



### Introducción

En Chile existen múltiples zonas donde se puede aprovechar el potencial de la energía eólica, especialmente en regiones costeras y con una alta variabilidad atmosférica. Además, en estas zonas, la compleja interacción entre la topografía local y los sistemas meteorológicos de gran escala plantea desafíos significativos para su pronóstico. Nuestra investigación busca modelar el comportamiento del viento entre los años 2021 y 2025, y realizar proyecciones específicas durante el mes de Julio del 2025, utilizando dos modelos complementarios:

- Un modelo SARIMAX, que incorpora covariables meteorológicas exógenas como temperatura, presión y dirección del viento.
- Una Red Neuronal Convolucional Temporal (TCN), entrenada para capturar patrones no lineales y estacionales en las series de tiempo.

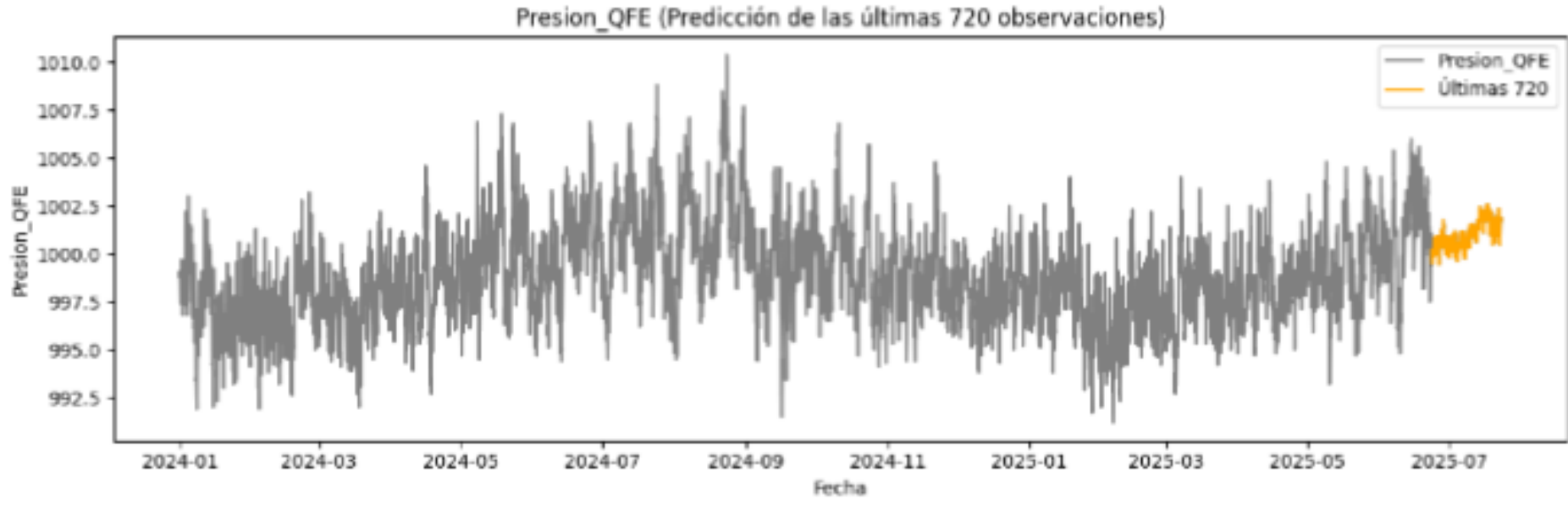
### Metodología

Se utilizaron datos meteorológicos horarios de la estación código 290004, que corresponde a La Serena entre 2021 y 2025. El flujo metodológico se divide en tres etapas:

- Preprocesamiento:** imputación de datos faltantes mediante **kNN**, codificación cíclica para hora y día del año, y normalización de variables.
- Modelado de covariables:** se usó una Red TCN para predecir simultáneamente presión, temperatura, dirección y rachas de viento a un horizonte de 30 días.
- Pronóstico de velocidad del viento:** mediante dos enfoques:
  - SARIMAX:** incorpora variables exógenas y componentes estacionales (24 h).
  - TCN:** modelo multivariado de predicción directa a 720 pasos (30 días).

