



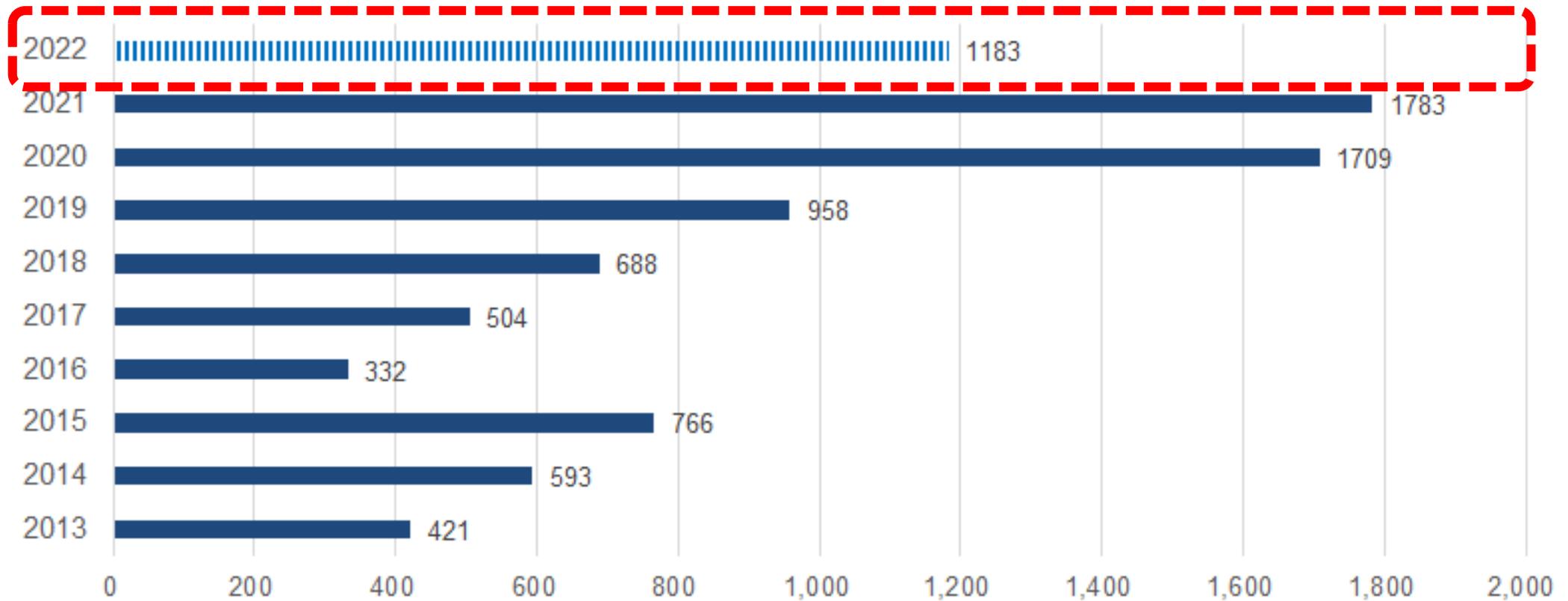
# EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL OLEAJE Y VIENTO OPERACIONAL DEL PUERTO DE SAN ANTONIO

ALEXANDRA BRUNA TORRES

Memoria Proyecto de Título

# INTRODUCCIÓN

## Horas de cierre Puerto de San Antonio 2013-2022

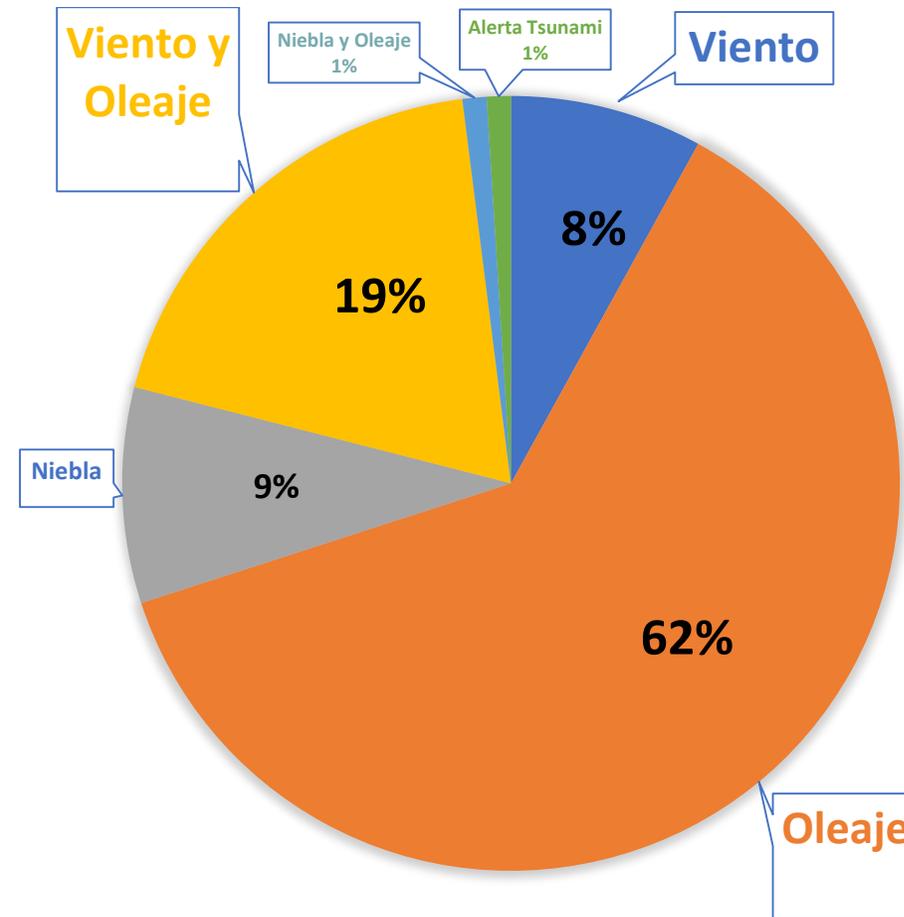


# INTRODUCCIÓN

2022



1183 horas ~ 49 días



# INTRODUCCIÓN



# OBJETIVOS

Determinar las condiciones futuras del oleaje y viento operacional del puerto de San Antonio, considerando escenarios de cambio climático.

- **Definir** condiciones de umbrales de operación.
- **Caracterizar** el clima de viento histórico y futuro en el Puerto de San Antonio.
- **Caracterizar** el clima de oleaje histórico y futuro en la zona de embarque de prácticos del Puerto de San Antonio.
- **Calcular** el *downtime* operacional.

