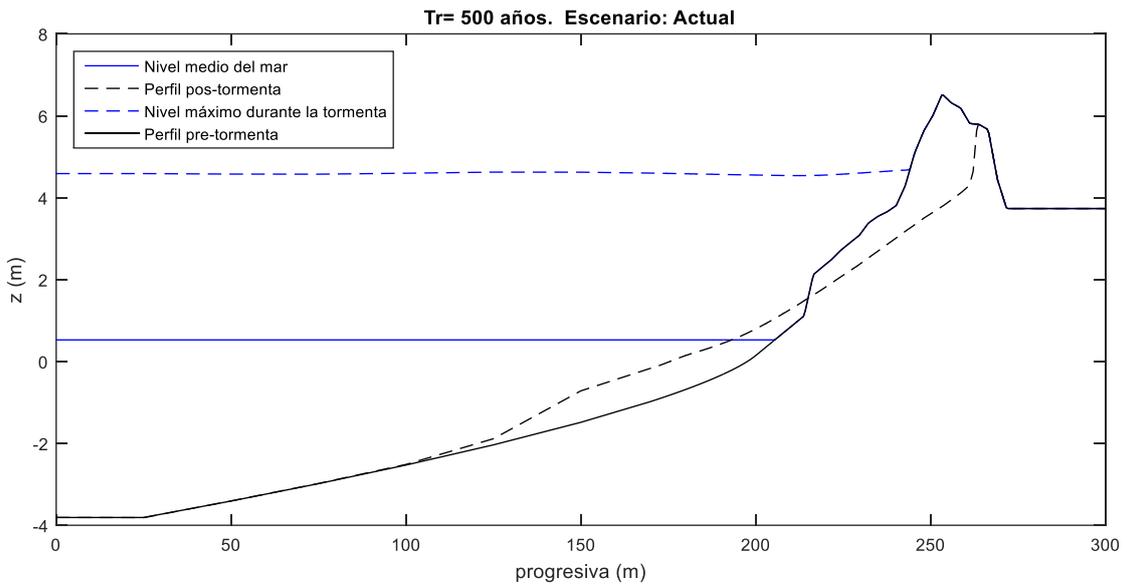
**Figura 19.- Resultados. Simulación correspondiente al escenario de cambio climático Leve y a una tormenta de 100 años de período de retorno.**



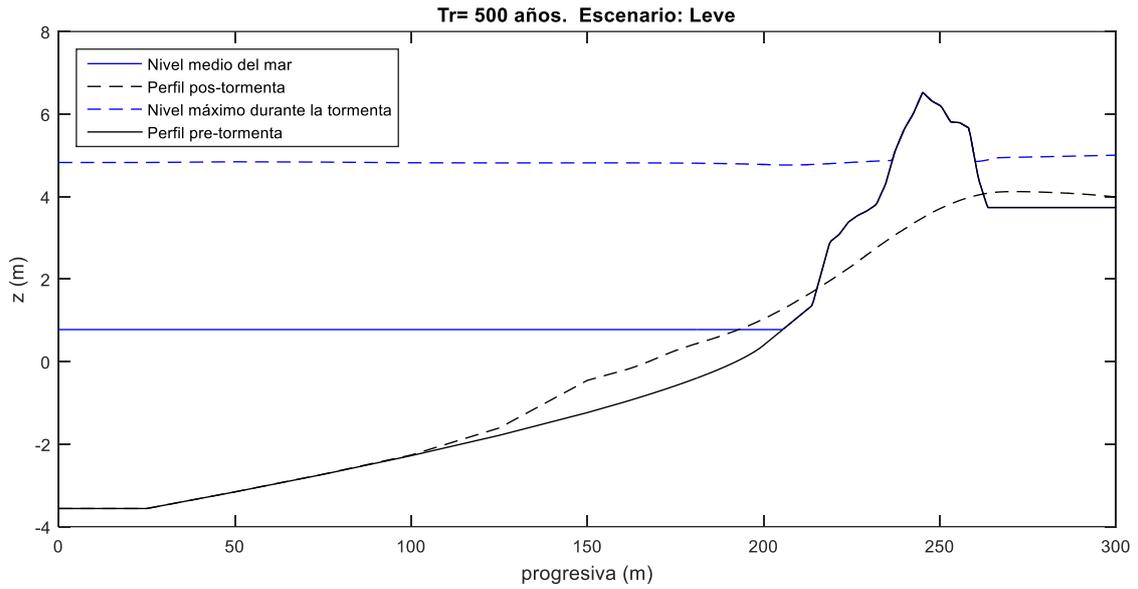
**Figura 20.- Resultados. Simulación correspondiente al escenario de cambio climático Medio y a una tormenta de 100 años de período de retorno.**