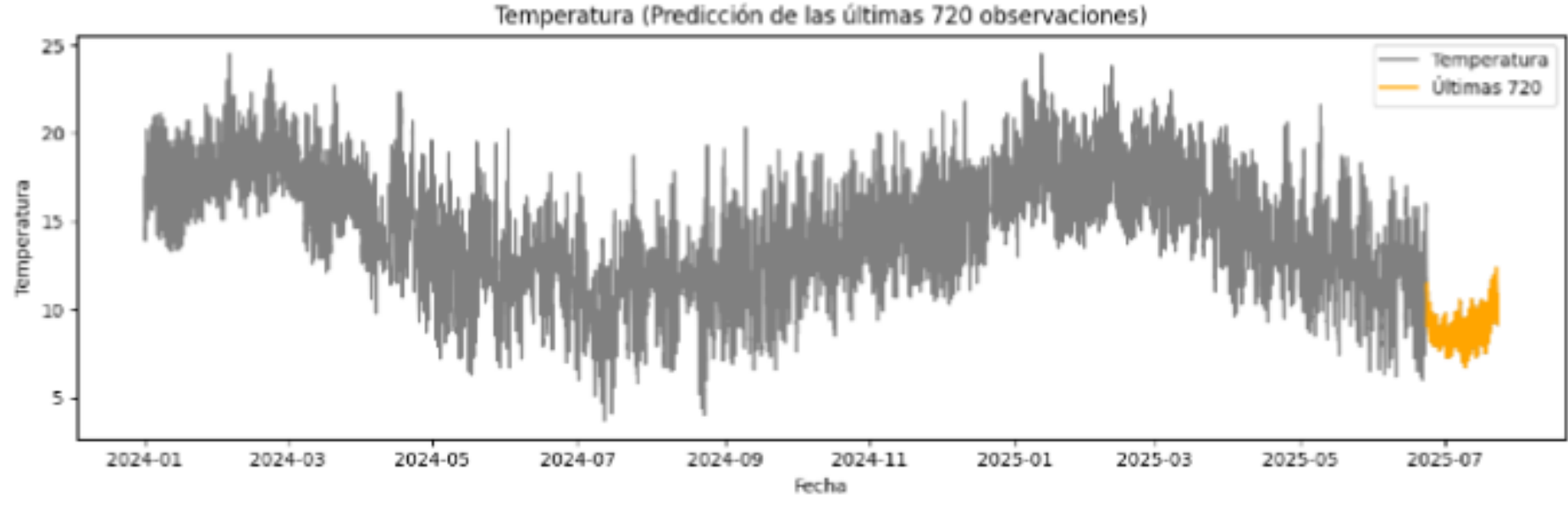
### Predicciones de covariables mediante red TCN implementada

Presión QFE:



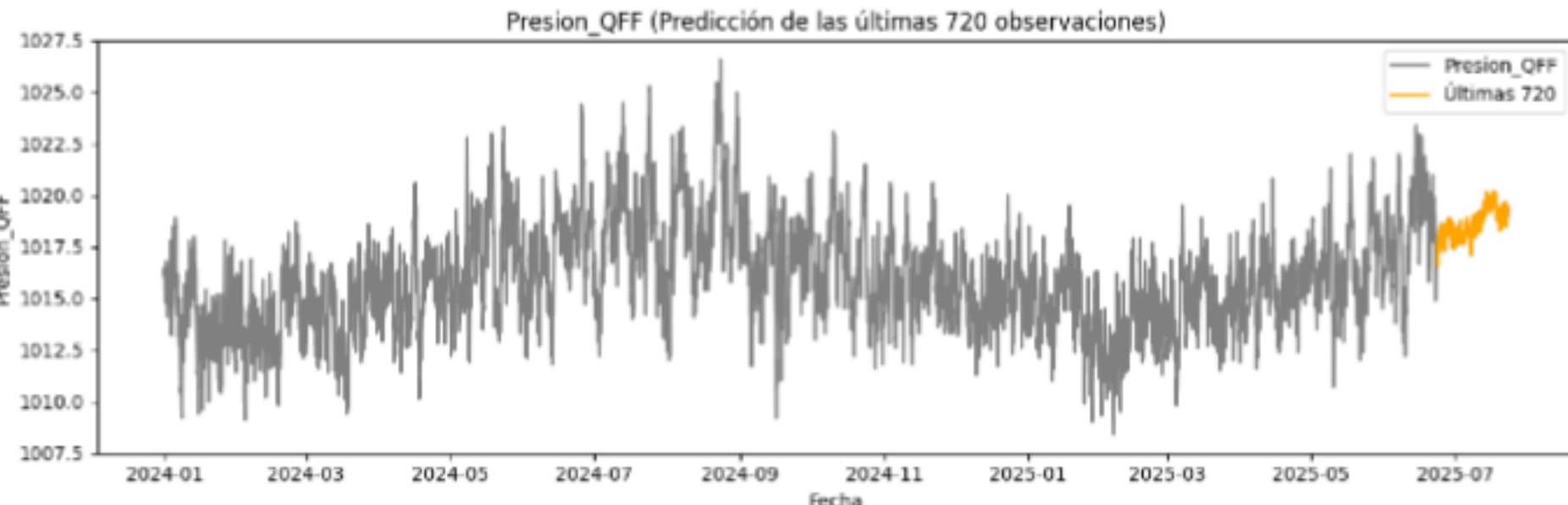
Se puede ver la predicción para la presión QFE, la cual será utilizada para la posterior predicción de la velocidad del viento.