# ¿CÓMO?

## PROYECCIONES DEL CAMBIO CLIMÁTICO



# HORIZONTES DE EVALUACIÓN

Periodo  
Histórico

1985-2004

A  
Mediados  
de Siglo

2026-2045

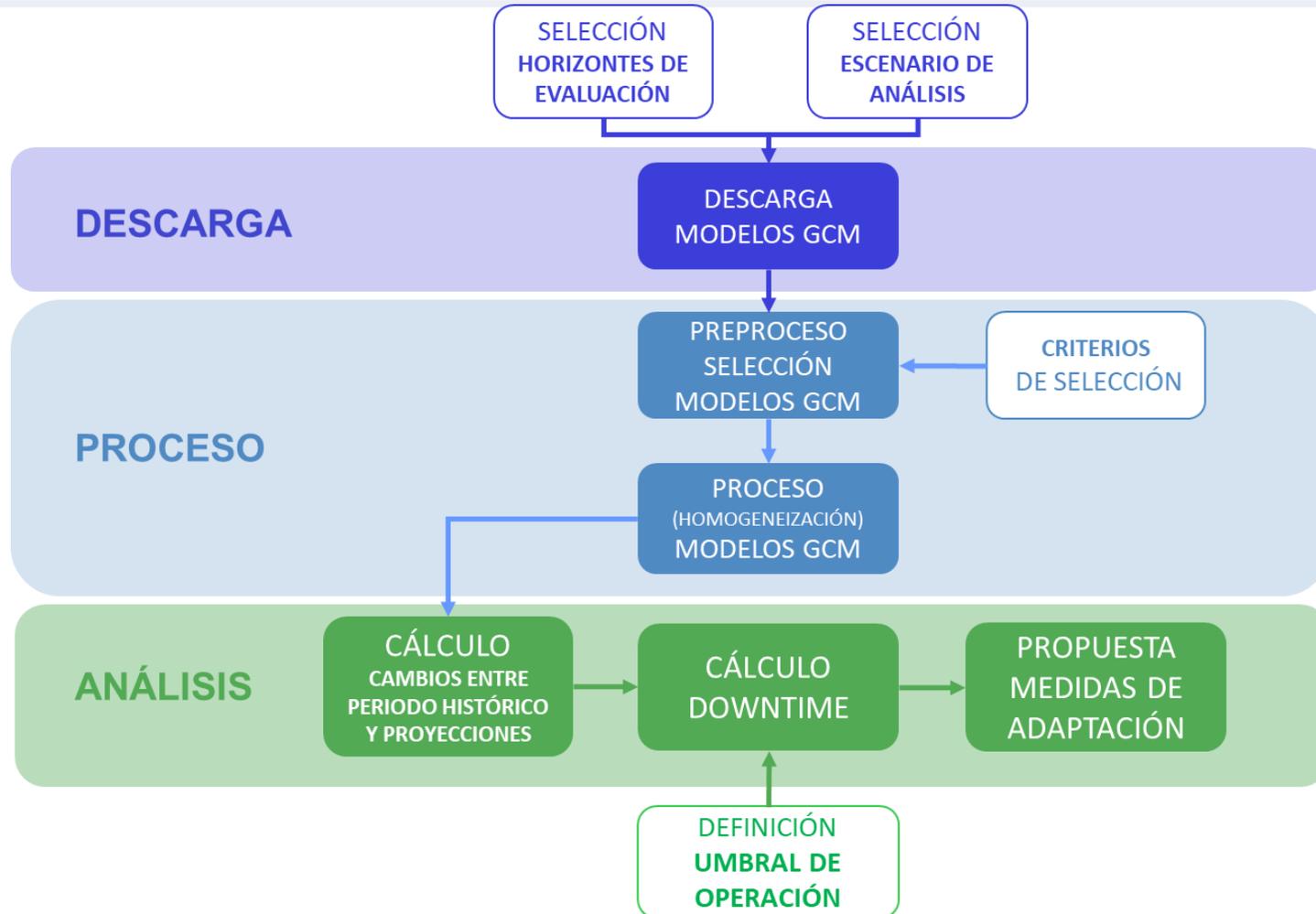
A Fin de  
Siglo

2081-2100

**PROYECCIONES**

# METODOLOGÍA

VIENTO



OLEAJE

# SELECCIÓN

V  
I  
E  
N  
T  
O



# SELECCIÓN

O

M1 MRI-CGM

L

M2 MIROC5

E

M3 HADGEM2-ES

A

M4 EC-EARTH

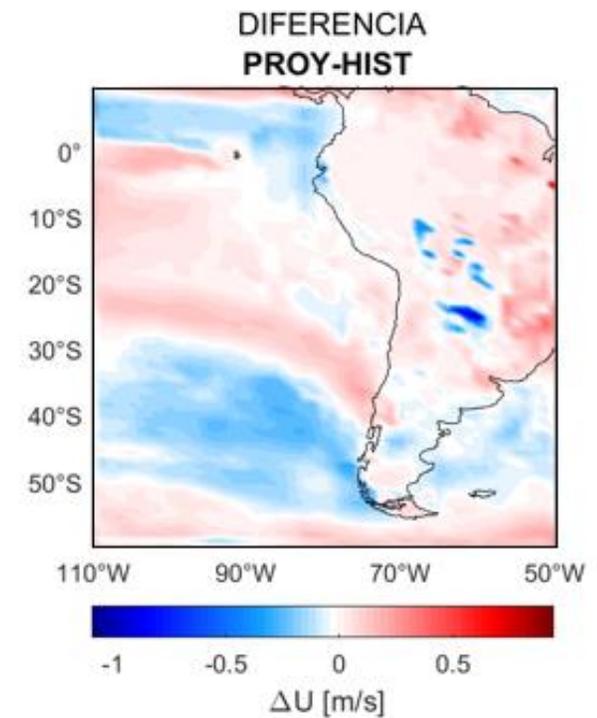
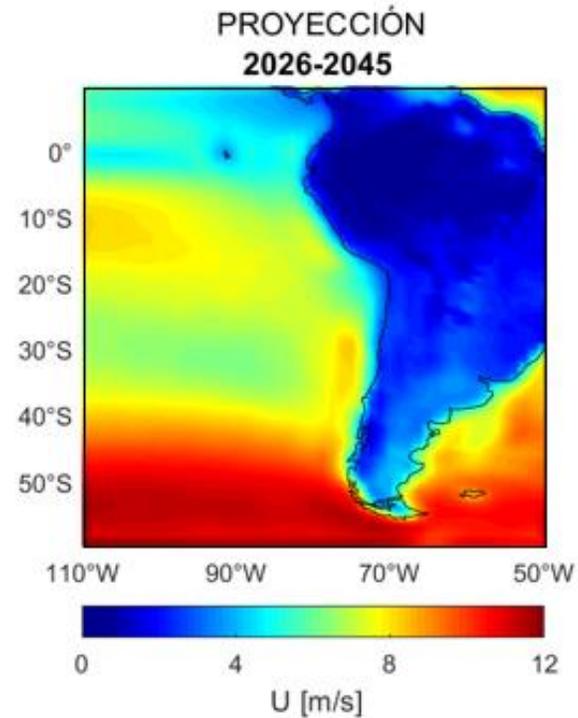
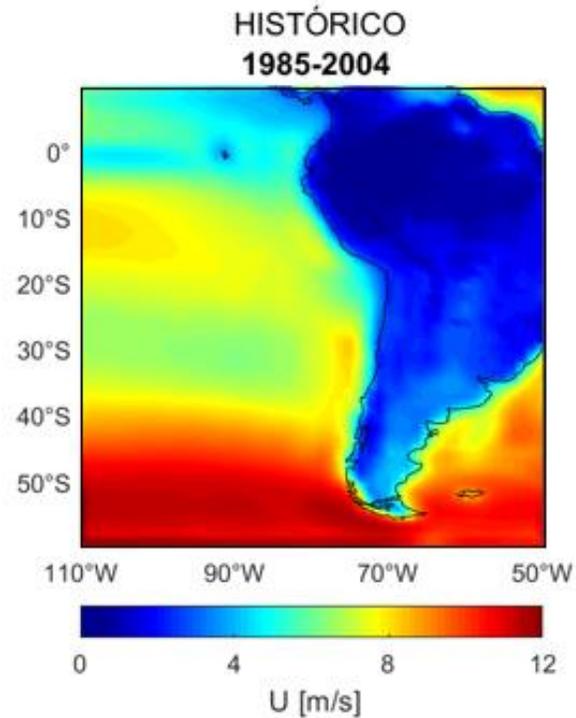
J