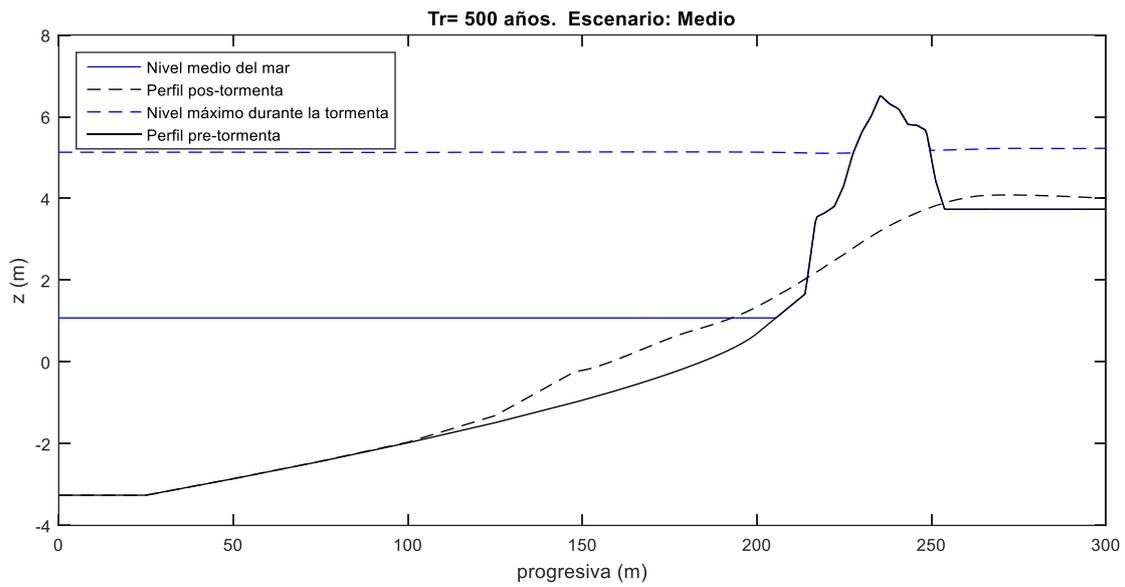
**Figura 21.- Resultados. Simulación correspondiente al escenario de cambio climático Severo y a una tormenta de 100 años de periodo de retorno.**



**Figura 22.- Resultados. Simulación correspondiente al escenario actual y a una tormenta de 500 años de periodo de retorno.**



**Figura 23.- Resultados. Simulación correspondiente al escenario de cambio climático Leve y a una tormenta de 500 años de periodo de retorno.**



**Figura 24.- Resultados. Simulación correspondiente al escenario de cambio climático Medio y a una tormenta de 500 años de periodo de retorno.**