Temperatura:



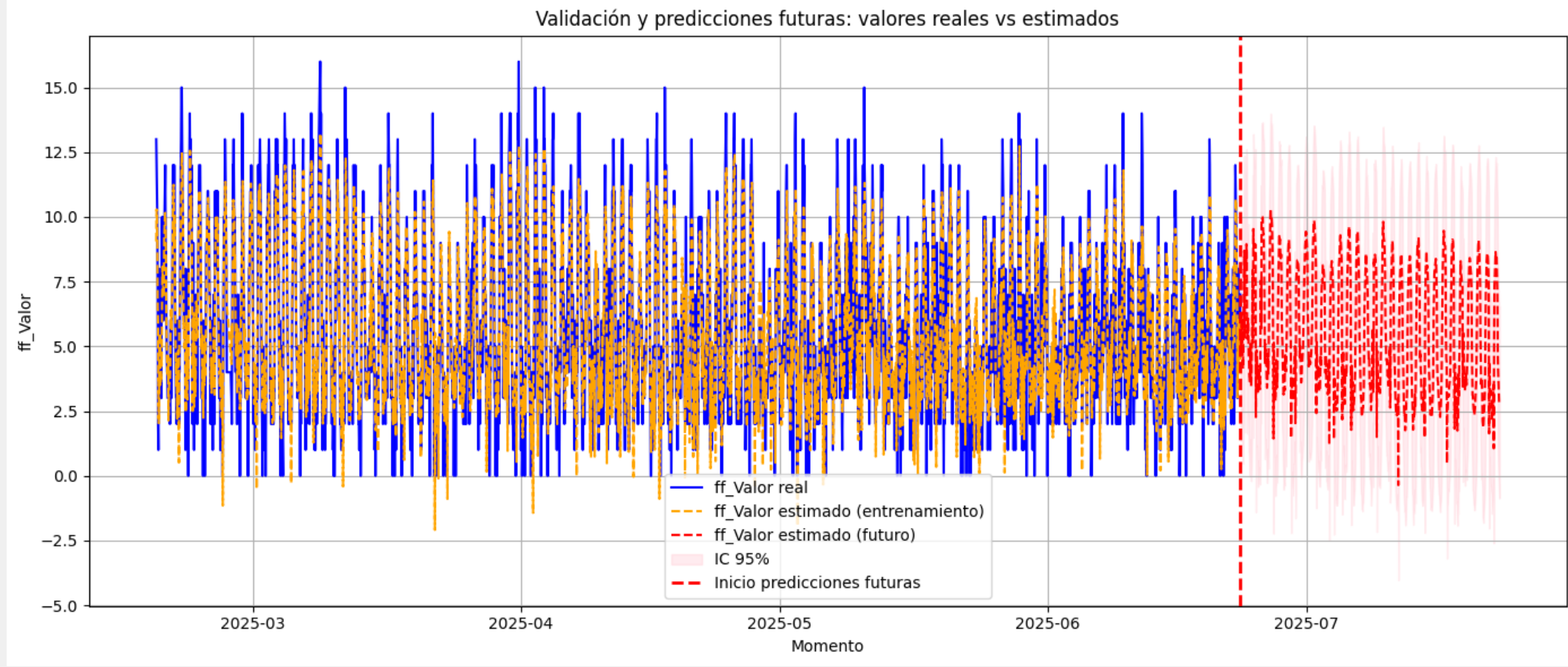
Podemos ver la predicción para la temperatura, la cual será utilizada para la posterior predicción de la velocidad del viento.

Presión QFF:



Se puede ver la predicción para la presión QFF, la cual será utilizada para la posterior predicción de la velocidad del viento.

