



UNIVERSIDAD PERUANA  
**CAYETANO HEREDIA**  
ESCUELA DE POSGRADO

# Variabilidad de alta frecuencia del viento en el sistema de afloramiento peruano bajo escenarios de cambio climático (CMIP6)

Victor Camarena

Asesor: Dr. Adolfo Chamorro

Coasesor: Dr. Jorge Tam

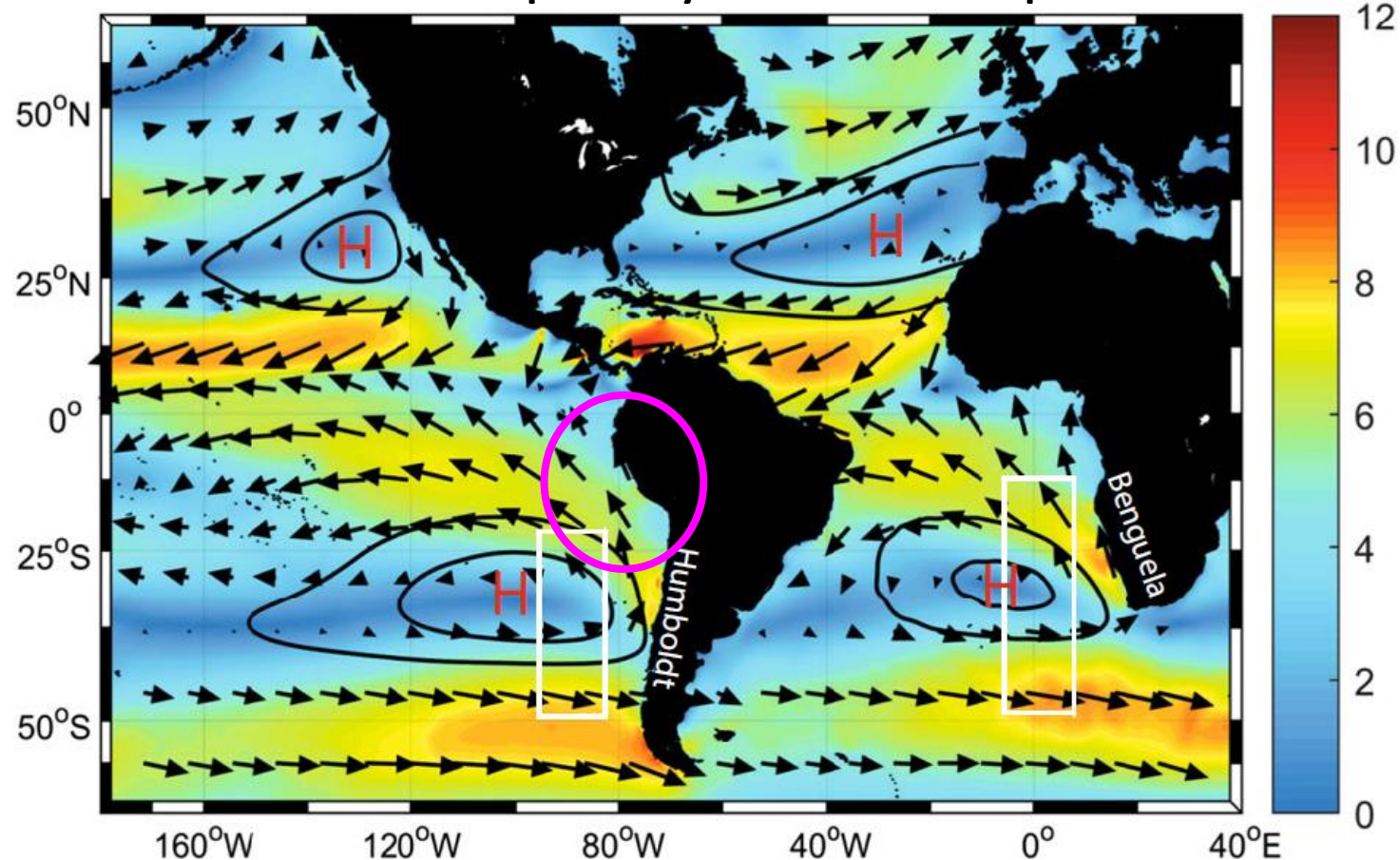


# Contenido

- 1. El viento en el sistema de afloramiento peruano**
- 2. Objetivos de la tesis**
- 3. Metodología: métodos de análisis de datos de viento de modelos CMIP6**
- 4. Resultados: el viento superficial en el sistema de afloramiento peruano desde modelos CMIP6**
  - 4.1 Validación y selección de datos de modelos
  - 4.2 Viento en periodo histórico
  - 4.3 Viento en el futuro bajo de cambio climático
  - 4.4 Eventos de viento débil y viento fuerte
- 5. Discusión:**
  - 5.1 Sensibilidad de los análisis de variabilidad interdiaria a los indicadores de definición de viento fuerte/débil
  - 5.2 Sobre la implicancia del uso de un umbral fijo versus un umbral climatológico en la identificación de eventos de viento débil y fuerte
  - 5.3 Mecanismos que controlan el cambio en la variabilidad interdiaria el viento
- 6. Conclusiones**
- 7. Perspectivas**

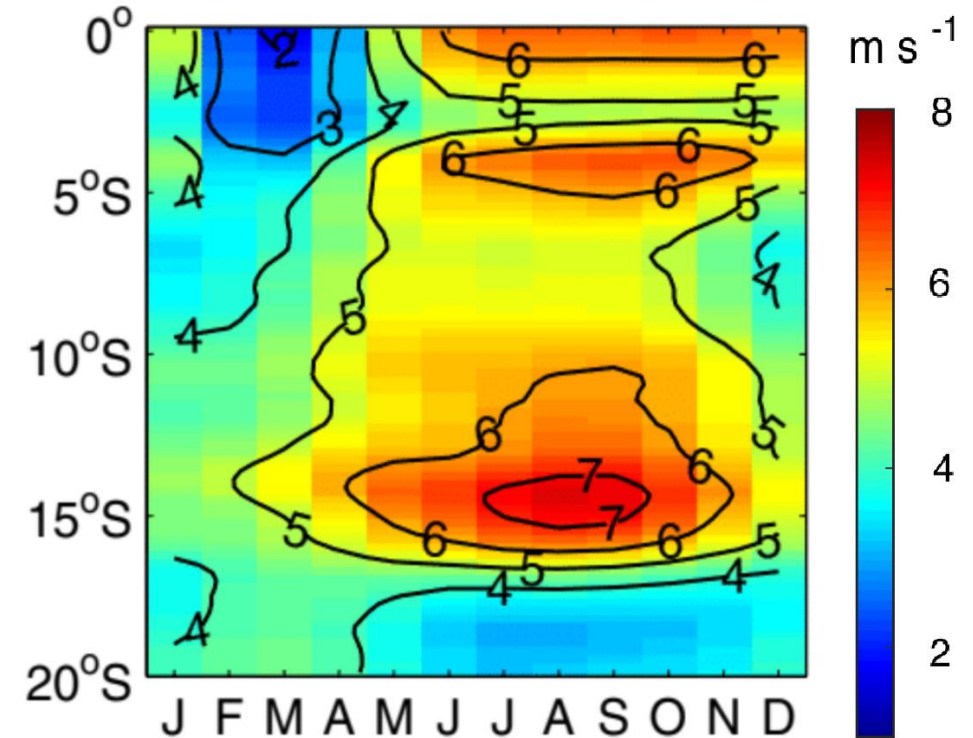
# 1. Introducción: Viento superficial en el sistema de afloramiento peruano

Viento en superficie y sistemas de alta presión



Aguirre et al. (2019)

QUICKSCAT



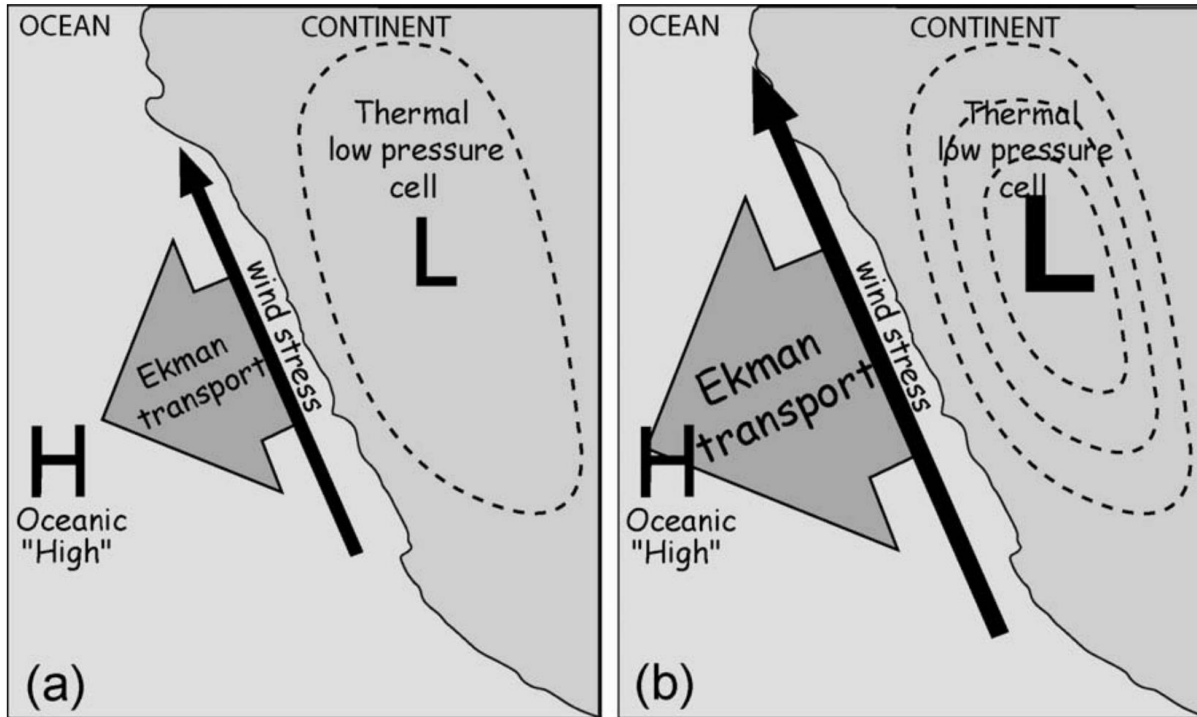
Chamorro et al. (2018)

- Viento hacia el Ecuador, paralelo a la línea de costa

- Patrón latitudinal, estacionalidad

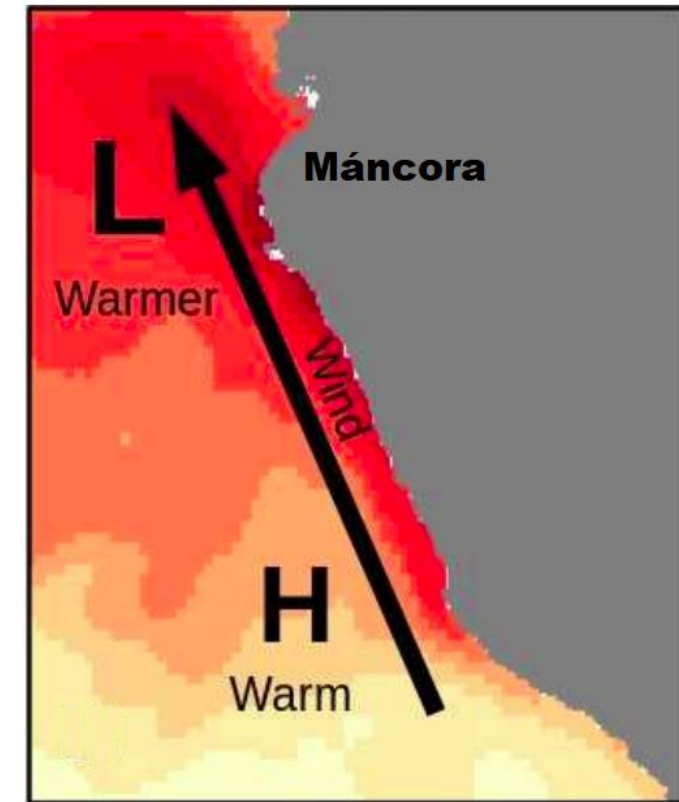
# 1. Introducción: Mecanismos locales que controlan el cambio en la variabilidad del viento

Hipótesis de Bakun



Bakun et al. (2008)