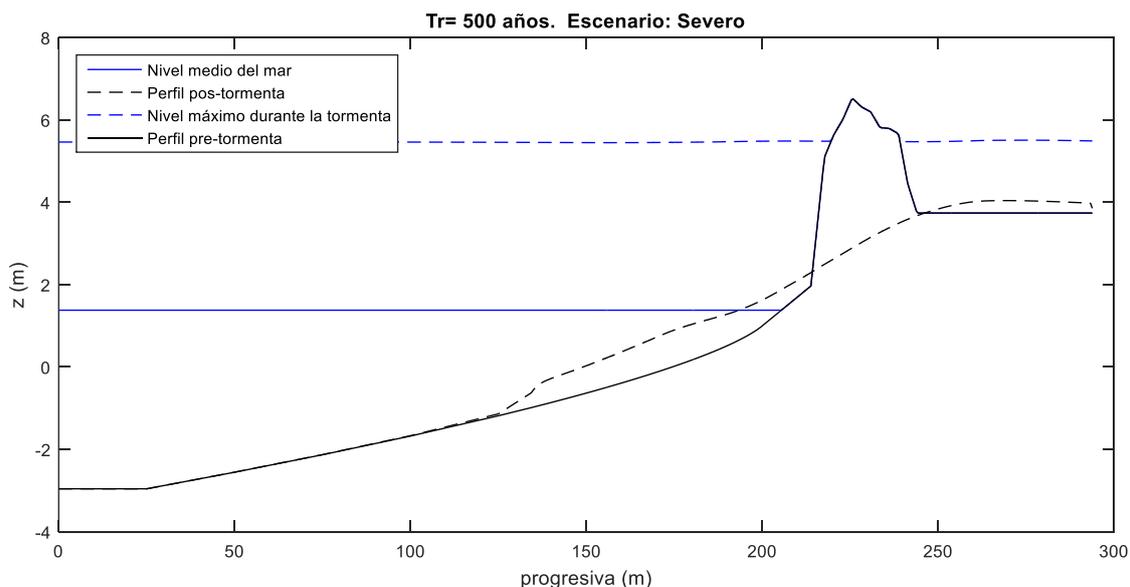


Figura 25.- Resultados. Simulación correspondiente al escenario de cambio climático Severo y a una tormenta de 500 años de período de retorno.

Tabla 4.-Volumen de duna erosionada (VDE) en m<sup>3</sup>/m.

	<i>Actual</i>	<i>Leve</i>	<i>Medio</i>	<i>Severo</i>
<i>Tr=10 años</i>	40.7	44.9	51.4	56.5
<i>Tr=100 años</i>	52.3	58.3	64.6	70.2
<i>Tr=500 años</i>	60.2	76.4	77.6	71.8

Tabla 5.- Diferencias de cota de coronamiento de la duna entre el perfil posterior y previo a la tormenta.  $\Delta ZD$  (m).

	<i>Actual</i>	<i>Leve</i>	<i>Medio</i>	<i>Severo</i>
<i>Tr=10 años</i>	0	0	0.25	0.73
<i>Tr=100 años</i>	0.20	0.66	1.18	2.51
<i>Tr=500 años</i>	0.71	2.41	2.42	2.47

Tabla 6.- Indicador de inundación costera (R (m)). Definido como la diferencia de cotas mínima entre el coronamiento de la duna y el nivel del mar.

	<i>Actual</i>	<i>Leve</i>	<i>Medio</i>	<i>Severo</i>
<i>Tr=10 años</i>	3.61	3.38	2.80	2.04
<i>Tr=100 años</i>	2.43	1.72	0.90	- 0.73
<i>Tr=500 años</i>	1.19	- 0.70	- 1.05	- 1.41

### Síntesis de Resultados

Los resultados obtenidos muestran que para un escenario de cambio climático intermedio entre los definidos como Leve y Medio, el agravamiento de las consecuencias de erosión costera debido a una tormenta, son similares a los que generaría una tormenta en el escenario actual pero con un período de retorno un orden mayor. Es decir, una tormenta de 10 años de período de retorno en un escenario de cambio climático entre Leve y Medio, genera similares

consecuencias en cuanto a erosión costera que una tormenta de 100 años de período de retorno para el escenario actual. Lo mismo se observa para una tormenta de 100 años de período de retorno en un escenario de cambio climático entre Leve y Medio y una tormenta de 500 años de período de retorno para el escenario actual.

Para este escenario de cambio climático entre Leve y Medio, una tormenta de 100 años de período de retorno erosionaría significativamente la duna generando un alto riesgo de inundaciones costeras. Estas mismas consecuencias se observan para un escenario de cambio climático entre Medio y Severo pero para un evento de 10 años de período de retorno.

## Referencias

Bruun, P. (1962). *"Sea-Level Rise as a Cause of Shore Erosion"*. *American Society of Civil Engineers Journal of the Waterways and Harbours Division*. **88**: 117–130.

Coles, S. 2001. *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*, London, Springer- Verlag, 208 pp.

Dean, R. G. (1991). *Winter Equilibrium Beach Profiles : Characteristics and Applications*. of Coastal Research I 7 I 1 1 53-84 I Fort I Water, 7(1), 53–84. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/4297805>.

IH Cantabria (2019). Desarrollo de Herramientas Tecnológicas para Evaluar Impactos, La Vulnerabilidad y la Adaptación al Cambio Climático en la Zona Costera de Uruguay. Informe Técnico.

IMFIA (2019). Proyecto URU/18/002. Integración del enfoque de adaptación en ciudades, infraestructura y ordenamiento territorial en Uruguay. Entregable E.1.1.

Roelvink, D., Reniers, A., van Dongeren, A., van Thiel de Vries, J., McCall, R., & Lescinski, J. (2009). *Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands*. *Coastal Engineering*, 56(11-12), 1133–1152. <http://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2009.08.006>