M5 CCMC

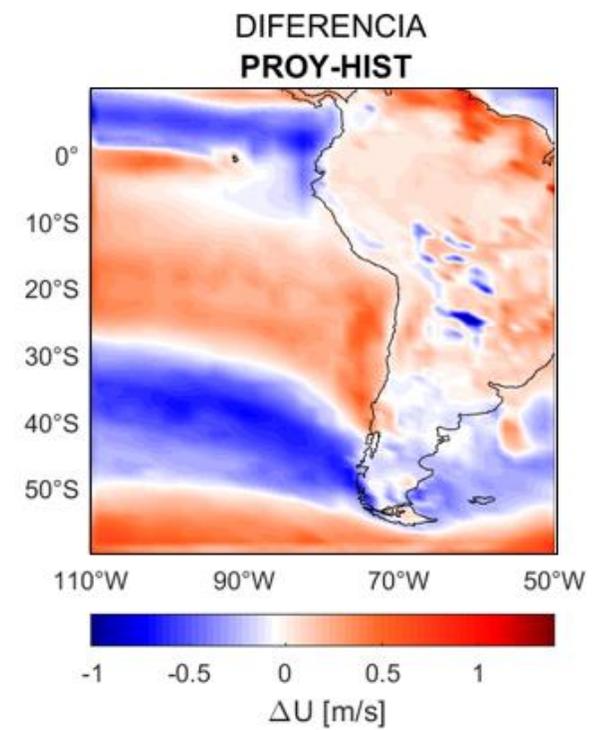
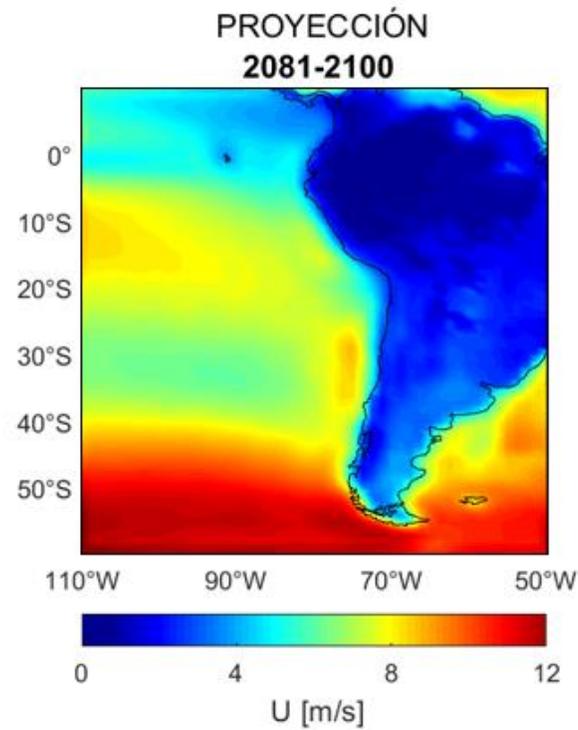
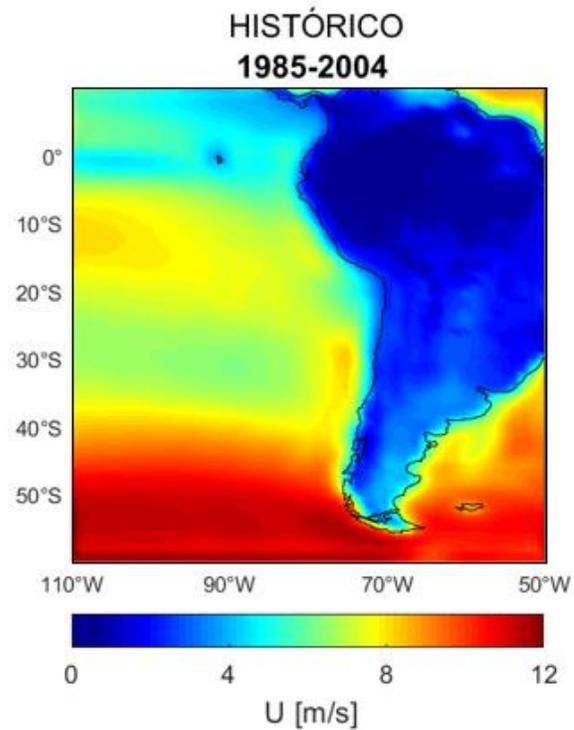
E