Gradiente N-S de la TSM



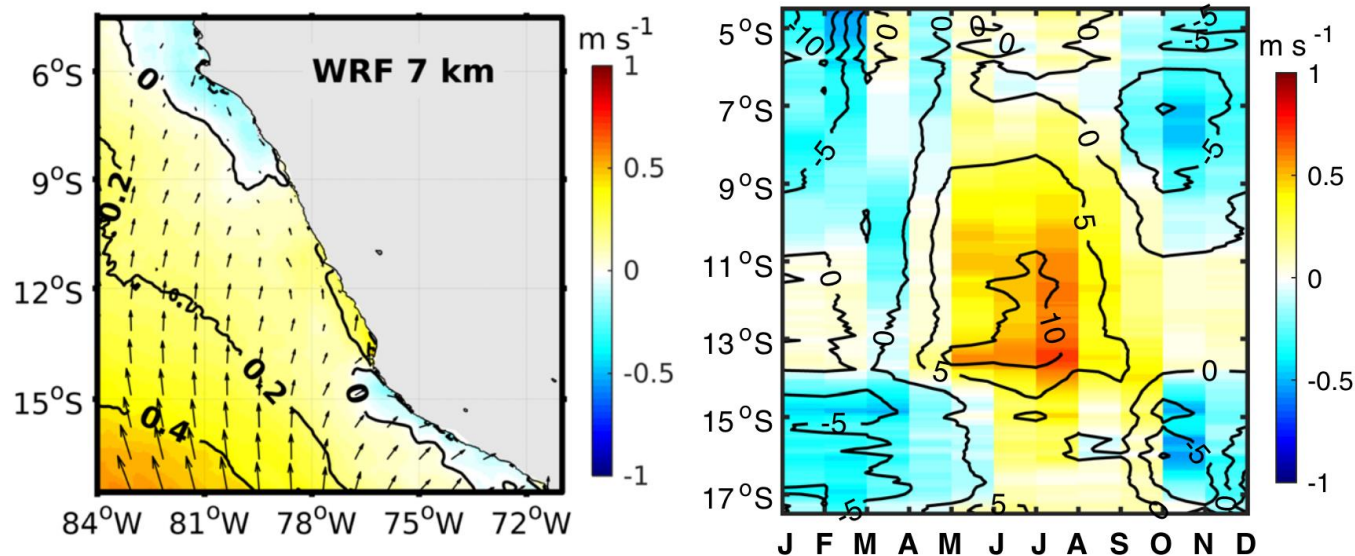
Chamorro et al. (2018)



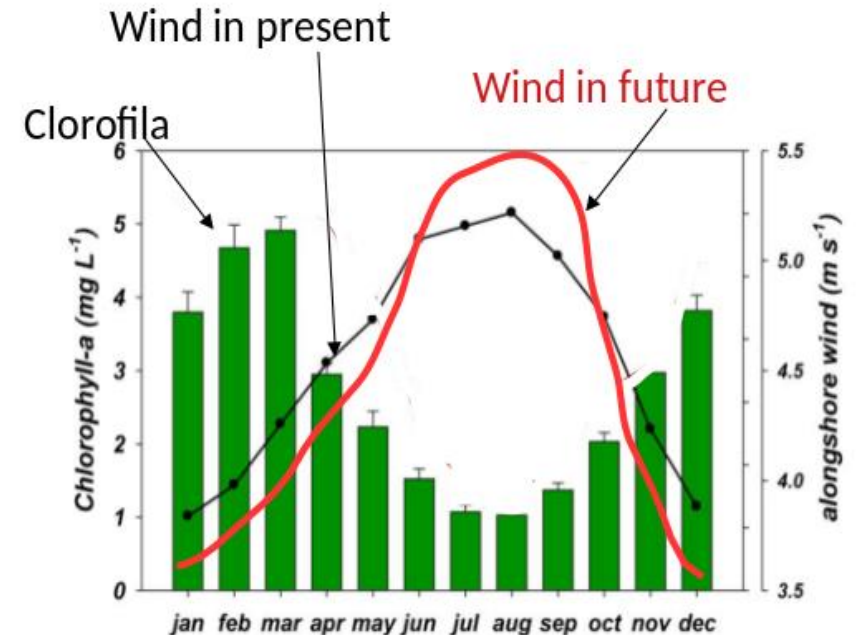
# 1. Introducción: Proyección del viento superficial bajo cambio climático

Reference	Resolution	Period		Wind response		
		Present	Future	Mean	Winter	Summer
Bakun (1990)				↑		
Rykaczewski et al. (2015)	100 km	1861-1890	2071-2100		↑	↓
Goubanova et al. (2011)	50 km	1970-1999	2100-2140	↓	→	↓
Belmadani et al. (2014)	50 km	1970-1990	2079-2099	↓	↓	↓
Chamorro et al. (2021)	7 km	1994-2003	2086-2095	→	↑	↓

## Intensidad y cambio en el viento bajo un escenario pesimista



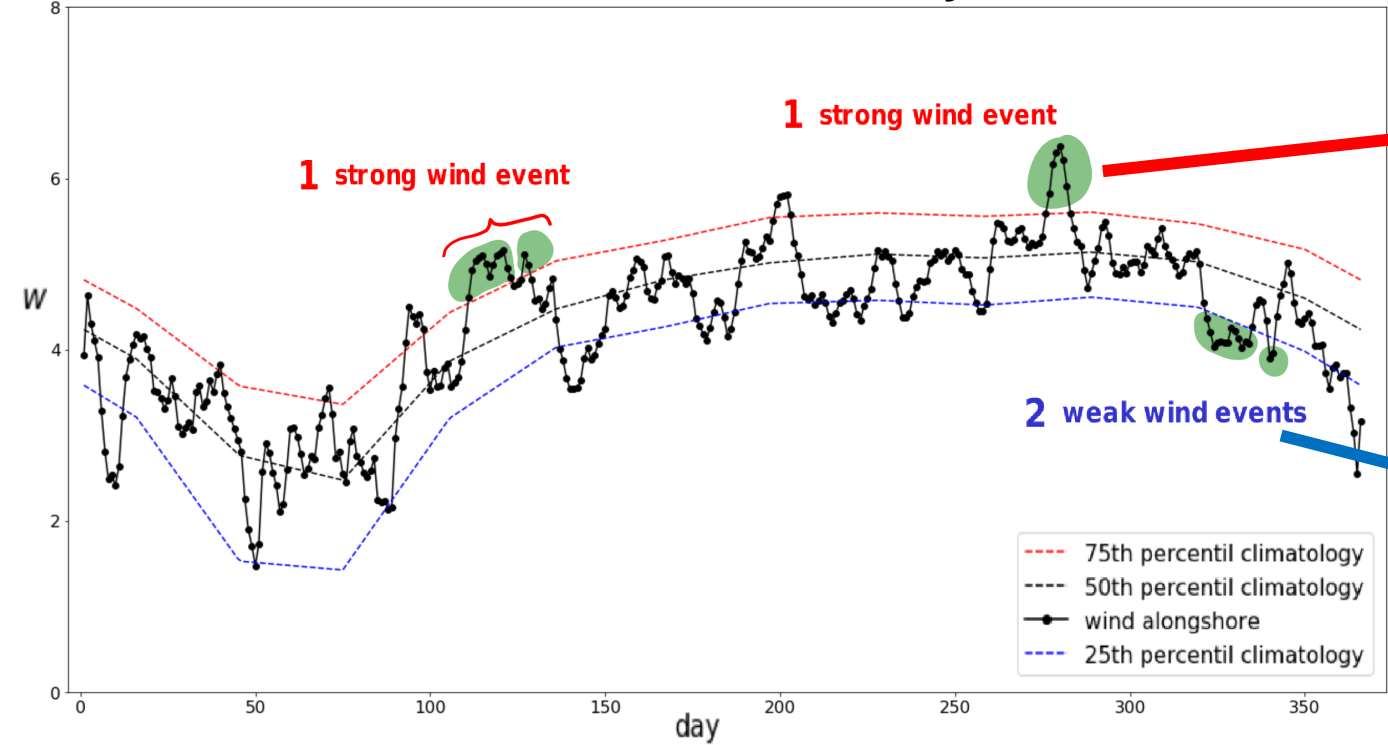
Chamorro et al. (2021)



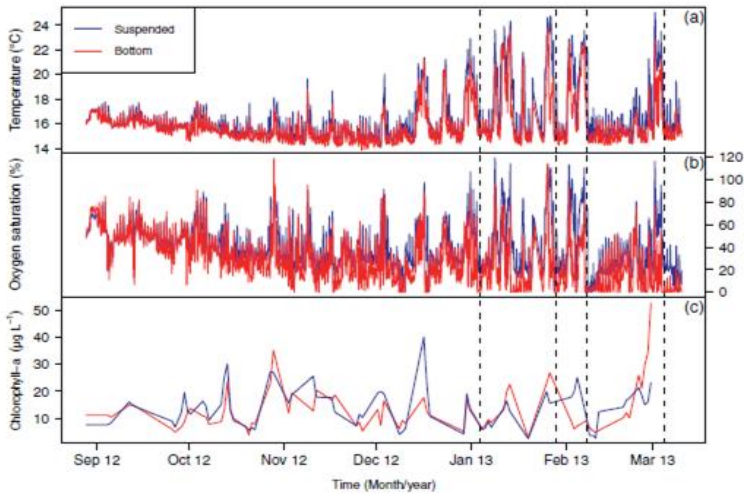
Gutierrez et al. (2011)

# 1. Introducción: Importancia de la variabilidad de alta frecuencia del viento

Eventos de viento fuerte y débil

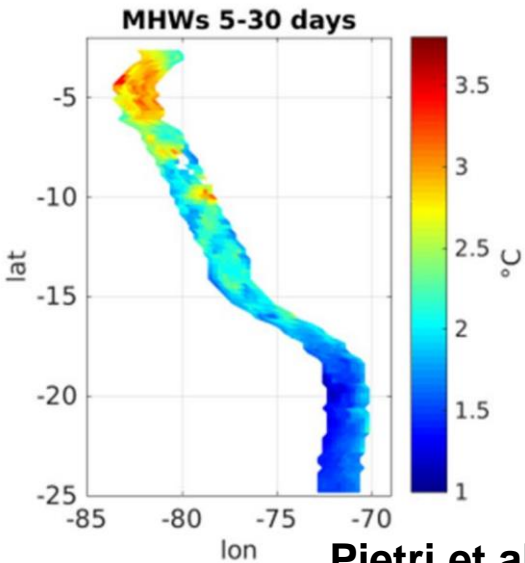


Eventos de hipoxia



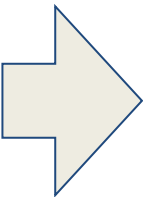
(Aguirre et al. 2018)

Olas de calor marinas

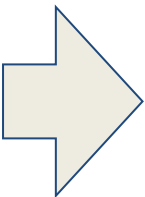


Pietri et al. (2021)

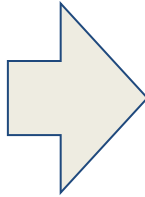
Evento de  
viento fuerte  
(débil)



Intensificación  
(debilitamiento)  
del afloramiento



Enfriamiento  
(calentamiento)  
del mar



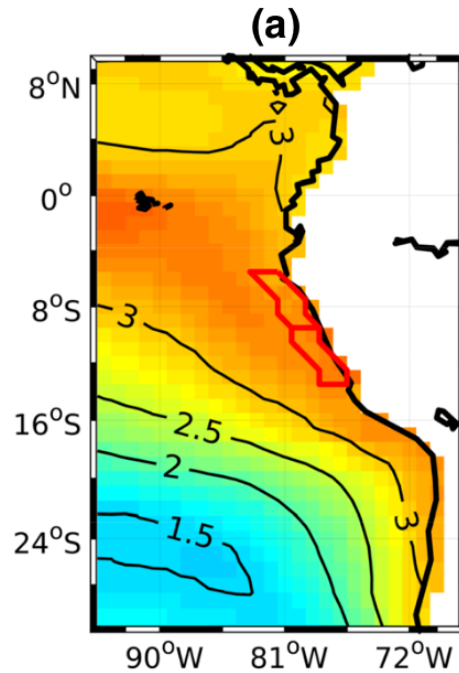
# 1. Introducción: Objetivos

**Objetivo general:** Analizar la variabilidad interdiaria del viento superficial frente a la costa peruana, bajo escenarios de cambio climático pesimista/optimista para fines de siglo XXI, usando datos recientes de modelos climáticos CMIP6.