### Modelo SARIMAX(2,0,3)(2,0,3,24)



El modelo SARIMAX fue entrenado sobre datos históricos y proyecta consistentemente el comportamiento del viento en La Serena durante junio de 2025, sin presentar cambios abruptos. Las bandas de confianza se mantienen estrechas, indicando estabilidad e incertidumbre controlada.

### Comprobación de supuestos del modelo

Prueba	Descripción	Resultado
Ljung-Box	No hay autocorrelación significativa en los residuos	$p = 0.73$
Jarque-Bera	Los residuos no siguen una distribución normal	$p < 0.01$
Heterocedasticidad	Presencia de heterocedasticidad significativa	$p < 0.01$

### Evaluación del modelo SARIMAX(2,0,3)(2,0,3)<sub>24</sub>

Métrica	Descripción	Valor
AIC	Penaliza complejidad	12318.64
RMSE	Error cuadrático medio	1.87
MAE	Error absoluto medio	1.49

**Interpretación:** Las métricas muestran un buen equilibrio entre ajuste y complejidad, con errores de predicción bajos y consistentes. Esto valida al modelo como herramienta confiable para análisis y pronóstico.

### Estructura e interpretación del modelo

El modelo SARIMAX combina componentes autorregresivos y de medias móviles con covariables exógenas relevantes. A continuación, se muestra su forma general:

$$y_t = 0.339 y_{t-1} + 0.049 y_{t-2} + 0.428 y_{t-24} + 0.192 y_{t-48} + 0.103 \varepsilon_{t-1} + 0.032 \varepsilon_{t-2} + 0.017 \varepsilon_{t-3} - 0.292 \varepsilon_{t-24} - 0.120 \varepsilon_{t-48} + 0.003 \varepsilon_{t-72} + \beta^T X_t + \varepsilon_t$$

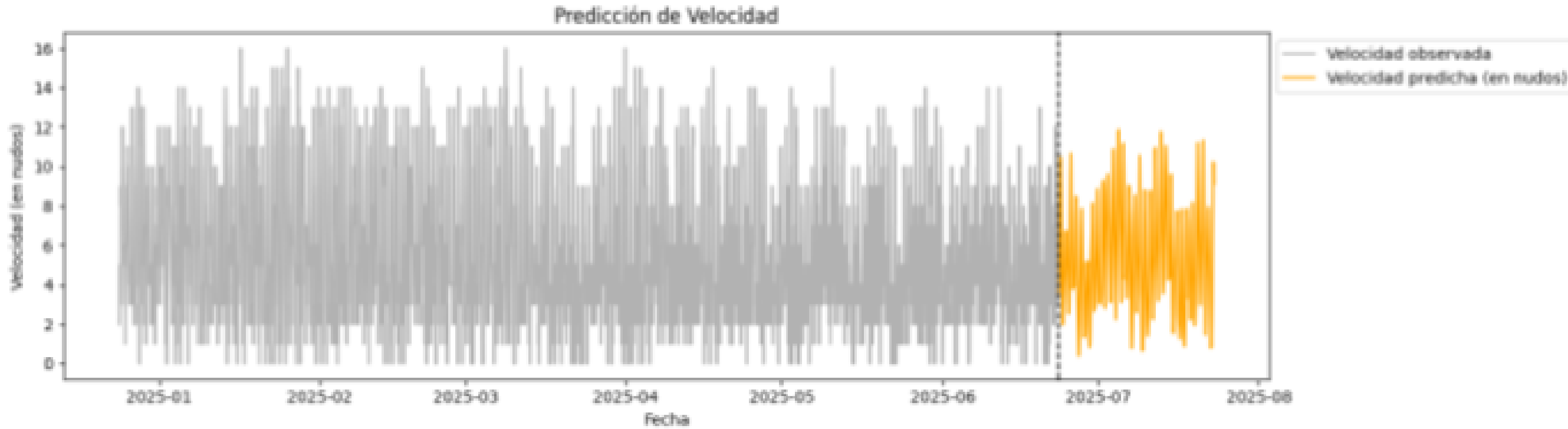
Las principales variables exógenas significativas que afectan la velocidad del viento son:

Variable ( $X_t$ )	Coficiente ( $\beta$ )	Interpretación
dd_Valor	0.0035	Dirección del viento
VRB_Valor	-3.5326	Viento sin dirección fija
Presion_QFE	-0.1618	Mayor presión local
T°	0.3163	Temperatura
Presion_QFF	0.1598	Mayor presión a nivel del mar
Hora	0.0683	Ciclo diario con mayor velocidad en ciertas horas

Estas variables son las más significativas para nuestro modelo y contribuyen directamente a explicar y anticipar el comportamiento de la velocidad del viento.