M6 ACCESS 1.0

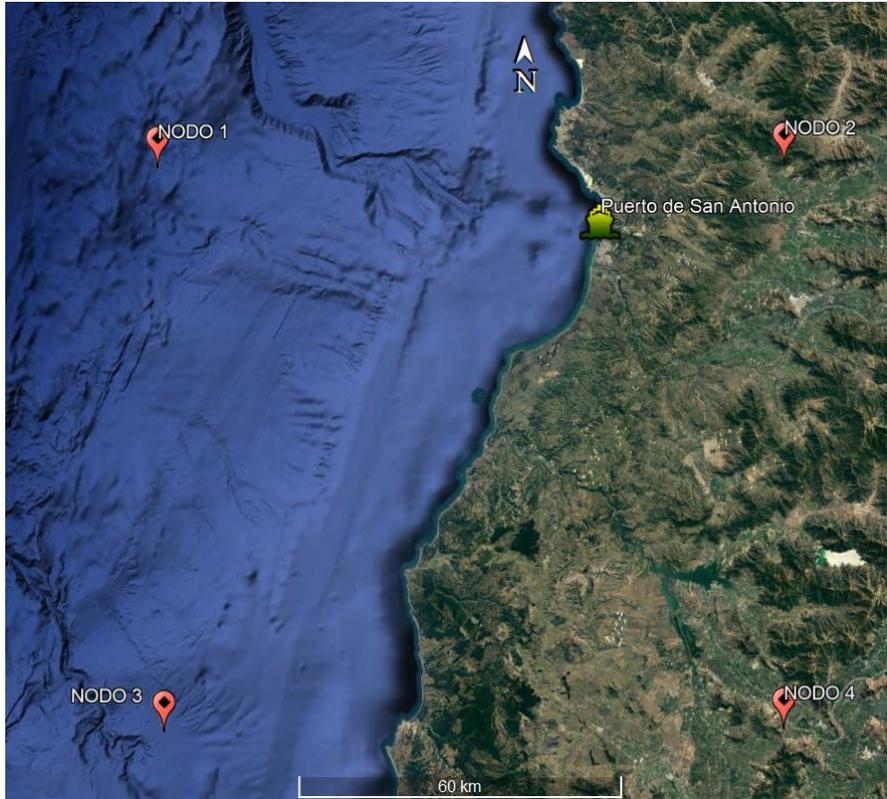
# PROYECCIONES A ESCALA OCEÁNICA



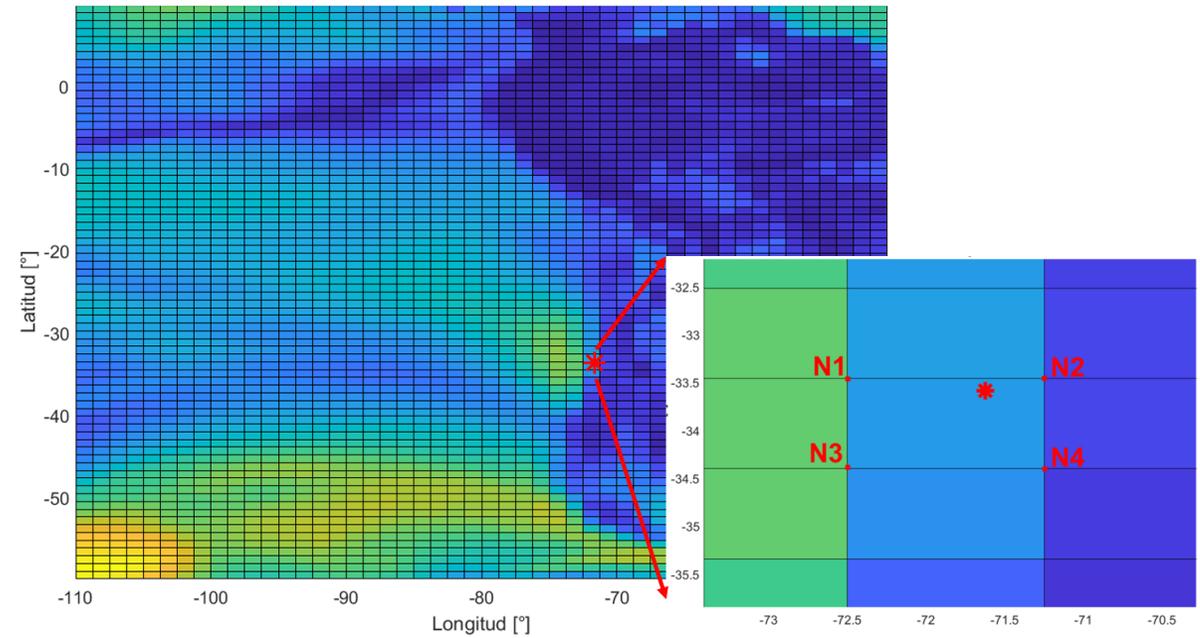
# PROYECCIONES A ESCALA OCEÁNICA



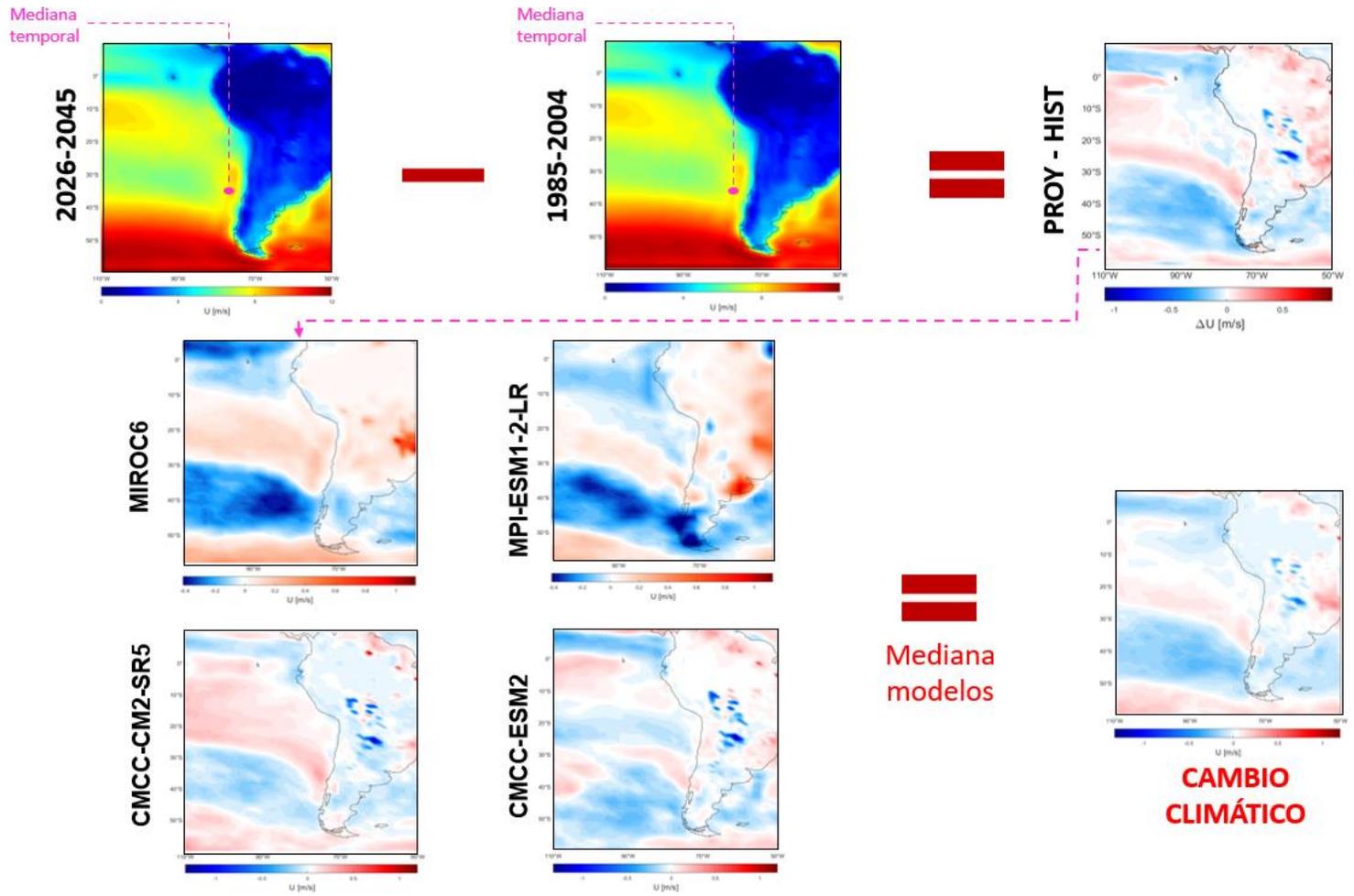
# PROCESO



## INTERPOLACIÓN



# PROCESO



# UMBRALES DE OPERACIÓN

Eslora (E)	Manga (M)	Naves Tipo	Viento [nudos]	Viento [m/s]
$E < 253 \text{ m}$	$M \leq 32,2 \text{ m}$	Todas, excepto RO-RO y Pasajes	15	7.72
$253 \text{ m} < E < 367 \text{ m}$	$M > 32,2 \text{ m}$	Todas, excepto Naves de Pasajes	10	5.14
$E \leq a 237 \text{ m}$	$M \leq a 38 \text{ m}$	RO-RO	10	5.14

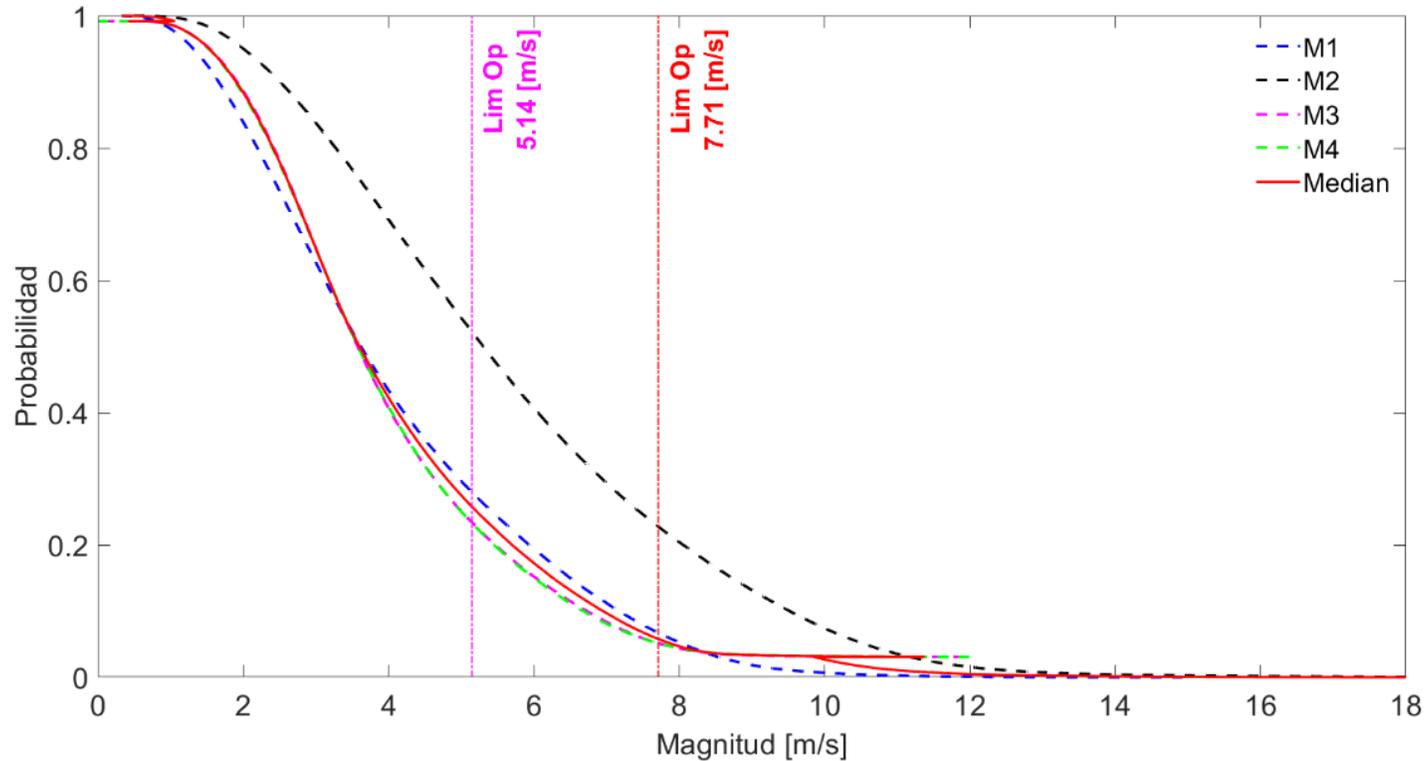
## DIRECTEMAR (2022)

# UMBRALES DE OPERACIÓN

Criterio	Acciones sentido al muelle	Viento [nudos]	Viento [m/s]
Atraque de buque	Longitudinal	33	17
	Transversal	19	10
Paralización operaciones carga y descarga	Longitudinal y Transversal	43	22
Permanencia de buques en muelle	-	43	22