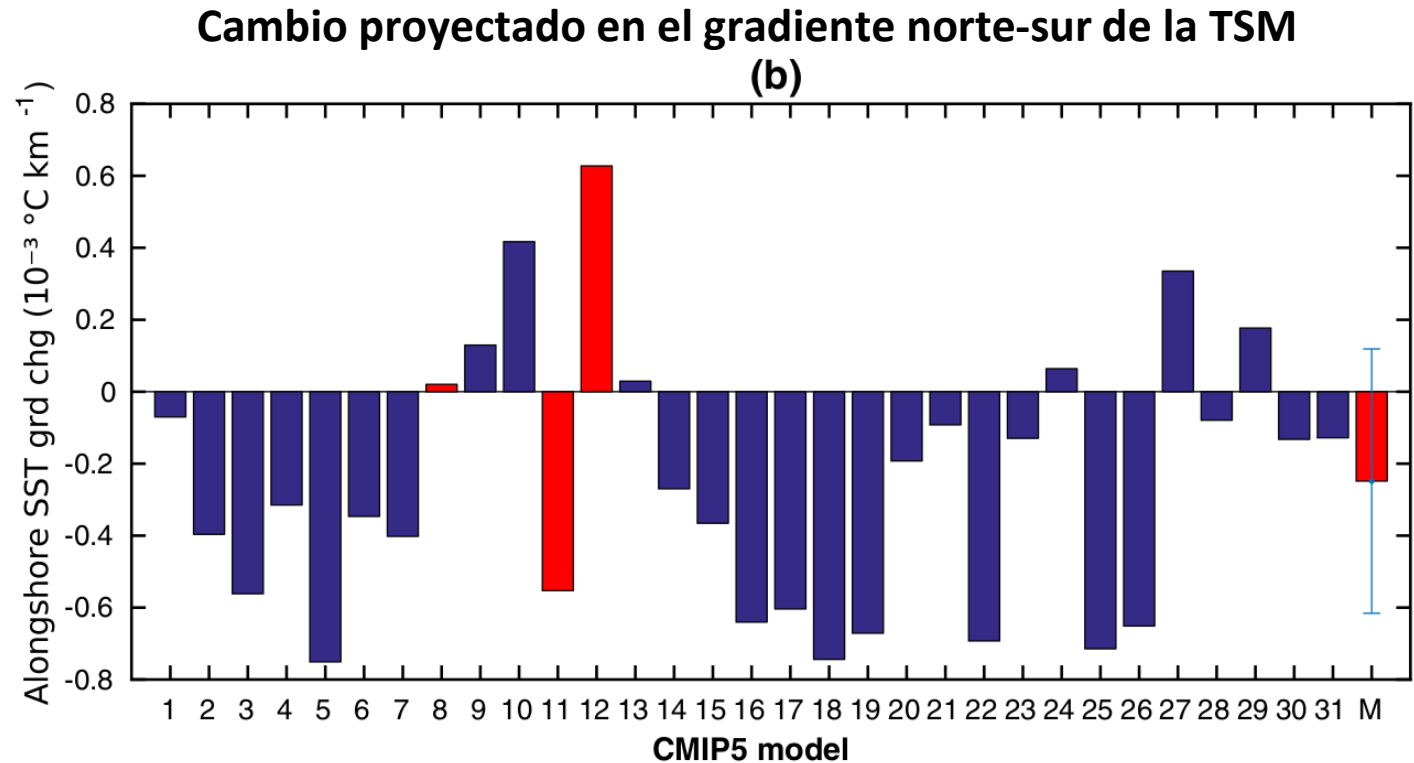
## **Objetivos específicos:**

1. Validar los datos y seleccionar los modelos CMIP6 según su rendimiento climático.
2. Caracterizar la variabilidad interdiaria del viento superficial en el periodo histórico.
3. Caracterizar y evaluar el cambio, de la variabilidad del viento superficial en el periodo futuro bajo escenarios de cambio climático.
4. Identificar y caracterizar los eventos de viento débil y fuerte frente a la costa peruana, tanto en el periodo histórico como en el periodo futuro.

# 1. Introducción: Hipótesis



Chamorro et al. (2021)



**Hipótesis:** Si, bajo un escenario pesimista de cambio climático, se debilitan los gradientes norte-sur de presión atmosférica y de temperatura superficial del mar a lo largo de la costa peruana, entonces, la distribución de frecuencia del viento favorable al afloramiento presentará un desplazamiento hacia vientos de menor intensidad, aumentando (disminuyendo) los días de viento débil (fuerte).



### 3. Metodología: región y variables de estudio

#### Región de estudio:

- 5°N - 25°S
- 100°O - 65°O
- ~200 km mar adentro

#### Variables estudio:

- Viento superficial
- Presión superficial
- Temperatura superficial

#### Frecuencia temporal:

Datos diarios

#### Periodo de estudio:

Histórico/Presente: 1990-2010

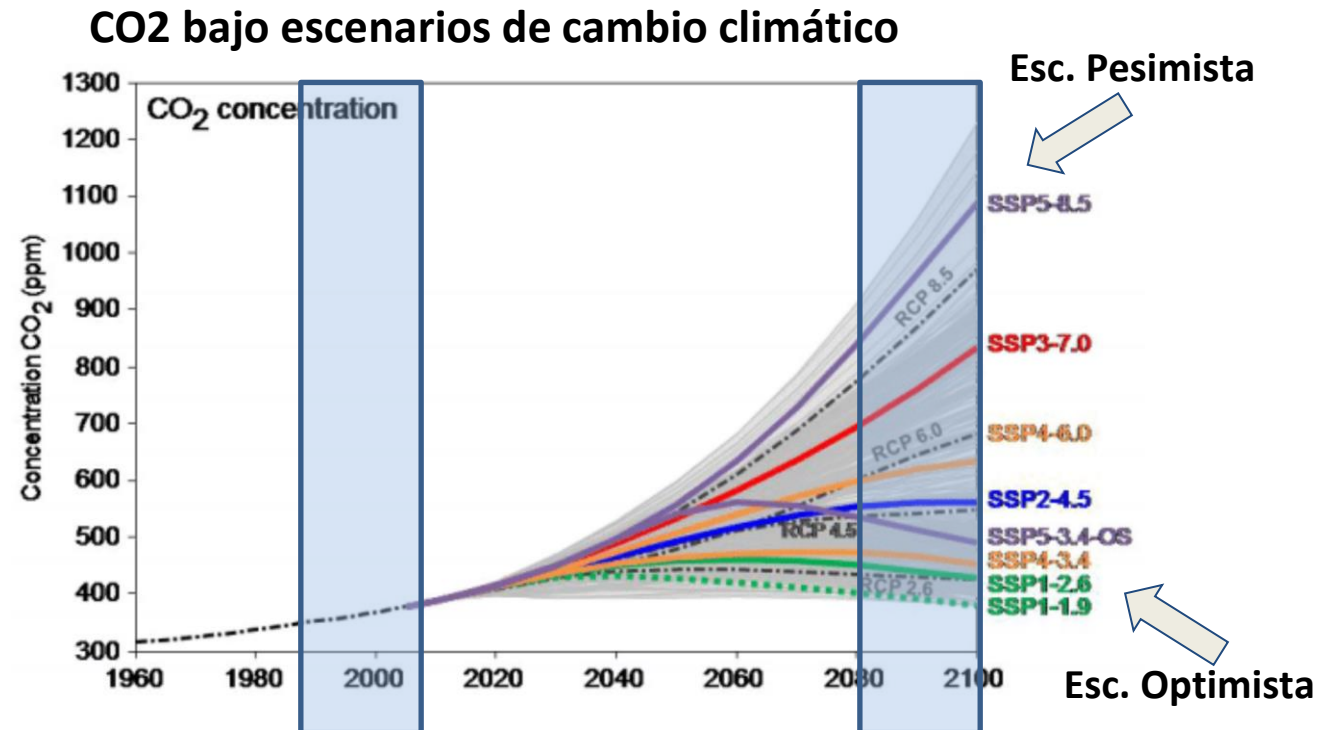
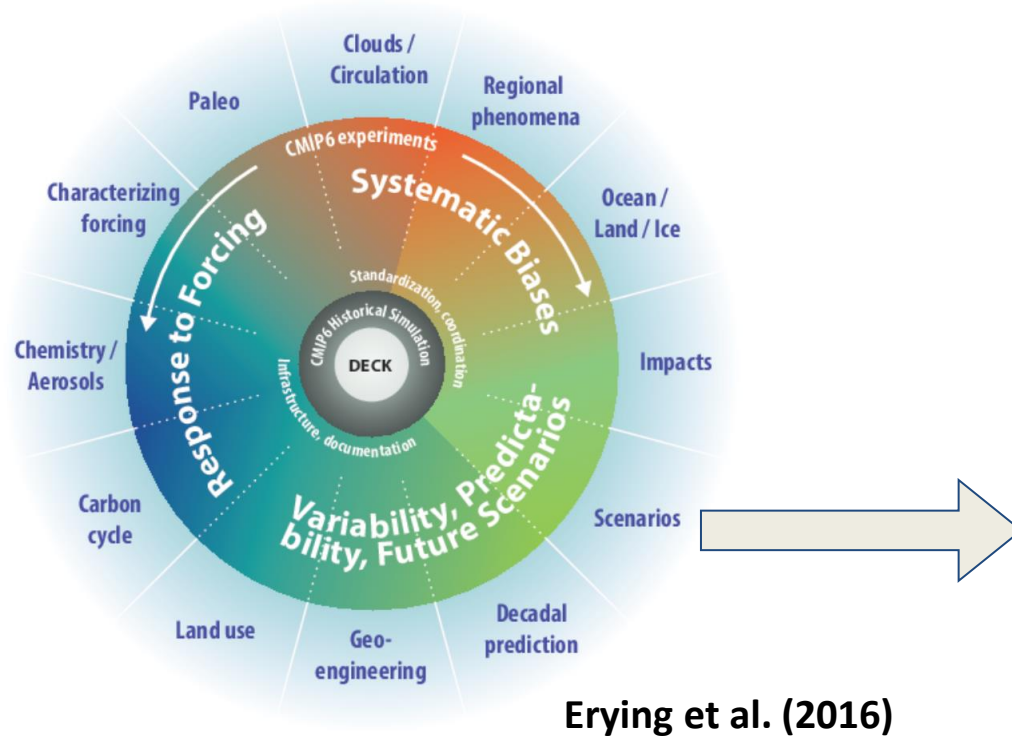
Futuro: 2080-2100

Google maps



# 1. Metodología: Fuentes de datos

Nombre	Características	Resolución (km)	Periodo histórico	Periodo futuro	Propósitos
CFSR (reanálisis)	Reanálisis de alta resolución espacial y temporal	~50	1990-2010		Variabilidad y validación
CMIP6 (19 modelos AOGCM)	Simulaciones globales en el periodo histórico	~100	1990-2010		Variabilidad y validación
	Proyecciones globales bajo escenarios de cambio climático	~100		2080-2100	Variabilidad y proyección



# 3. Metodología: Evaluación de modelos y caracterización del viento diario

Índice de habilidad  
climática

$$e_{f,m} = \frac{E_{f,m} - \bar{E}_f}{\bar{E}_f}$$

$$e_m = \frac{1}{n_f} \sum_f e_{f,m}$$

Índice de variabilidad  
del modelo

$$v_{f,m} = \frac{\frac{1}{n_x n_y T} \sum_{i,j,t} (f_{i,j,t}^m - \bar{f}_{i,j,t}^m)^2}{\frac{1}{n_x n_y T} \sum_{i,j,t} (f_{i,j,t}^0 - \bar{f}_{i,j,t}^0)^2}$$

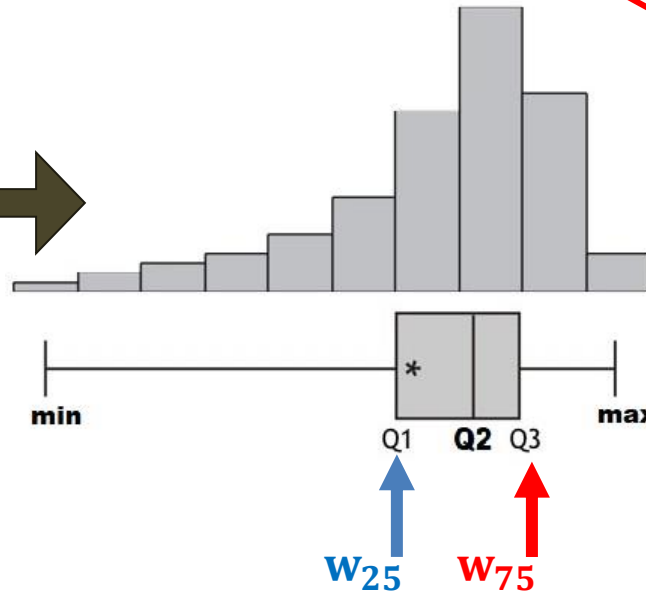
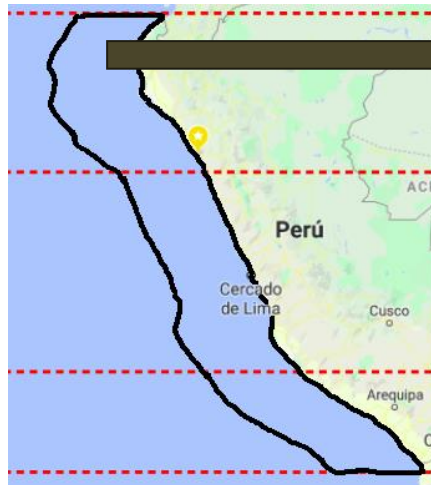
$$v_m = \sum_f \left( \sqrt{v_{f,m}} - \frac{1}{\sqrt{v_{f,m}}} \right)^2$$

Gleckler et al. (2008)

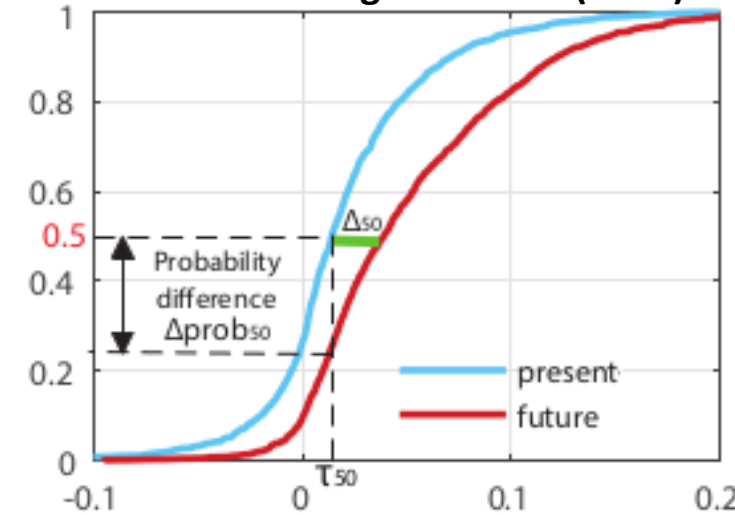
- Estadísticas del viento diario: medio, débil, fuerte
- Perfil latitudinal del viento a lo largo de la costa peruana

2. Análisis del viento en el periodo histórico

1. Validación y selección de modelos



Aguirre et al. (2019)