### Predicción para el viento utilizando red TCN

### Predicción para el viento utilizando red TCN



Las métricas de los resultados obtenidos por la red TCN implementada son:

Métrica	Valor
MAE (Testeo)	0.302
RMSE (Testeo)	0.527
MAE (Testeo)	0.307
RMSE (Testeo)	0.529
Desviación estándar verdadera	2.9894
Desviación estándar predicciones	2.9405

Se espera que a las 8:00 A.M. del día 24 de junio de 2025, mientras que para pasado una semana próxima se espera una velocidad de 5.143 nudos. Finalmente, para la observación del próximo mes, la red TCN prevee que la velocidad del viento será de 8.42 nudos a las 8:00 A.M del 23 de julio de 2025.

### Comparación predicción 2025 con 2024

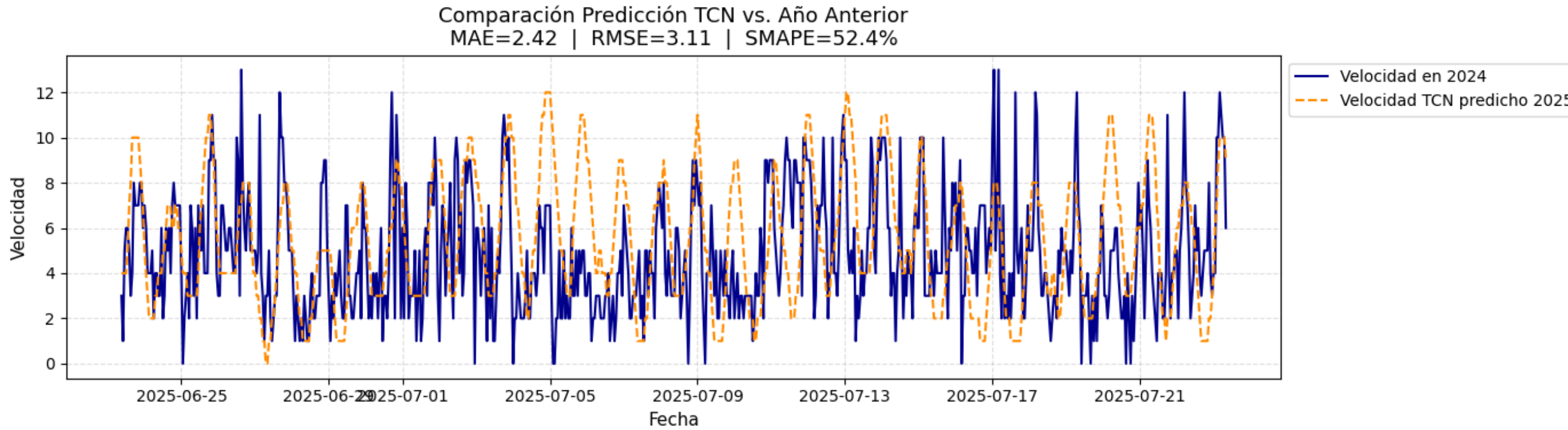


Figure 1. Comparación periodo predicho con el periodo correspondiente al año anterior

Se visualiza que los resultados de 2025 entregan valores que tienen una variabilidad similar a la variabilidad presentada en el mismo periodo de tiempo el año anterior.

### Conclusiones

- En este estudio se abordó la predicción de la velocidad del viento en La Serena mediante el procesamiento de series temporales históricas y la incorporación de variables meteorológicas exógenas. Se implementaron y compararon dos modelos: el modelo estadístico SARIMAX y una red neuronal convolucional temporal .
- Ambos modelos fueron capaces de capturar las variaciones de la serie con precisión, aunque la TCN mostró un desempeño notablemente superior, considerando las métricas, alcanzando menores errores de predicción, gracias a su capacidad para modelar dependencias temporales y patrones cíclicos complejos.
- Los resultados indican que la combinación de modelos físicos y técnicas de aprendizaje profundo permite mejorar significativamente la calidad del pronóstico en contextos costeros con alta variabilidad atmosférica. Esto representa un avance relevante para la planificación energética y el aprovechamiento eficiente de recursos renovables en la región.