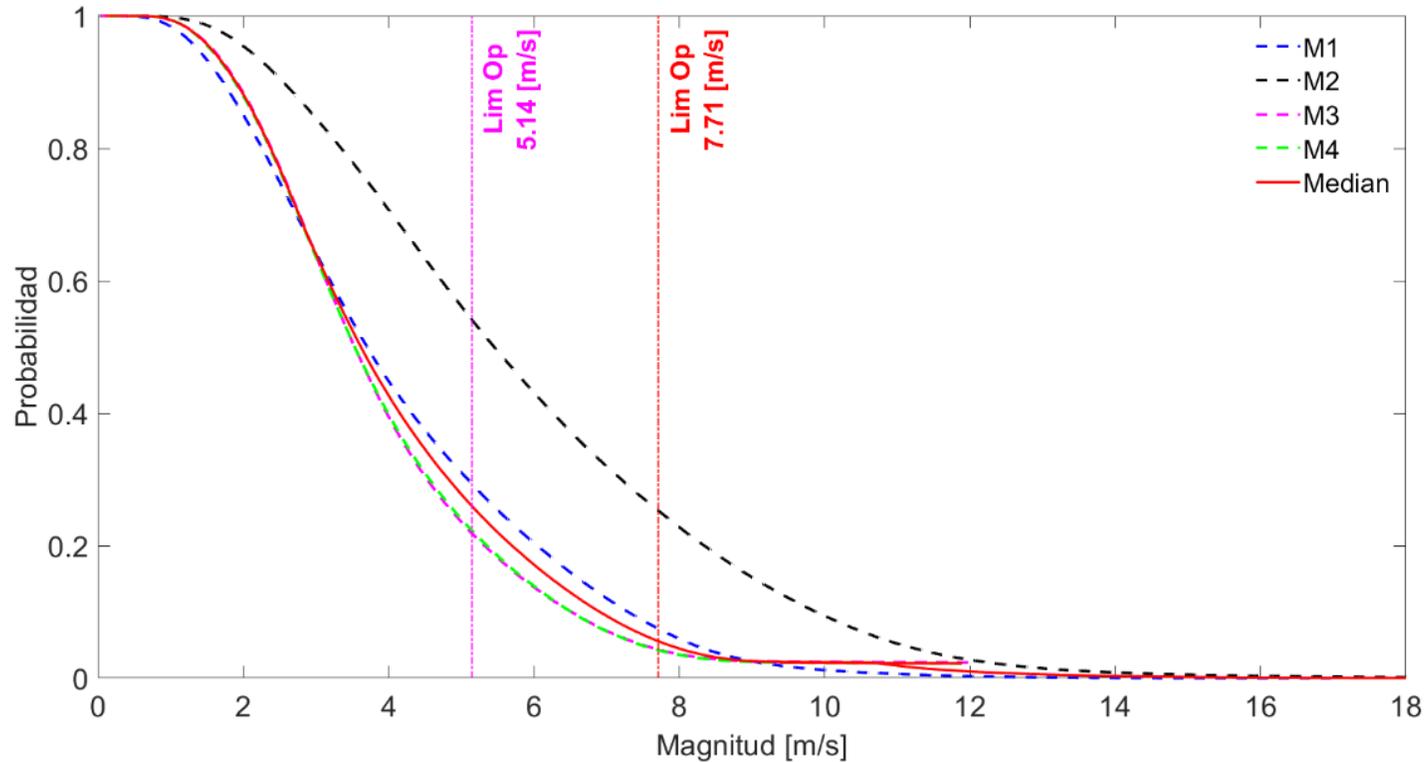
## ROM 3.1-99

# RESULTADOS VIENTO



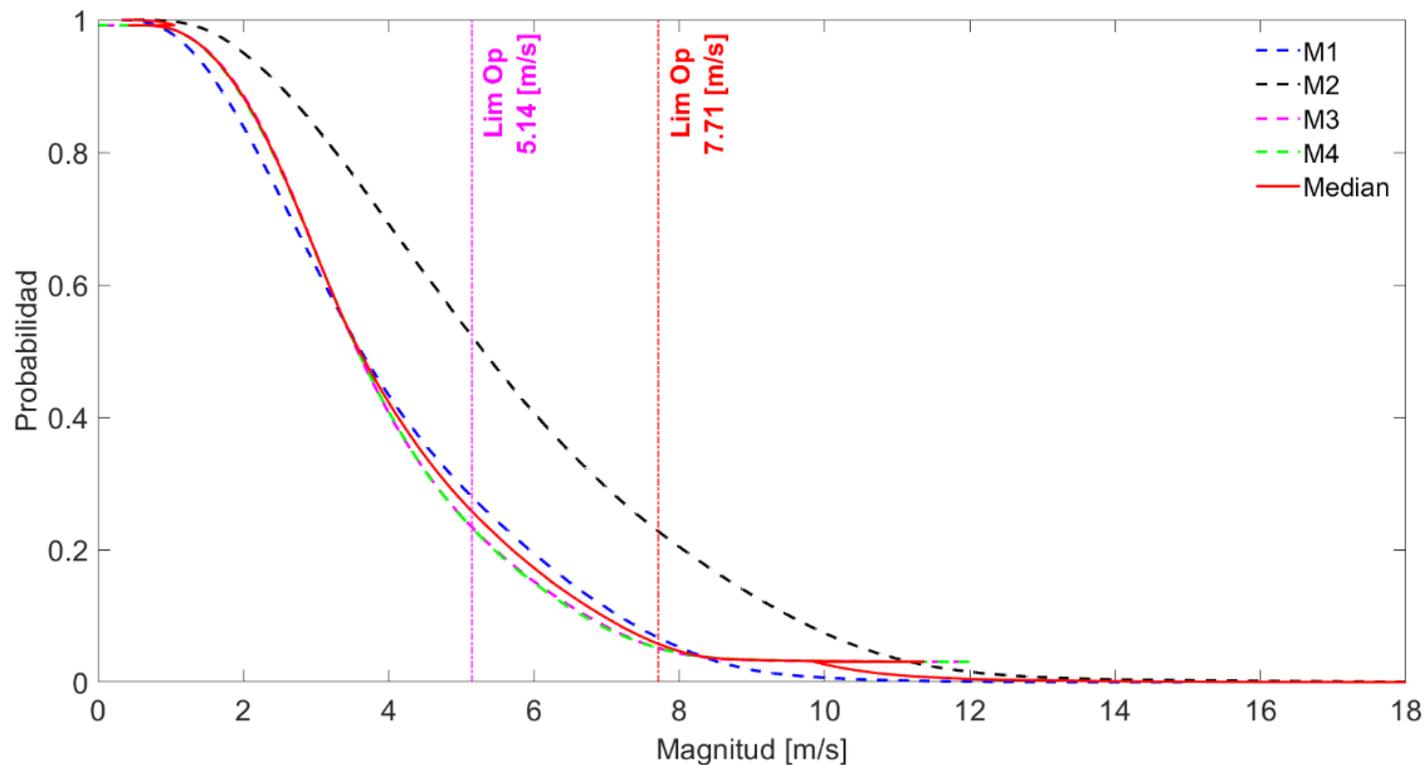
PERIODO  
HISTÓRICO

# RESULTADOS VIENTO



PROYECCIÓN A  
MEDIADOS DE SIGLO

# RESULTADOS VIENTO



PROYECCIÓN A  
FIN DE SIGLO

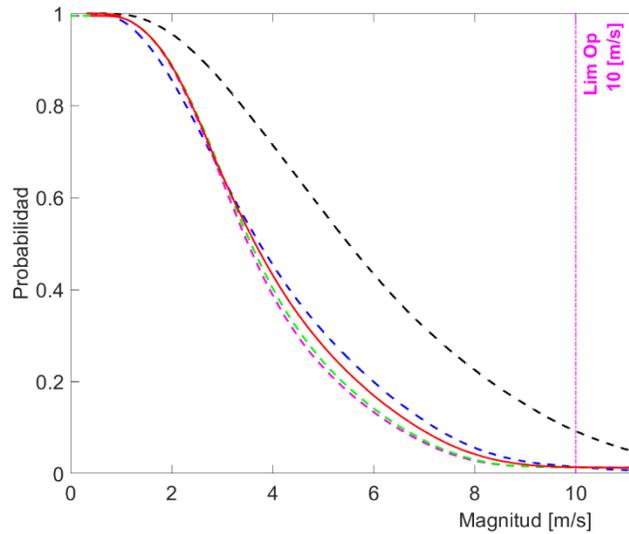
# DOWNTIME POR VIENTO

Velocidad de Viento umbral: 10 [nudos] ~ 5,14 [m/s]								
Probabilidad de excedencia %			Downtime [hora/año]			Diferencia [hora/año]		
Modelo	1985-2004	2026-2045	2081-2100	1985-2004	2026-2045	2081-2100	Med-Hist	Fin-Hist
M1	29,06	29,37	28,03	2545,72	2572,87	2455,49	<b>27,16</b>	<b>-90,23</b>
M2	54,95	54,12	52,29	4813,68	4740,97	4580,66	<b>-72,71</b>	<b>-233,02</b>
M3	21,39	21,87	23,43	1873,82	1915,87	2052,53	<b>42,05</b>	<b>178,70</b>
M4	22,54	22,27	23,31	1974,56	1950,91	2042,02	<b>-23,65</b>	<b>67,45</b>
<b>Mediana</b>	<b>25,92</b>	<b>26,01</b>	<b>25,82</b>	<b>2270,65</b>	<b>2278,54</b>	<b>2261,89</b>	<b>7,88</b>	<b>-8,76</b>

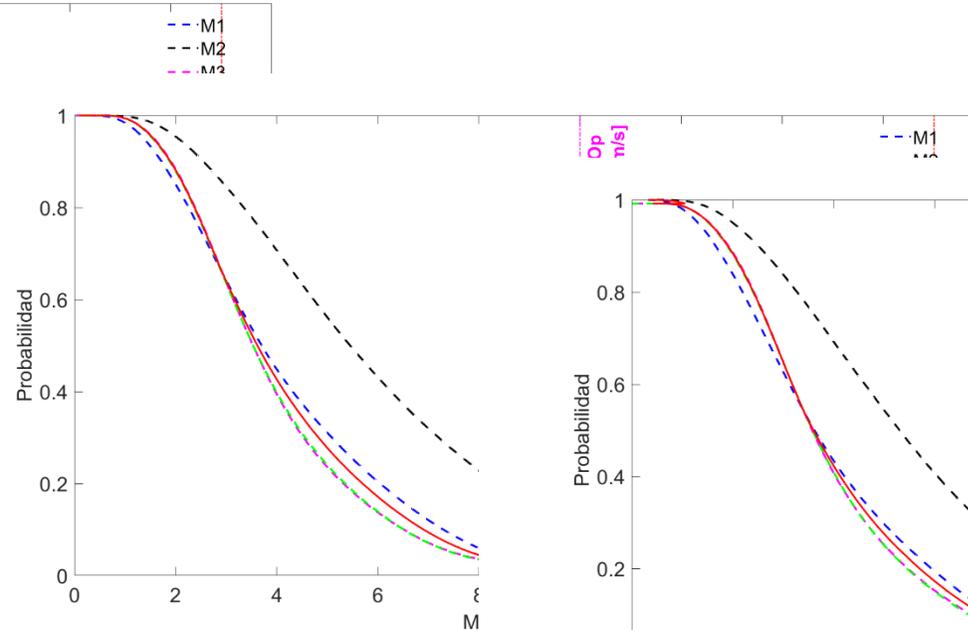
# DOWNTIME POR VIENTO

Velocidad de Viento umbral: 15 [nudos] ~ 7,71 [m/s]								
Modelo	Probabilidad de excedencia %			Downtime [hora/año]			Diferencia [hora/año]	
	1985-2004	2026-2045	2081-2100	1985-2004	2026-2045	2081-2100	Med-Hist	Fin-Hist
M1	6,97	7,46	6,70	610,19	653,12	587,24	<b>42,92</b>	<b>-22,95</b>
M2	24,90	25,30	22,75	2181,30	2216,34	1992,96	<b>35,04</b>	<b>-188,34</b>
M3	3,58	4,29	5,12	313,32	375,51	448,75	<b>62,20</b>	<b>135,43</b>
M4	3,89	4,22	5,09	340,56	369,29	445,51	<b>28,73</b>	<b>104,94</b>
<b>Mediana</b>	<b>5,28</b>	<b>5,55</b>	<b>5,76</b>	<b>462,59</b>	<b>486,42</b>	<b>504,64</b>	<b>23,83</b>	<b>42,05</b>