3. Análisis del viento en el futuro bajo escenarios de CC

- Cambio en la intensidad del viento
- Cambio en la probabilidad de ocurrencia

### 3. Metodología: Eventos de viento débil y fuerte



- Definición de eventos: umbrales, interrupciones
- Estadísticas de eventos: frecuencia, duración, intensidad

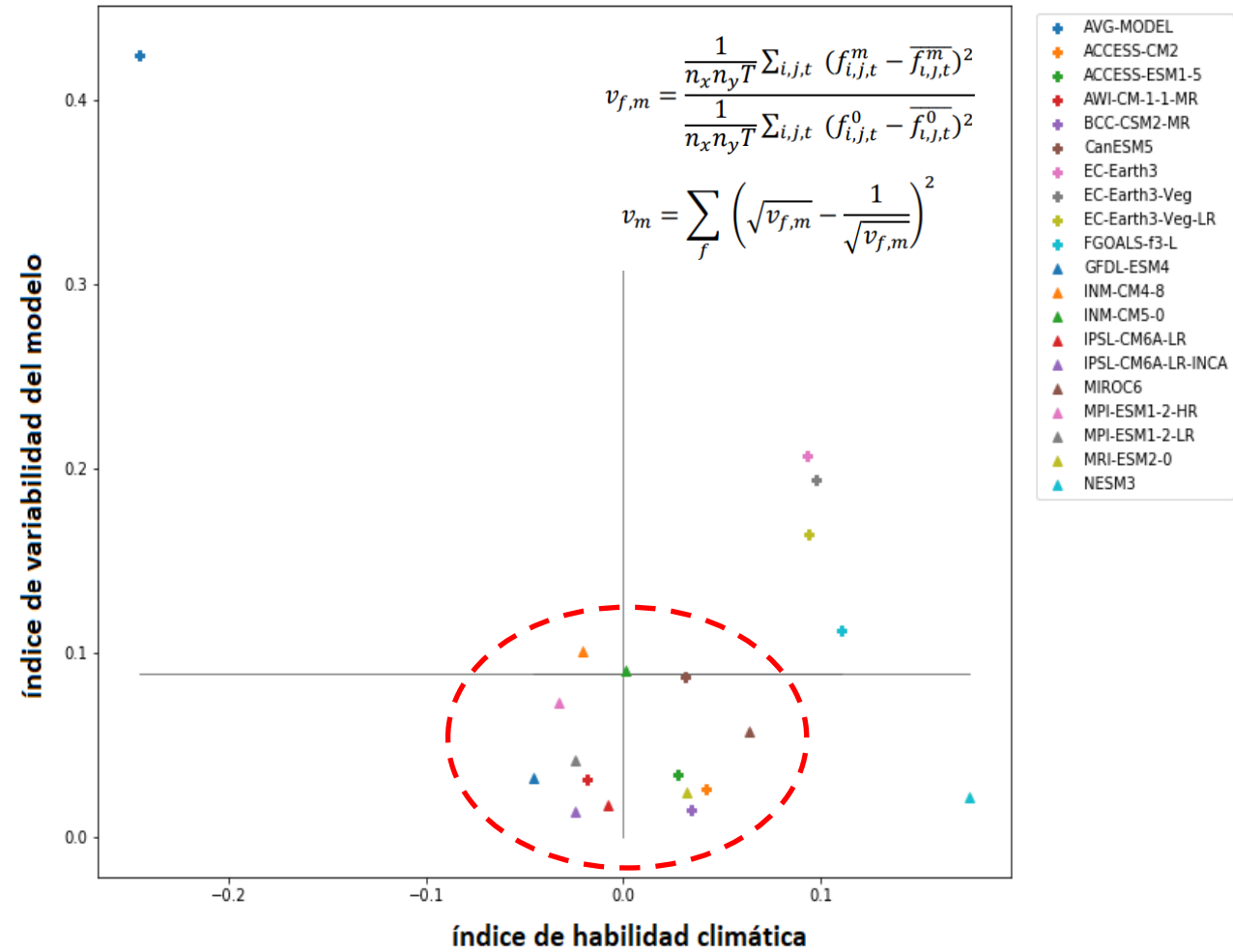
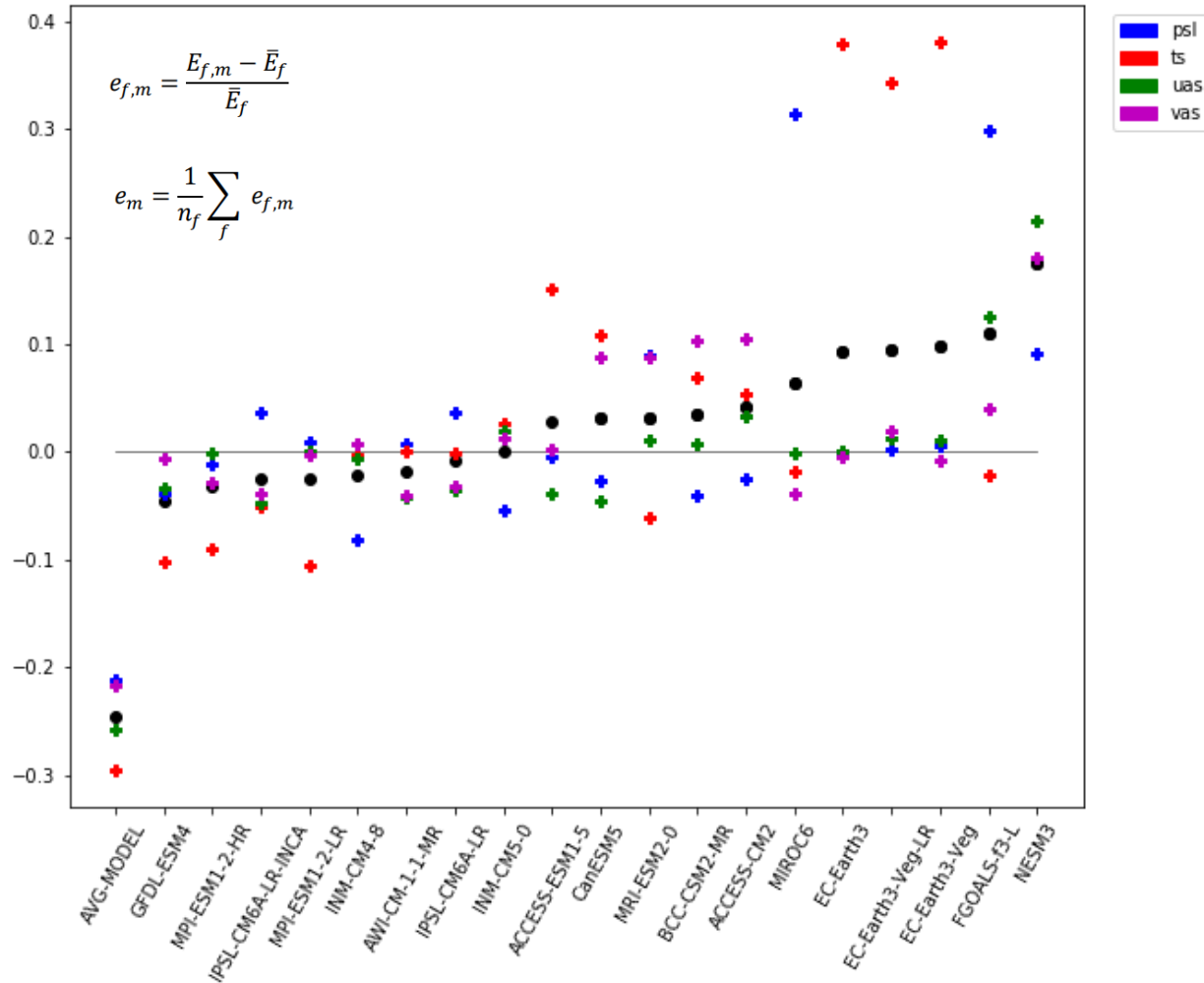
$$n = \frac{\# \text{ events}}{\# \text{ years}}$$

$$\bar{D} = \frac{\sum_i \text{duration}_i}{\# \text{ events}}$$

$$\bar{I} = \frac{\sum_i \text{intensity}_i}{\# \text{ events}}$$

## 4. Resultados: Validación de datos y selección de modelos CMIP6

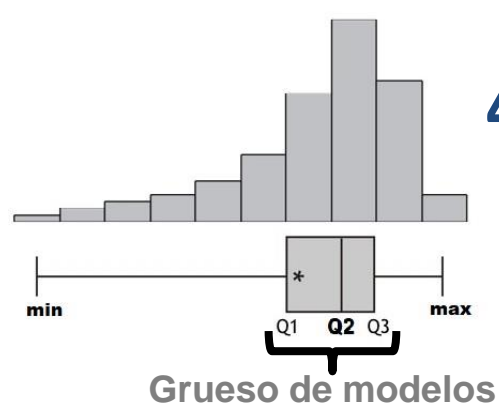
Índice de habilidad climática



- Se seleccionaron 14 de 19 modelos



## 4. Resultados: Viento a lo largo de la costa en el periodo histórico

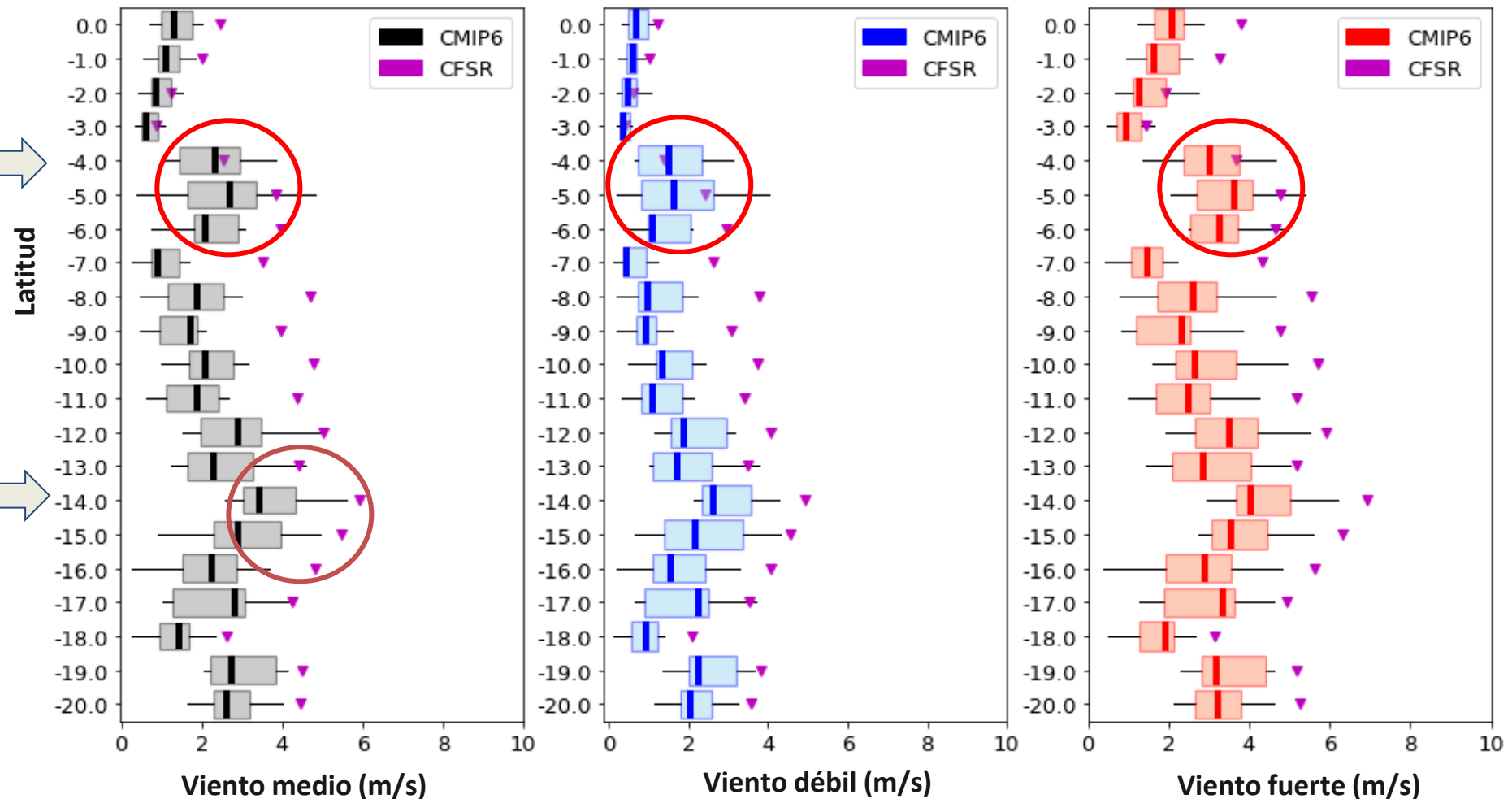


Jet costero  
norte

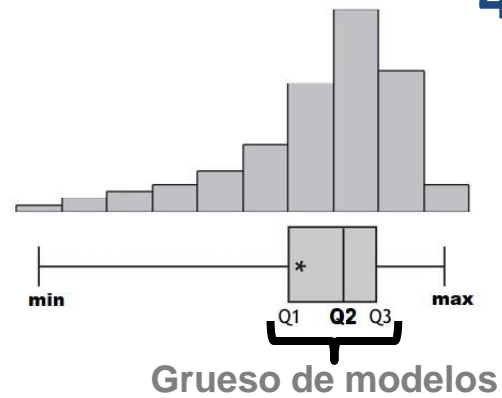
Jet costero  
centro-sur

- El viento medio (débil, fuerte) tiene una variación latitudinal marcada con máximos locales, aunque su intensidad es subestimada

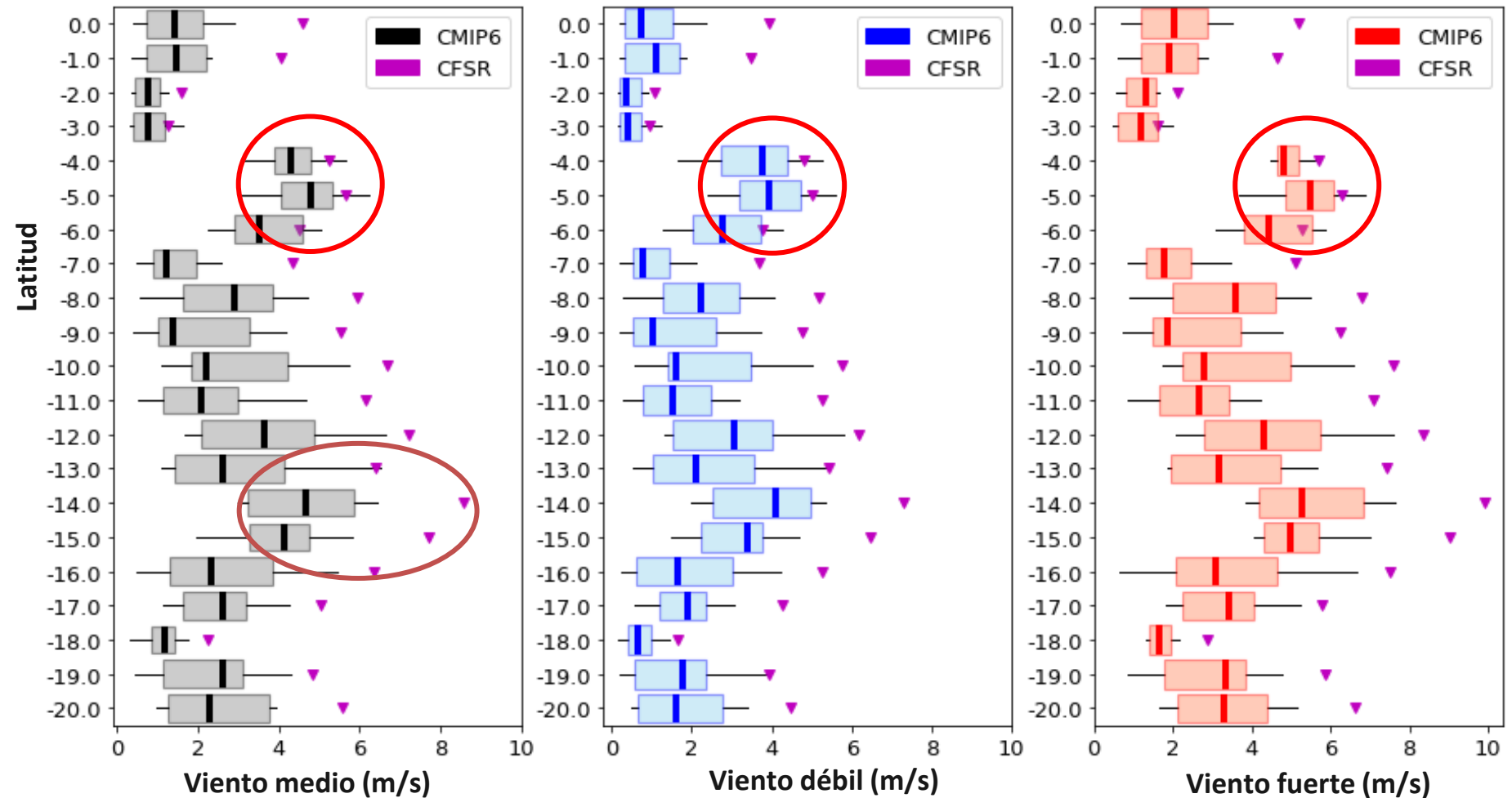
Intensidad del viento diario a lo largo de la costa en **verano**



## 4. Resultados: Viento a lo largo de la costa en el periodo histórico

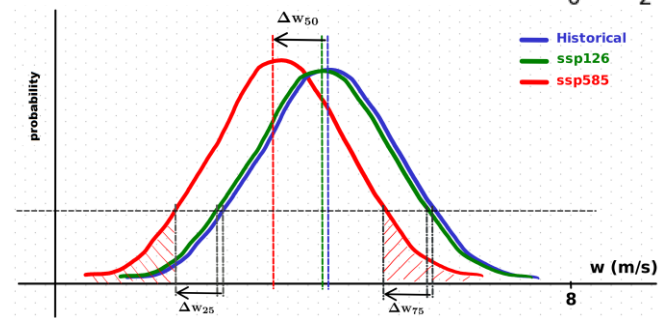
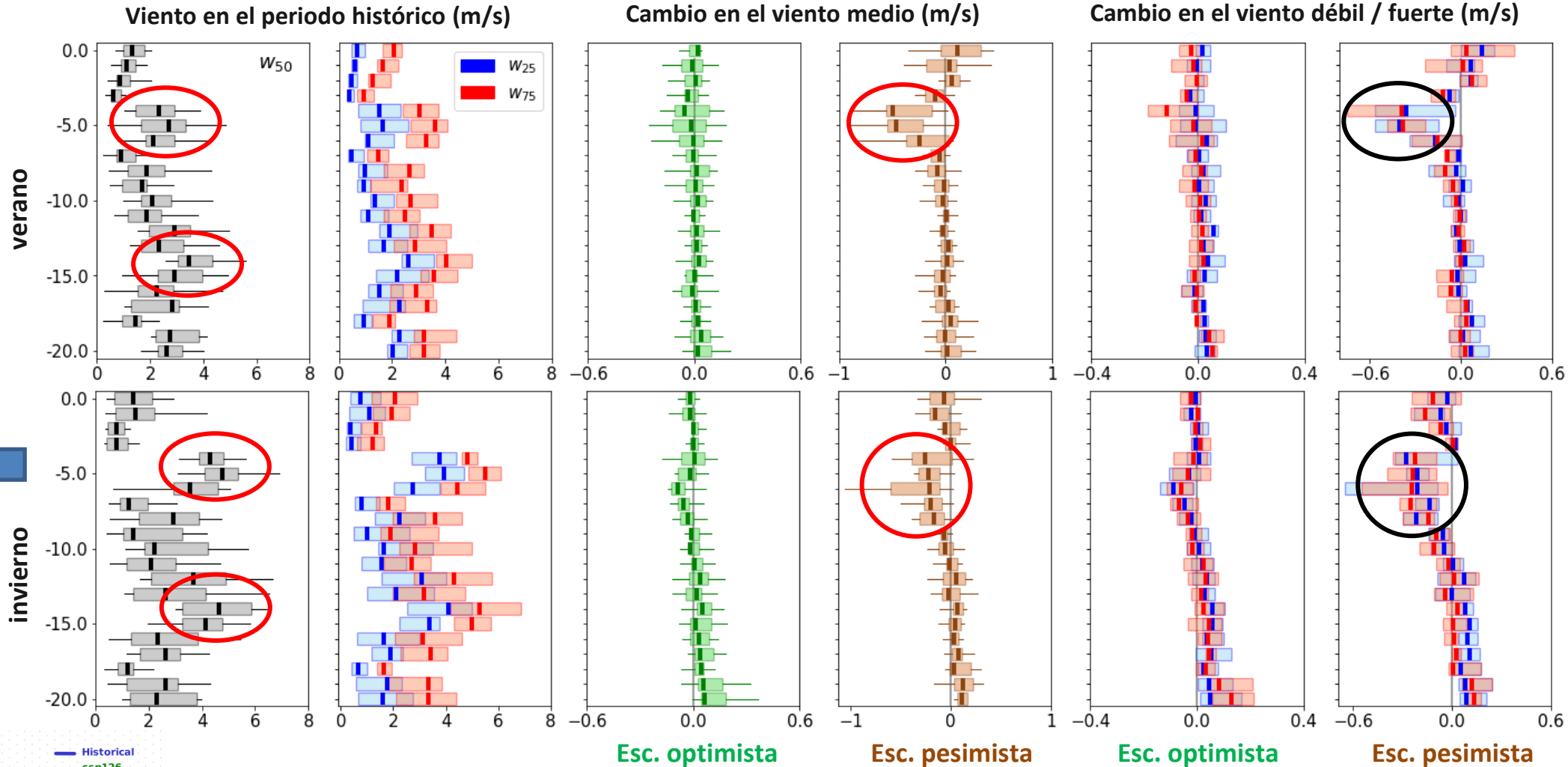
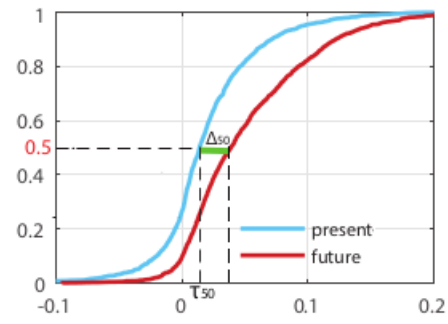


Intensidad del viento diario a lo largo de la costa en **invierno**



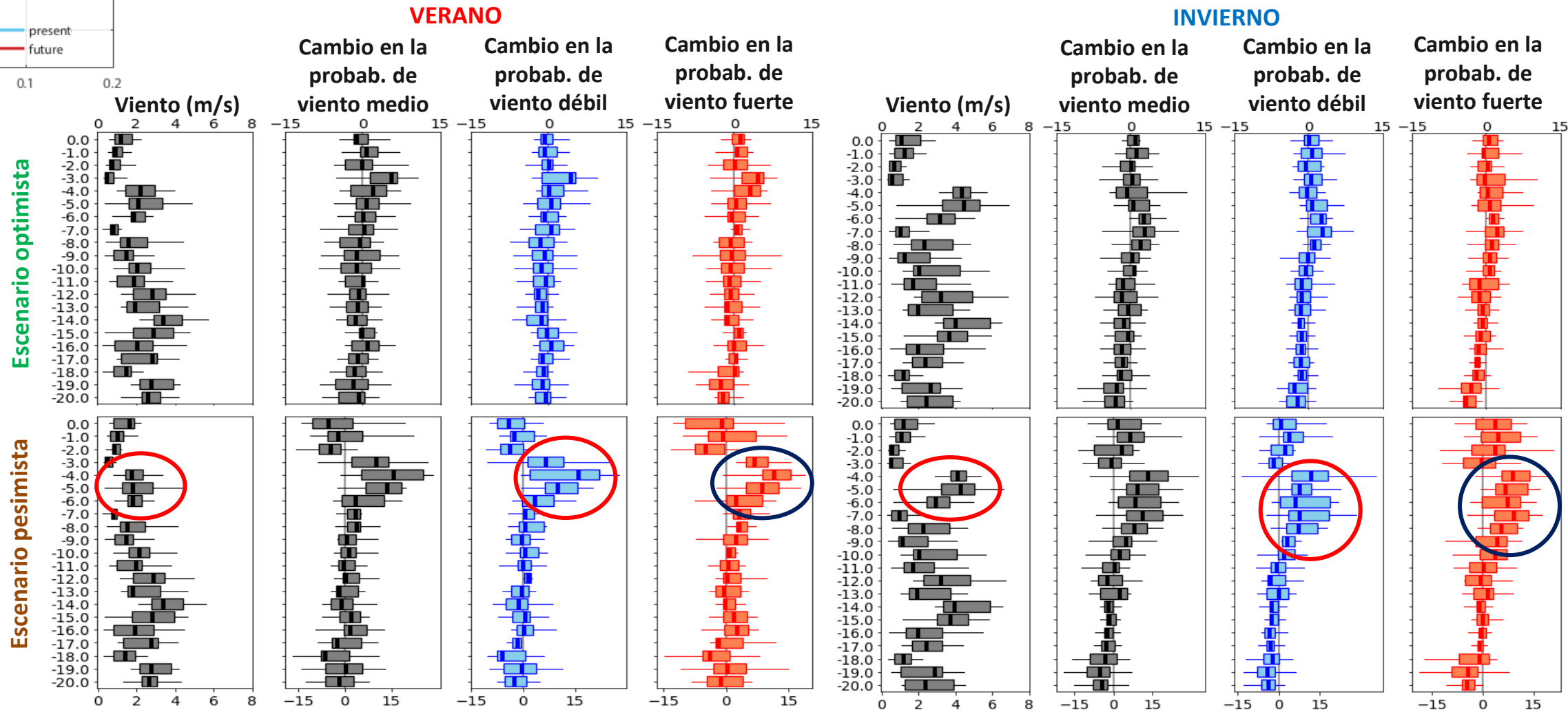
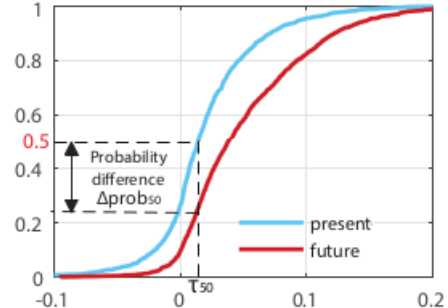
- El viento medio (débil, fuerte) tiene una estacionalidad marcada mayor intensidad en invierno

## 4. Resultados: Viento a lo largo de la costa bajo escenarios de CC



- Para fines de siglo XXI, bajo un escenario pesimista, se proyectan una disminución en la intensidad de viento medio, viento débil y viento fuerte.