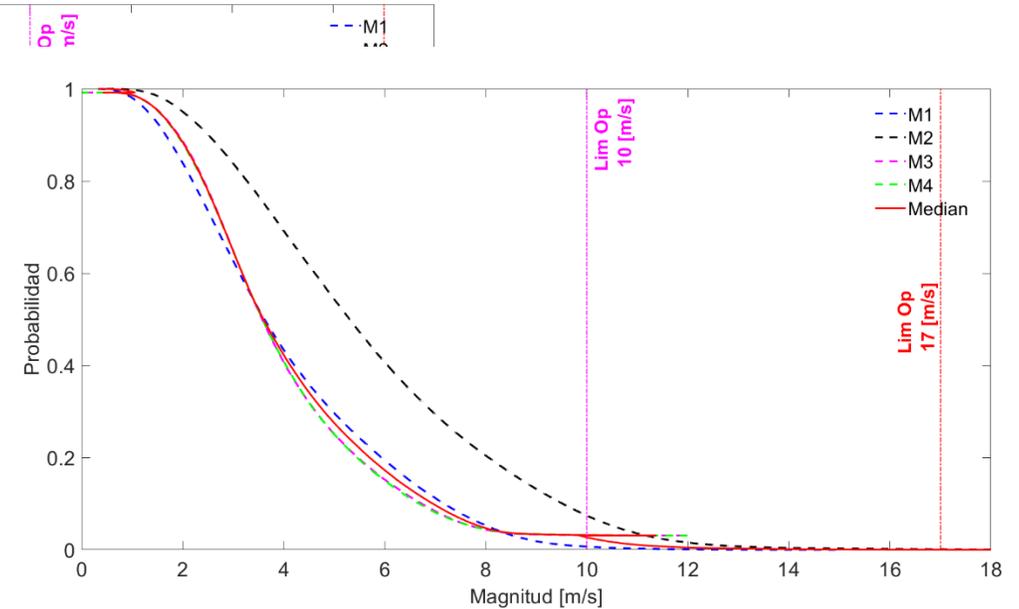
# RESULTADOS VIENTO



PERIODO  
HISTÓRICO



PROYECCIÓN  
MEDIADOS

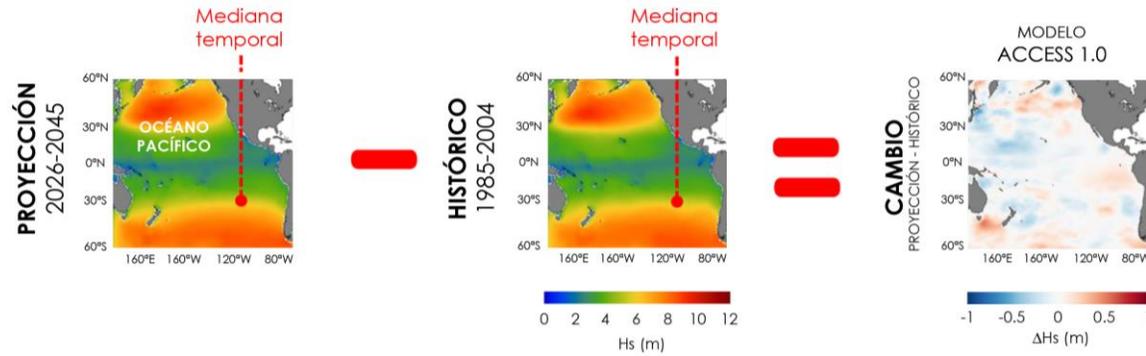


PROYECCIÓN A  
FIN DE SIGLO

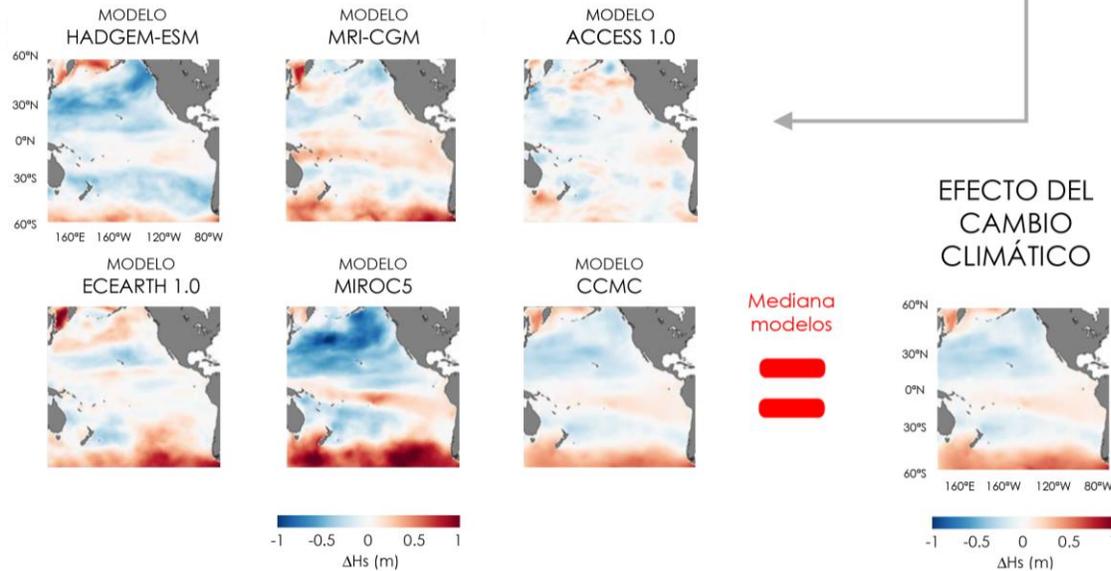
# DOWNTIME POR VIENTO

Velocidad de Viento umbral: 19 [nudos] ~ 10 [m/s]								
Modelo	Probabilidad de excedencia %			Downtime [hora/año]			Diferencia [hora/año]	
	1985-2004	2026-2045	2081-2100	1985-2004	2026-2045	2081-2100	Med-Hist	Fin-Hist
M1	1,39	1,22	0,65	121,82	106,49	57,00	-15,33	-64,82
M2	9,21	9,34	7,34	806,86	818,24	643,04	11,39	-163,81
M3	1,36	2,41	3,16	119,20	211,18	276,88	91,98	157,68
M4	1,30	2,29	3,16	113,94	200,66	276,88	86,72	162,94
<b>Mediana</b>	<b>1,36</b>	<b>2,38</b>	<b>3,16</b>	<b>119,20</b>	<b>208,55</b>	<b>276,88</b>	<b>89,35</b>	<b>157,68</b>