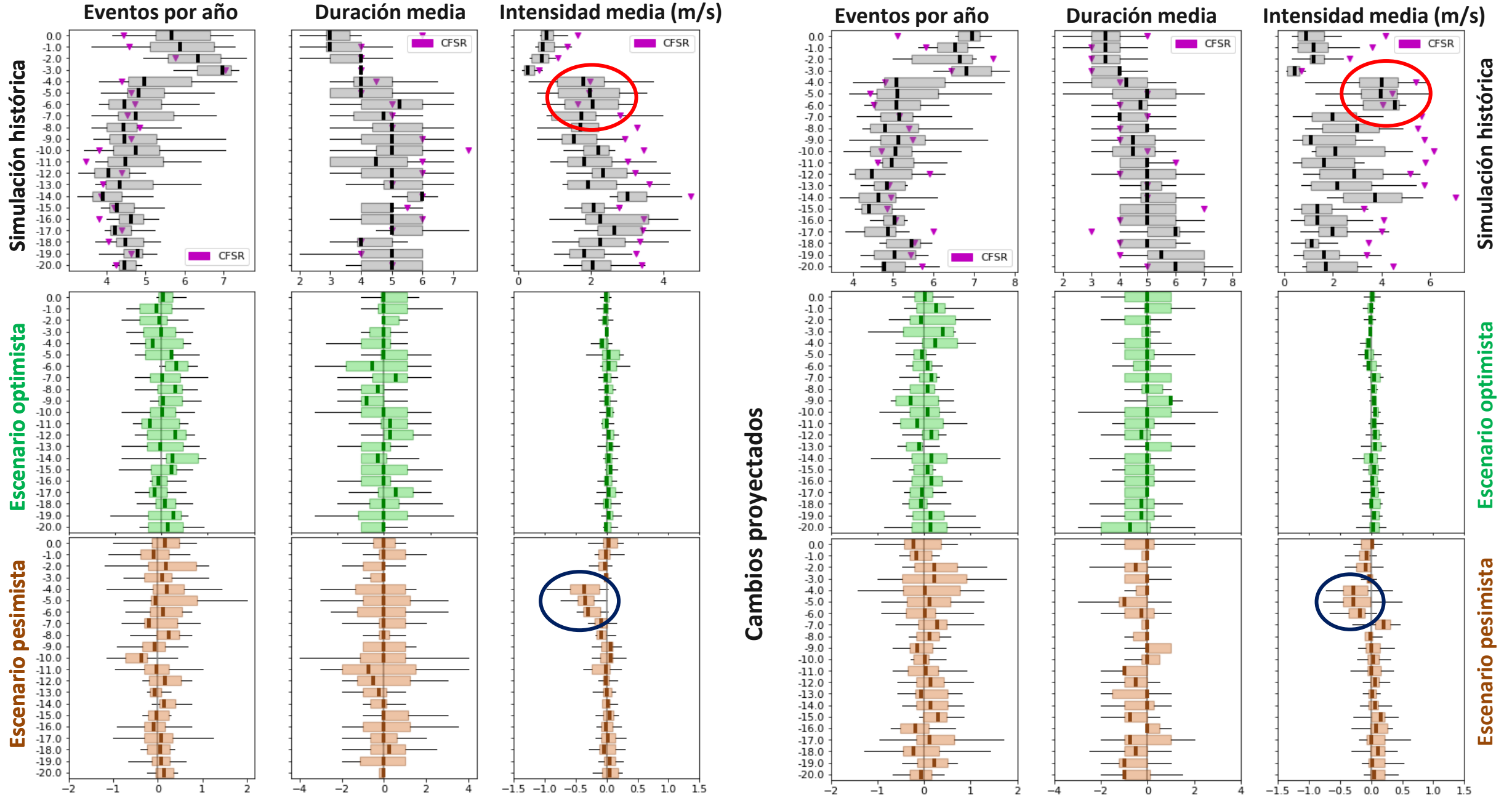
## 4. Resultados: Viento a lo largo de la costa bajo escenarios de CC



Cambio en la probabilidad de ocurrencia diaria		
	Viento débil	Viento fuerte
Verano	↑ (5-20)%	↓ (10-15)%
Invierno	↑ (5-21)%	↓ (5-10)%

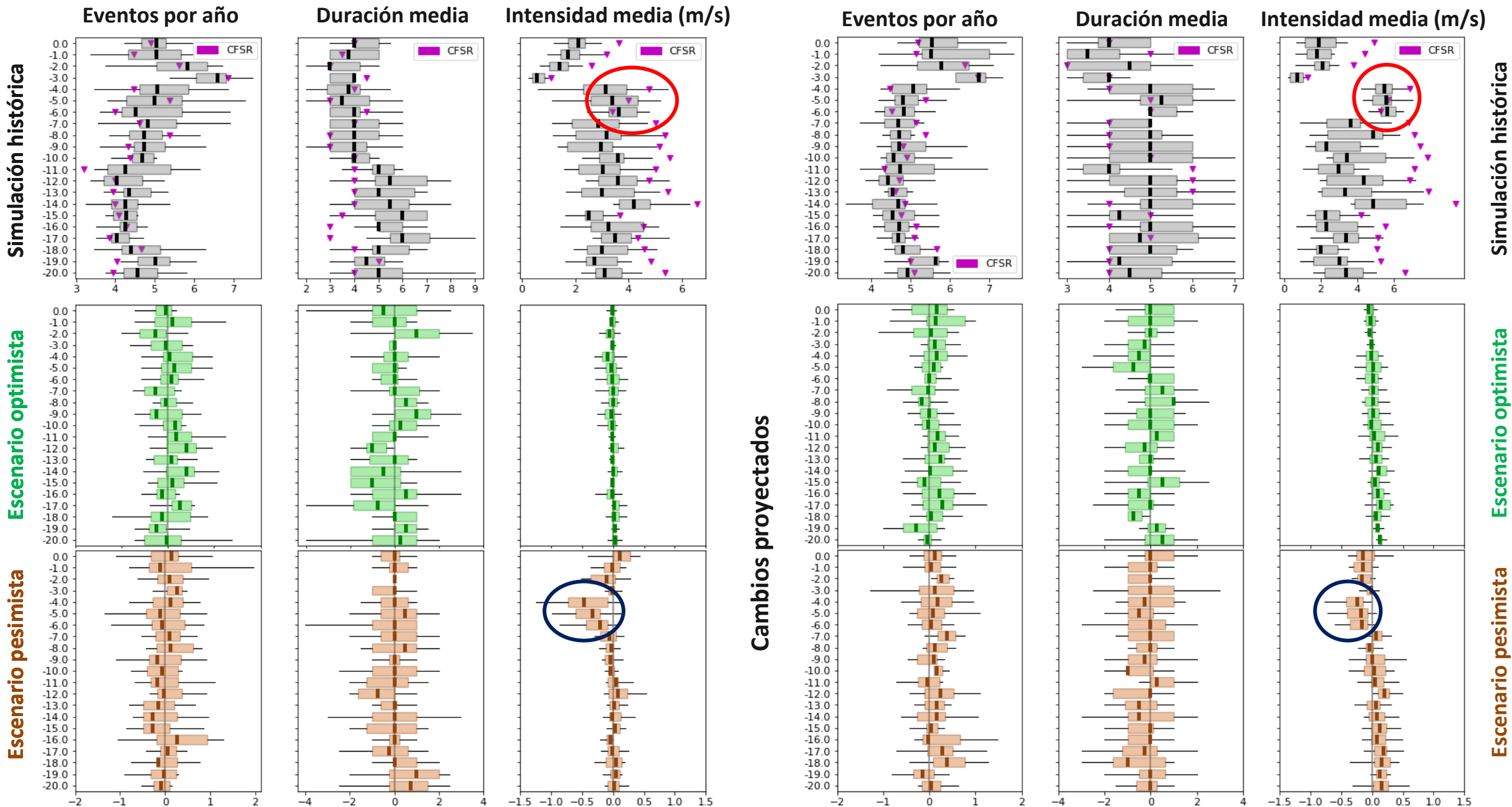
- Para fines de siglo XXI, bajo un escenario pesimista, se proyectan un incremento en la probabilidad de ocurrencia de días de viento débil y una disminución en la probabilidad de ocurrencia de días de viento fuerte.

# 4. Resultados: Eventos de viento débil (verano-invierno)





# 4. Resultados: Eventos de viento fuerte (verano-invierno)



# Estadísticas de eventos de viento débil y fuerte

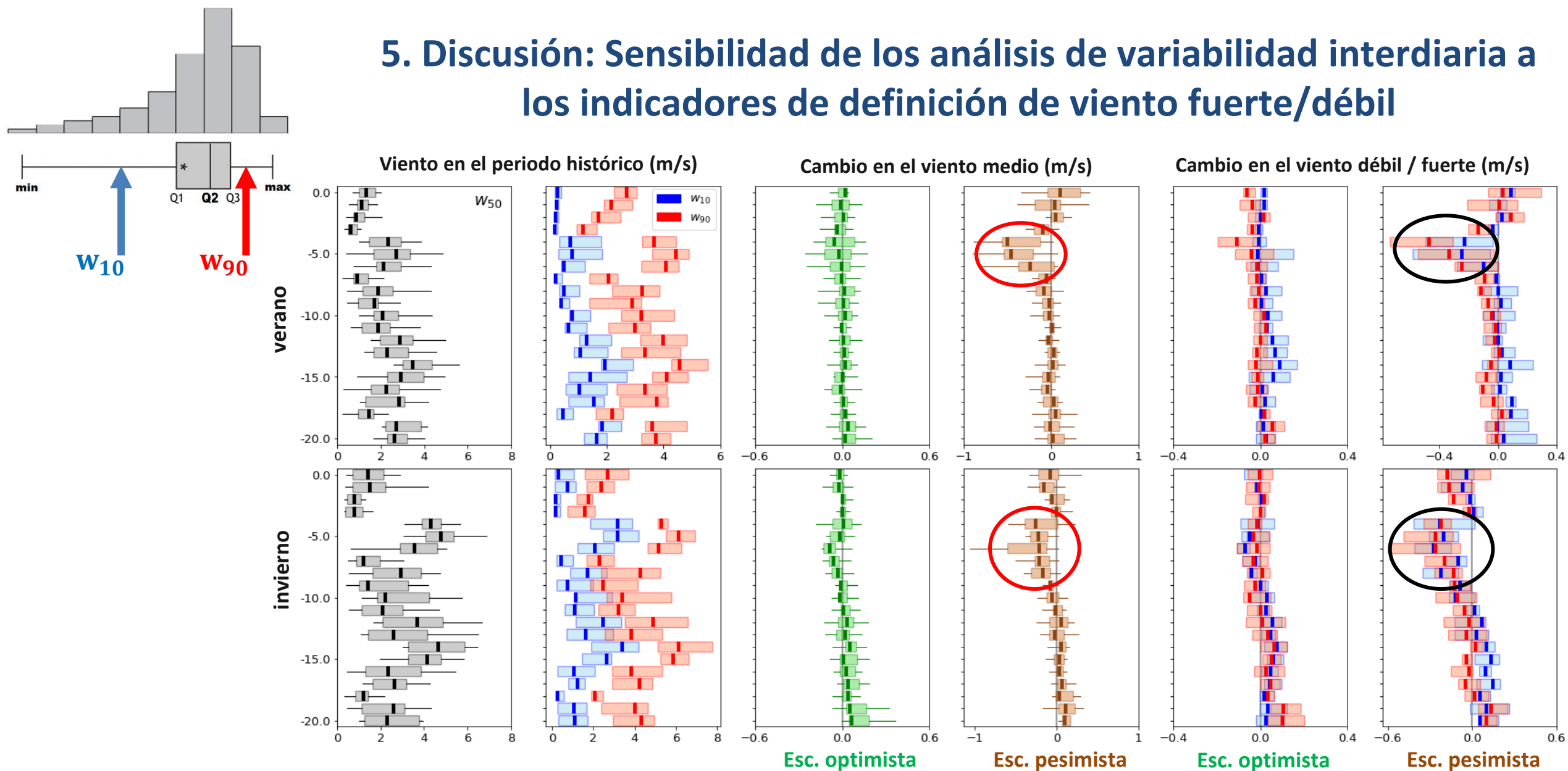
- En el periodo histórico, la frecuencia de ocurrencia de eventos de viento débil y fuerte por estación es variable, la duración es constante y la intensidad varía estacionalmente.

Eventos de viento débil y fuerte en el periodo histórico				
		Frecuencia media (eventos por año)	Duración media (días)	Intensidad media (m/s)
Viento débil	Verano	(3-7)	(3-7)	(1-5)
	Invierno	(4-8)	(3-7)	(1-7)
Viento fuerte	Verano	(1-7)	(3-7)	(1-7)
	Invierno	(4-7)	(3-6)	(1-10)

- Para fines de siglo XXI, bajo un escenario pesimista, se proyecta una disminución en la intensidad media tanto de los eventos de viento débil como de viento fuerte

Cambio en la intensidad media de los eventos para fines de siglo XXI bajo un escenario pesimista		
	Viento débil	Viento fuerte
Verano	↓(5-30)%	↓(6-20)%
Invierno	↓(0-10)%	↓(2-7)%

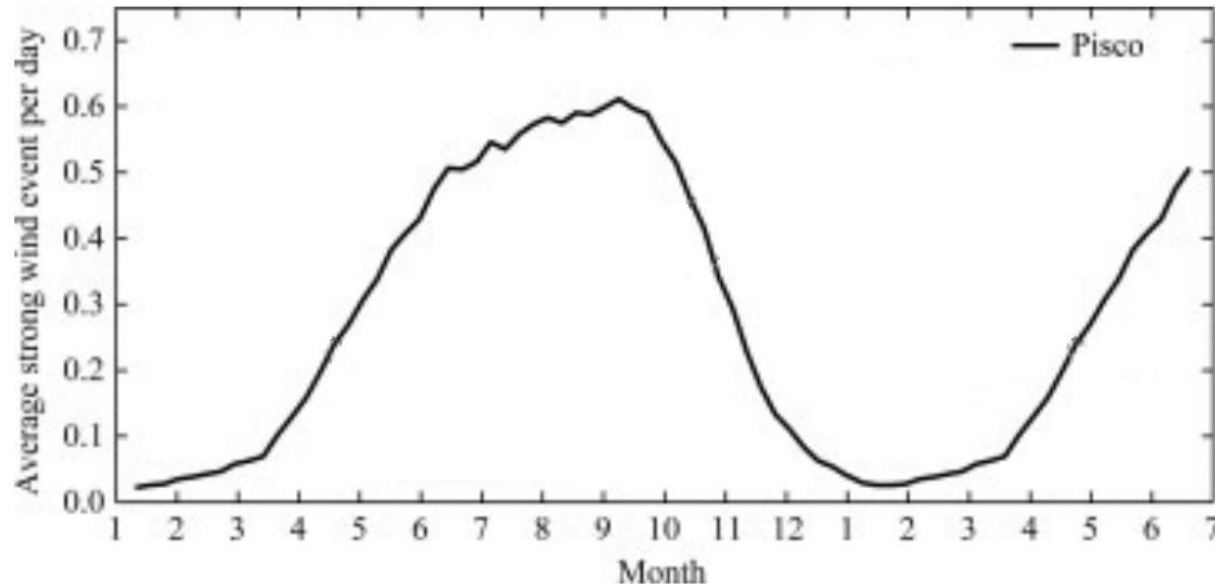
## 5. Discusión: Sensibilidad de los análisis de variabilidad interdiaria a los indicadores de definición de viento fuerte/débil



- Los cambios hallados para el periodo futuro, respecto del periodo histórico, con estos nuevos umbrales no experimentaron un cambio respecto de lo hallado con los umbrales previos

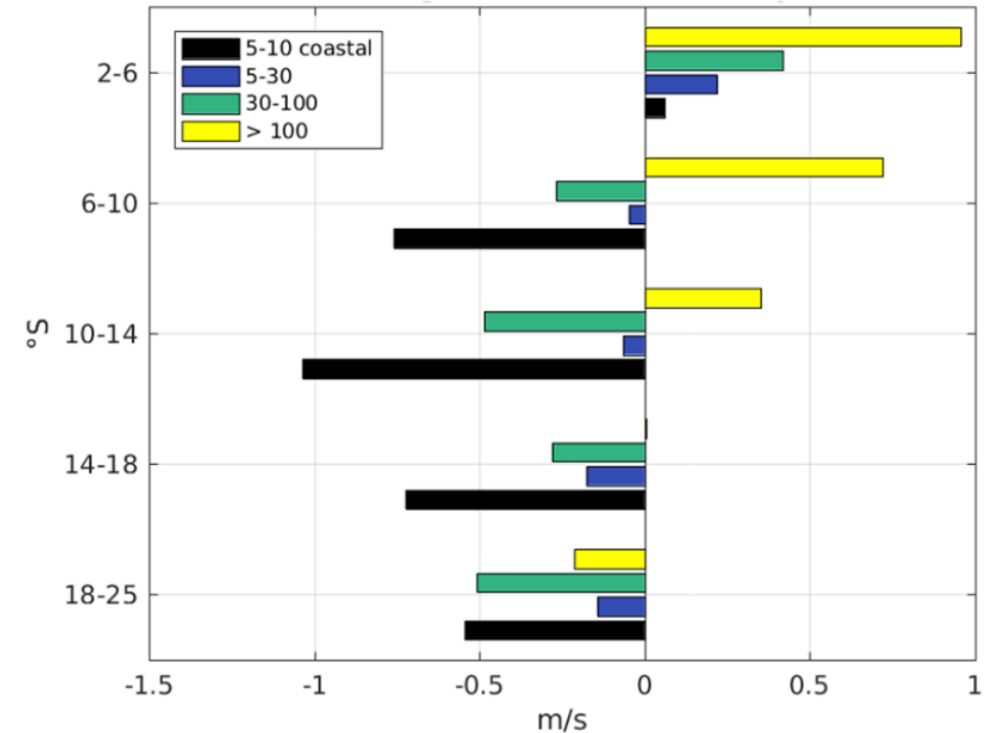
## 5. Discusión: Sobre la implicancia del uso de un umbral fijo versus un umbral climatológico en la identificación de eventos de viento débil y fuerte

Ciclo estacional del número de eventos de viento fuerte



Rahn et al. (2014)

Anomalía de viento y olas de calor marinas

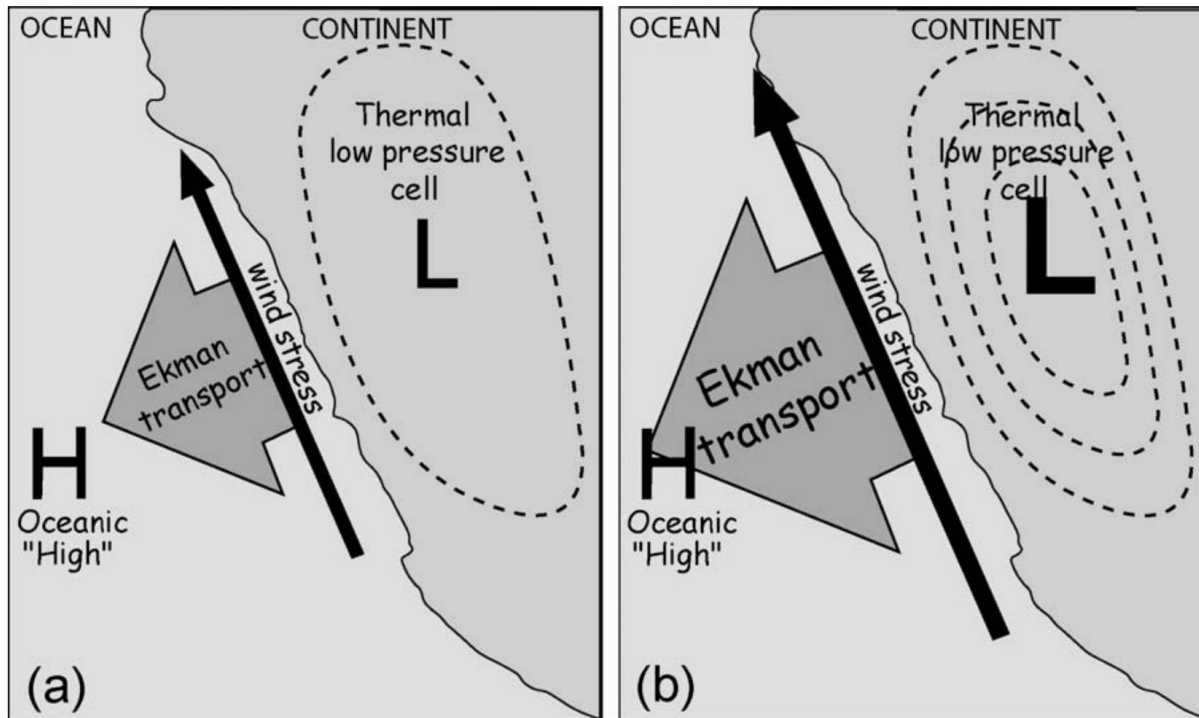


Pietri et al. (2021)

- El uso de un umbral climatológico que varia latitudinal y estacionalmente permite salvar la subestimación de eventos de viento extremo en la costa norte así como facilita la asociación con eventos oceanográficos extremos como las olas de calor marinas.

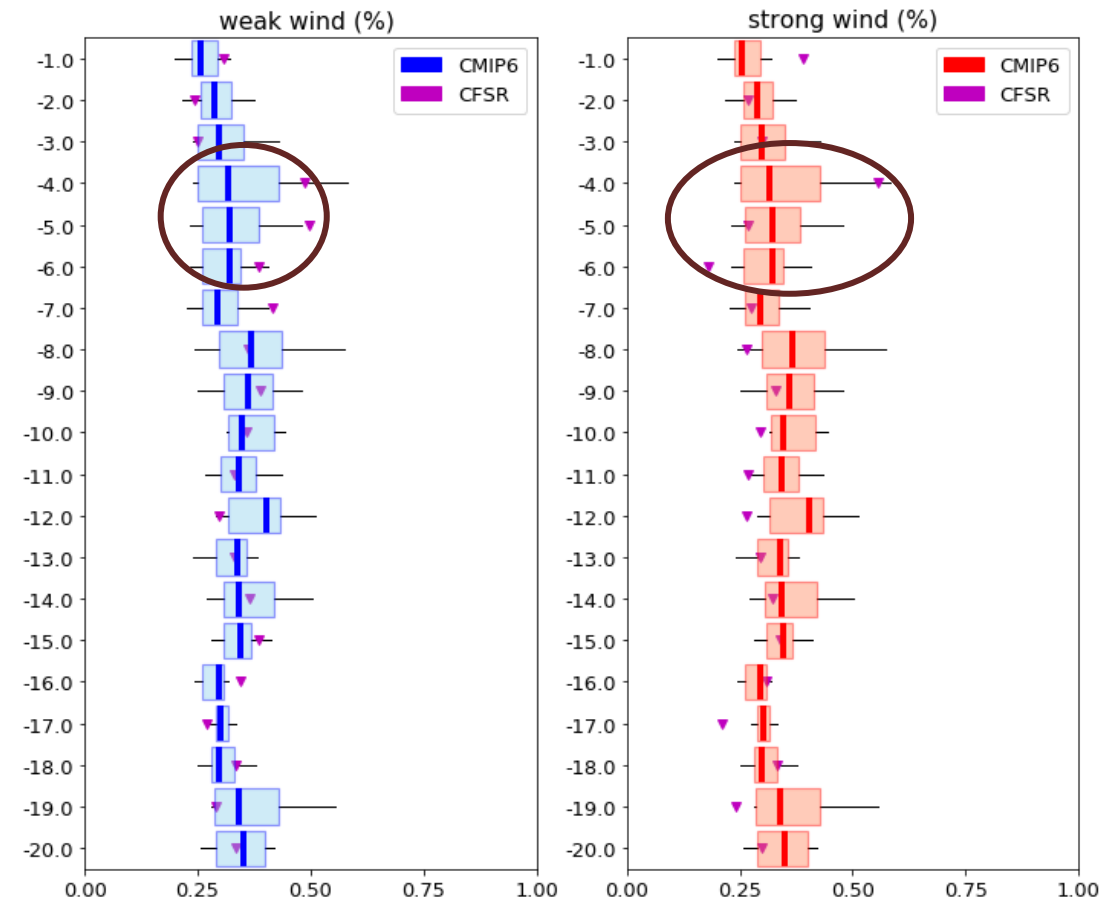
## 5. Discusión: Mecanismos que controlan el cambio en la variabilidad interdiaria el viento

### Hipótesis de Bakun



Bakun et al. (2008)

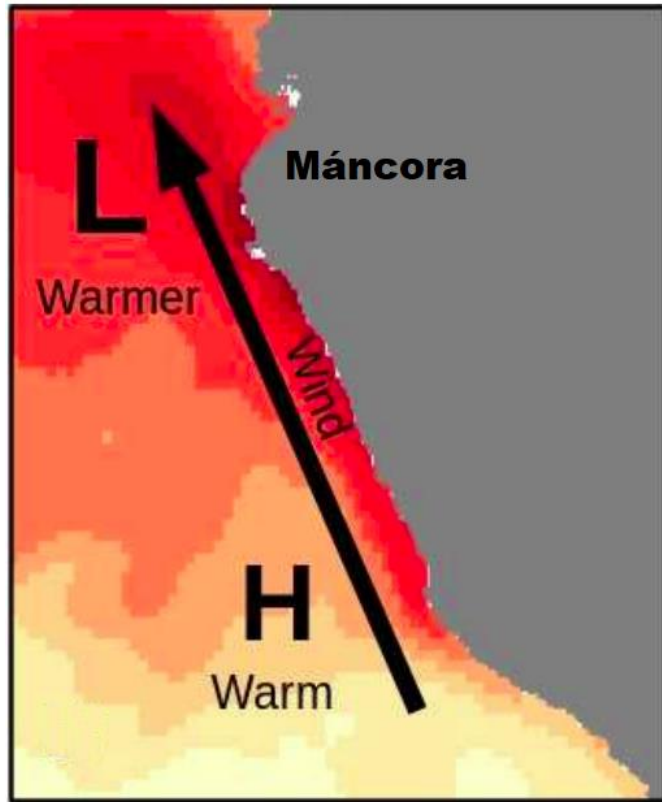
### Gradiente térmico tierra-mar vs viento



- El gradiente tierra-mar de la temperatura superficial es el segundo forzante de la variabilidad interdiaria del viento superficial, papel que mantendría para fines de siglo XXI bajo un escenario pesimista de cambio climático.