ANÁLISIS DE UN MODELO  
ejemplo: ACCESS 1.0

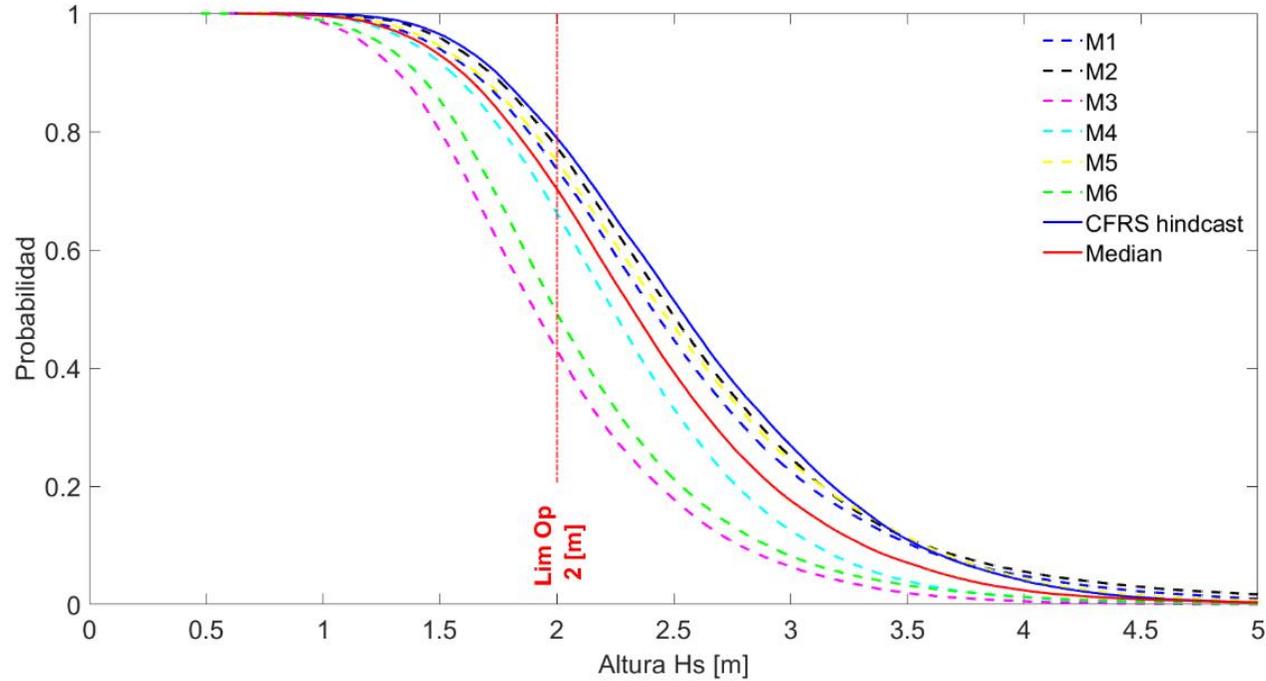


ANÁLISIS DE UN ENSAMBLAJE DE MODELOS



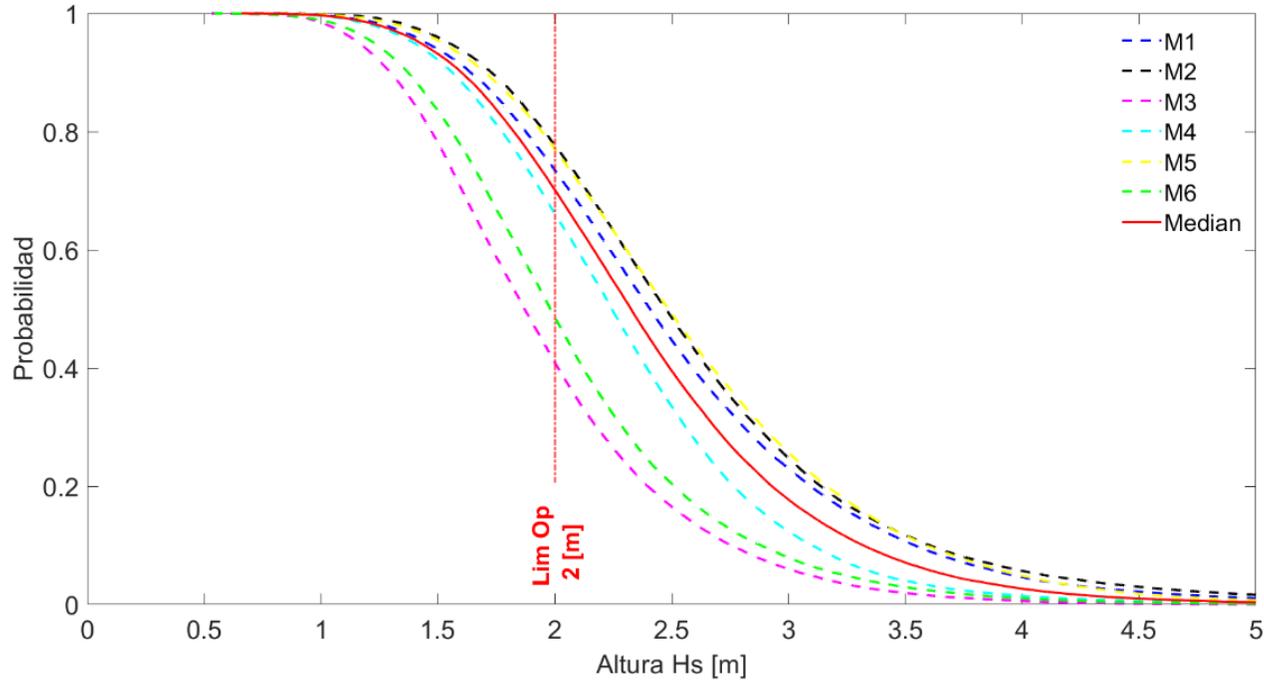
# RESULTADOS OLEAJE

# RESULTADOS OLEAJE



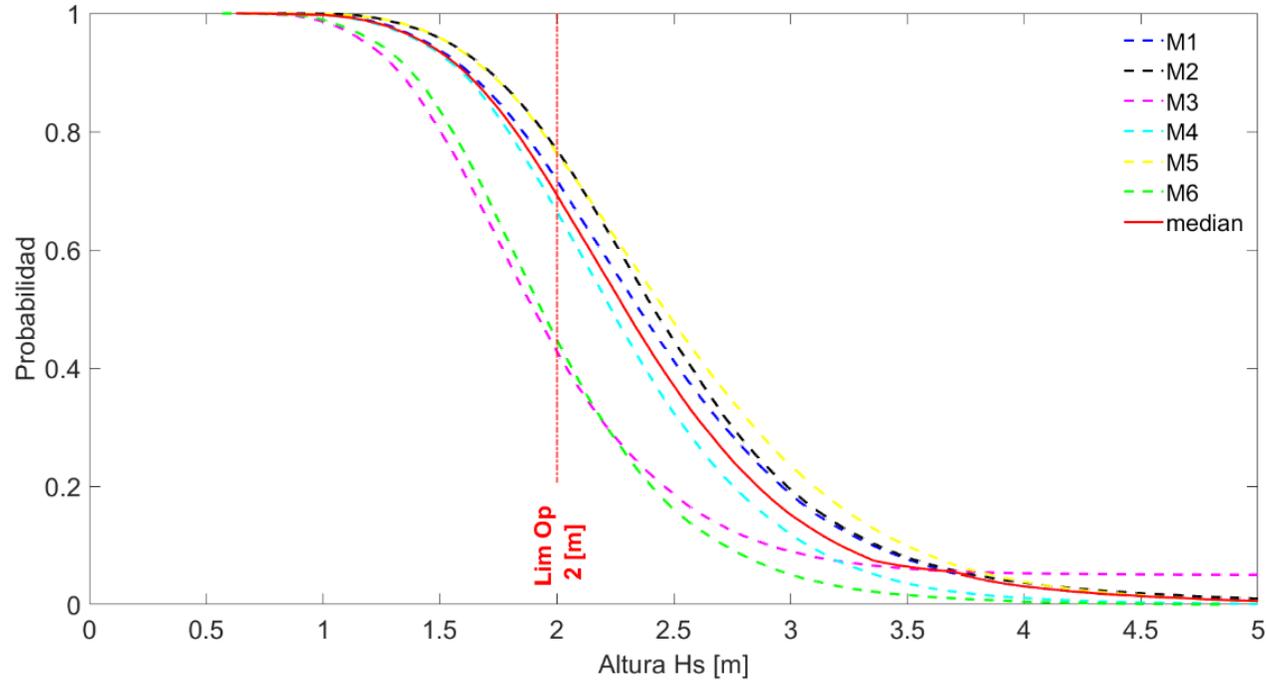
## PERIODO HISTÓRICO

# RESULTADOS OLEAJE



## PROYECCIÓN A MEDIADOS DE SIGLO

# RESULTADOS OLEAJE



## PROYECCIÓN A FIN DE SIGLO

# DOWNTIME POR OLEAJE

Modelo	Altura significativa umbral: 2 [m]							
	Probabilidad de excedencia %			Downtime [hora/año]			Diferencia [hora/año]	
	1985-2004	2026-2045	2081-2100	1985-2004	2026-2045	2081-2100	Med-Hist	Fin-Hist
M1	73,65	73,49	71,77	6451,80	6437,78	6287,11	-14,02	-164,69
M2	77,39	77,70	76,88	6779,42	6806,58	6734,75	27,16	-44,68
M3	43,05	40,93	42,84	3771,24	3585,53	3752,84	-185,71	-18,40
M4	66,21	66,11	66,45	5800,06	5791,30	5821,08	-8,76	21,02
M5	75,07	77,05	76,39	6576,19	6749,64	6691,82	173,45	115,63
M6	49,35	48,61	44,82	4323,12	4258,30	3926,29	-64,82	-396,83
CFRS Hindcast	78,93	-	-	6914,33	-	-	-	-
<b>Mediana</b>	<b>70,29</b>	<b>70,12</b>	<b>69,31</b>	<b>6157,46</b>	<b>6142,57</b>	<b>6071,62</b>	<b>-14,89</b>	<b>-85,85</b>

# CONCLUSIONES

Al estar expuesto al Océano Pacífico, el puerto de San Antonio sufre las consecuencias de las condiciones climatológicas, pues es uno de los puertos de Chile con más horas de cierre al año (Winckler et al., 2022).

En este estudio se buscó conocer las **condiciones de oleaje y viento operacional del puerto** con proyecciones que se basan en escenarios de cambio climático, para así tomar medidas a largo plazo para reducir las horas de cierre y mejorar la eficiencia del sistema portuario.

# CONCLUSIONES

## **Para el estudio de vientos**

- El GCM M2 (MPI-ESM1-2-LR) presentó las magnitudes de viento más intensas al largo de los 3 horizontes de evaluación. Los GCMs M3 (CMCC-CM2-SR5) y M4 (CMCC-ESM2) tenían un comportamiento similar, siendo siempre menores a la mediana de los modelos. El GCM M1 (MIROC6) era el modelo más cercano a la mediana.
- Se utilizan dos umbrales definidos por la Capitanía de Puerto y la ROM3.1-99. Los umbrales de la ROM son poco excedidos, pues es solo una recomendación para la operatividad de naves en los muelles, sin embargo, considera dos supuestos que el otro no, el sentido en la que se mueve la nave ya sea de manera transversal al puerto o longitudinal.