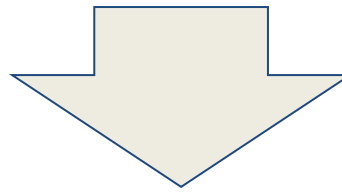


## 5. Discusión: Mecanismos que controlan el cambio en la variabilidad interdiaria el viento



Chamorro et al. (2018)

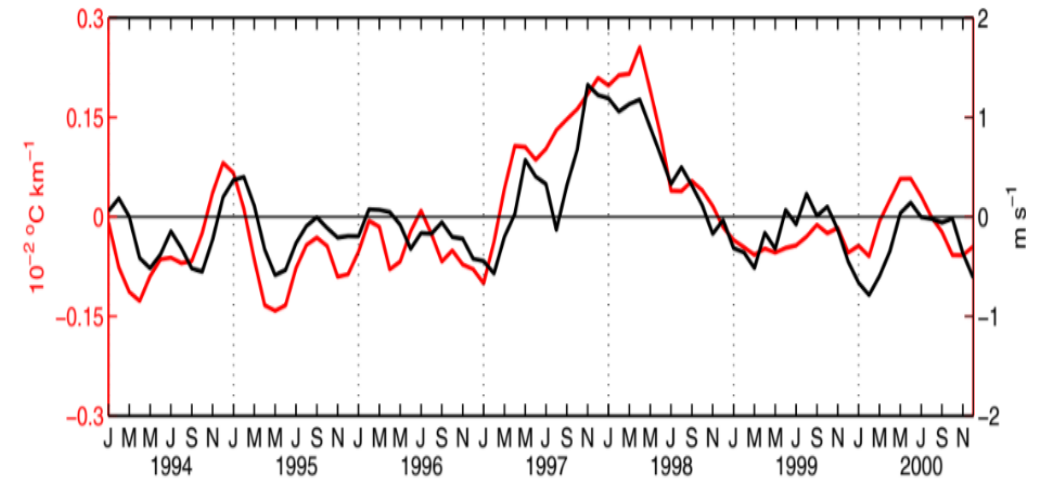
Gradiente norte –sur  
de la TSM



Gradiente norte-sur  
de presión

$$W \approx \frac{-1}{c_p} \frac{\partial P}{\partial y}$$

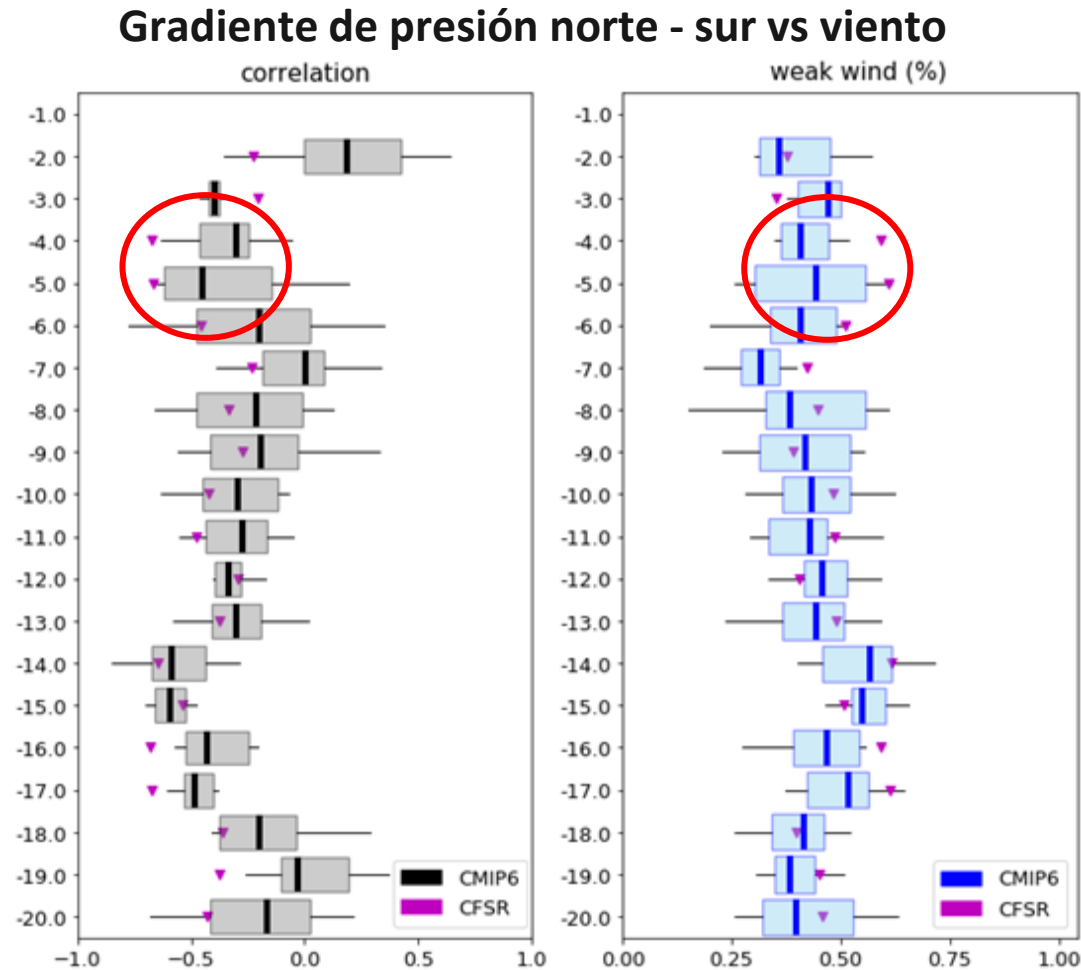
Intensidad de viento a  
lo largo de la costa



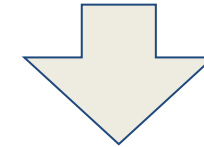
Chamorro et al. (2018)

- Bajo condiciones El Niño, la intensificación del viento es dirigida principalmente por un incremento en el gradiente norte-sur de la TSM

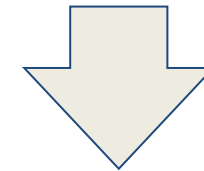
## 5. Discusión: Mecanismos que controlan el cambio en la variabilidad interdiaria el viento



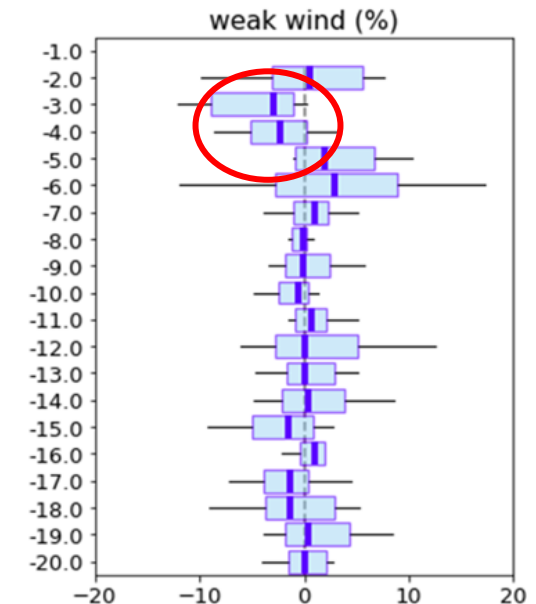
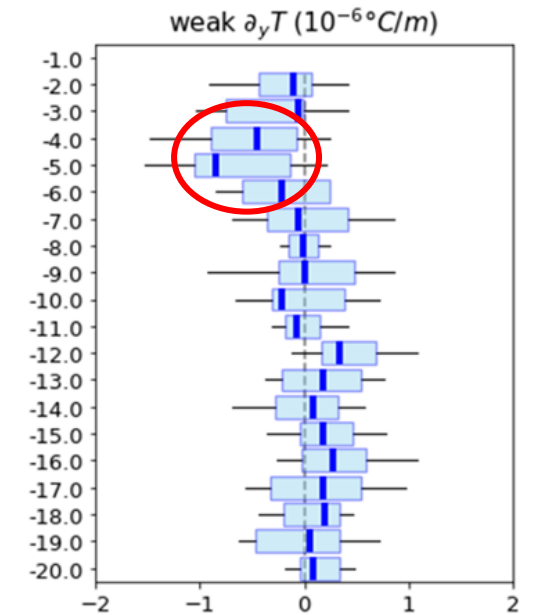
Debilitamiento  
del gradiente  
térmico



Debilitamiento  
del gradiente  
de presión



Mayor probab.  
de días de  
viento débil



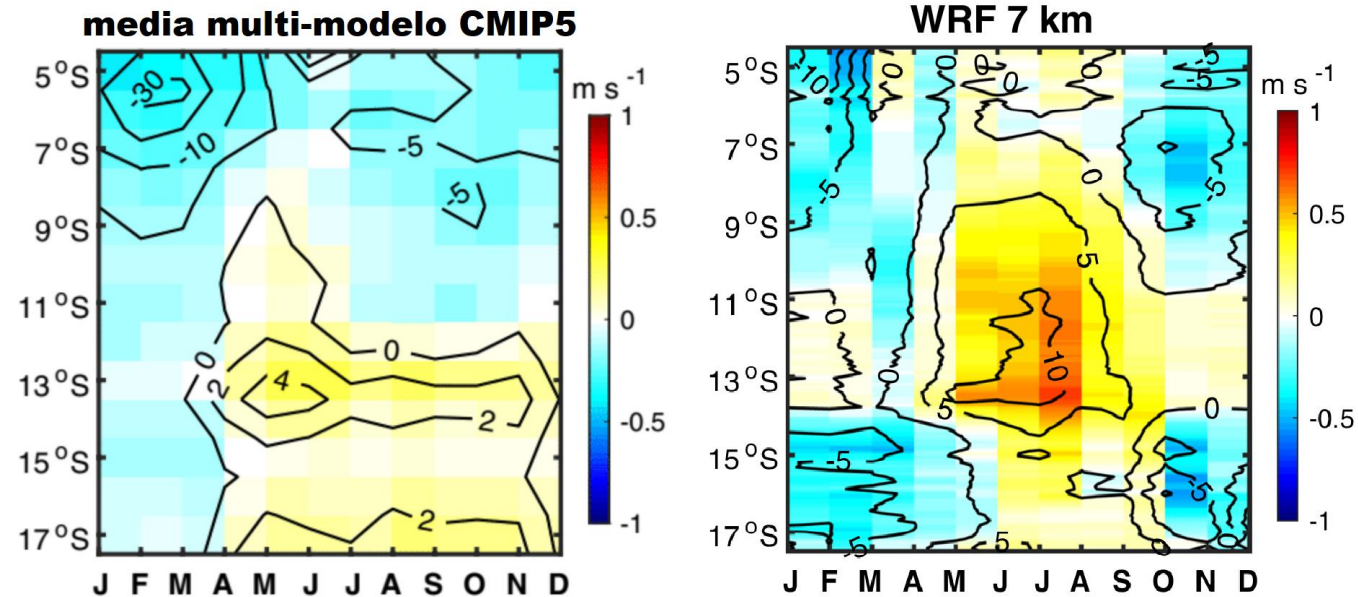
- Para 2080-2100, bajo un escenario pesimista, una ligera disminución del gradiente norte-sur de la temperatura superficial en la costa norte (4-5°S) se correspondería con el aumento de probab. de días de viento débil y la disminución de la probab. de días de viento fuerte.

## 6. Principales conclusiones

- La mayoría de los modelos climáticos CMIP6 (14 de 19) resultaron ser representativos de las condiciones atmosféricas medias del viento en el Sistema de la Corriente de Humboldt. Se caracterizó la variabilidad interdiaria del viento. Los modelos CMIP6 replican los patrones latitudinales del viento paralelo a la costa peruana en el periodo histórico, así como su estacionalidad, pero subestiman su intensidad.
- Para fines de siglo, bajo un escenario pesimista, se espera una disminución en la intensidad de viento débil y fuerte, así como una mayor probabilidad de ocurrencia de días de viento débil y menor probabilidad de ocurrencia de días de viento fuerte.
- Se caracterizó los eventos de viento débil y fuerte. Los eventos de viento fuerte (débil) ocurren con una frecuencia entre 12 y 28 eventos por año, con una duración entre 2 y 7 días, con una intensidad máxima entre 7 y 10 m/s (mínima entre 1 y 3 m/s).
- Para fines de siglo, bajo el escenario pesimista, se proyecta una ligera disminución de la intensidad de los eventos de viento débil y fuerte frente a la costa norte.
- Los cambios proyectados bajo un escenario pesimista en el viento estarían asociados principalmente con el gradiente norte-sur de la temperatura superficial.

## 7. Perspectivas

### Proyección del cambio en el ciclo estacional del viento (Chamorro, 2021)



- Estudiar la variabilidad de alta frecuencia del viento con un modelo de mayor resolución espacial (modelo regional).
- Profundizar en el estudio de los mecanismos forzantes de la variabilidad de alta frecuencia del viento con un modelo regional.
- Relacionar los eventos de viento débil o fuerte y la ocurrencia de olas de calor marinas o eventos de hipoxia.

**¡MUCHAS GRACIAS!**