# CONCLUSIONES

## **Para el estudio de vientos**

- Los resultados expresan que, si se presenta un escenario similar al SSP5-8.5 a mediados de siglo el downtime operacional aumentaría en 8 horas al año. Y para fin de siglo disminuiría en 9 horas al año para un umbral de 10 [kn].
- Actualmente el puerto de San Antonio en el año 2022 contempló un 10,2% de excedencia del viento a 10 [kn] (Berrios F. , 2022), lo que equivale a 894 horas al año.

# CONCLUSIONES

## **Para el estudio de oleaje**

- Los GCMs M2 (MIROC5) y M5 (CCMC) son los que proyectan mayor altura de ola a lo largo de los tres horizontes de evaluación. Los GCMs M1 (MRI-CGM) y M4 (EC-EARTH) representan un comportamiento medio donde se asimilan a la mediana de los seis modelos. Los GCMs M3 (HADGEM2-ES) y M6 (ACCESS 1.0) son los de menor altura proyectada.
- El puerto de San Antonio logró aumentar el umbral de altura de olas en marzo del 2022, pasó de 1,8 [m] a 2 [m].

# CONCLUSIONES

## Para el estudio de oleaje

- Según los resultados obtenidos a mediados de siglo y a fin de siglo se espera que disminuya el *downtime* operacional respecto al periodo histórico, aun así, los porcentajes de excedencia siguen siendo significantes.

# CONCLUSIONES

- Los umbrales de operación están ligados a las condiciones que la Capitanía de Puerto encuentra segura para la ejecución de maniobras, sin embargo, para el viento solo considera umbrales para el tipo de nave y no por los grados de libertad que puede tener un buque en el muelle, existen diferentes recomendaciones que evalúan los movimientos de la nave, esto permite condiciones más específicas para la zona.
- Para el aumento del umbral de la altura de ola significativa, se debe realizar mediante estudios de maniobras, aun así, son rígidas bajo la Circular Marítima O-80/022 y esta no permite la transferencia de prácticos a las naves con altura de ola superiores a 2,5 [m].

*"Pese a los notables avances, contribuciones técnicas y científicas, así como evaluaciones en los procesos de diseño y construcción, el ingeniero marítimo, mirando al mar debe ser prudente, consiente y sensible de su limitado saber y de la ignorancia que todavía se envuelve" – Vicente Negro*

**¡GRACIAS!**