



Variación espacial de la precipitación diaria

Gerencia Técnica y Despacho Nacional de Cargas.

Versiones:

Fecha	Autores	Motivo
Noviembre 2025	Matilde Ungerovich	Creación del informe.

1. Resumen ejecutivo.

Se analizó la coherencia espacial de la precipitación diaria sobre Uruguay utilizando datos de ERA5-Land (resolución 0.1°). Se calcularon correlogramas espaciales que describen cómo disminuye la correlación de la lluvia con la distancia.

El ajuste exponencial $r(d)=e^{-d/L}$ reproduce adecuadamente el decaimiento de la correlación, siendo L la distancia a la cual la correlación cae a 1/e y r la correlación de Pearson. Se encuentra que L tiene valores entre 260 y 290 km. Además, se encuentra que las lluvias son más coherentes espacialmente en otoño y primavera. Estos resultados permiten cuantificar la extensión típica de los eventos de lluvia y mejorar la representación de las dependencias espaciales en los modelos CEGH.

2. Introducción.

La precipitación presenta una estructura espacial altamente variable, determinada por los mecanismos atmosféricos que la generan (convección local, frentes, sistemas de mesoescala). Comprender la medida en que la lluvia en un punto se parece a la de sus alrededores es esencial para representar correctamente los aportes hídricos en los modelos hidrológicos y energéticos del CEGH.

Diversos estudios han mostrado que la correlación entre dos puntos de precipitación disminuye con la distancia de forma sistemática, y que ese decaimiento puede representarse mediante una ley exponencial de la forma: $r(d)=e^{-d/L}$, donde L es la longitud de decorrelación característica, que indica la escala espacial a la cual la correlación se reduce a $1/e \approx 0.37$.

Van Leth et al. (2021) analizan esta relación en los Países Bajos, encontrando que la longitud de decorrelación espacial depende del intervalo temporal de agregación (Δt) según una ley de potencia

$L=a(\Delta t)^b$. Para escalas diarias y considerando únicamente días de lluvia, obtuvieron valores de $L \approx 260$ km, lo que sugiere que los eventos de lluvia diarios suelen tener una coherencia espacial de varios cientos de kilómetros. En escalas menores (horarias), la correlación disminuye más rápidamente, reflejando la naturaleza más localizada de la convección.

Siguiendo este enfoque, en este informe se aplica la metodología de Van Leth et al. (2021) a los datos de ERA5-Land (Muñoz, et. al., 2019) sobre Uruguay, con el objetivo de cuantificar la escala espacial típica de la precipitación diaria y analizar sus variaciones estacionales. Esta caracterización permitirá mejorar la representación de las dependencias espaciales entre puntos del sistema.

3. Hipótesis.

Las hipótesis de este trabajo son las siguientes:

- La correlación espacial de la precipitación diaria disminuye con la distancia siguiendo un decaimiento exponencial $r(d)=e^{-d/L}$, donde r representa la correlación de Pearson, d la distancia entre los 2 puntos en cuestión y L la longitud de decorrelación característica. La longitud de decorrelación L refleja la escala espacial típica de coherencia de los eventos de lluvia.
- De acuerdo con Van Leth et al. (2021), se espera que la longitud de decorrelación espacial aumente con la escala temporal de agregación (Δt) según una ley de potencia $L=a(\Delta t)^b$, y que a escala diaria tome valores del orden de 200–300 km.
- Dado que en Uruguay la mayoría de los eventos de precipitación se asocian a sistemas frontales se espera que las distancias de decorrelación sean similares en las distintas estaciones del año.

4. Metodología.

El objetivo del procedimiento es estimar la coherencia espacial de la precipitación diaria sobre Uruguay y su variación estacional, a partir de los datos de ERA5-Land.

El análisis sigue el enfoque propuesto por Van Leth et al. (2021), donde la correlación entre dos puntos de precipitación se modela mediante una función de decaimiento exponencial $r(d)=e^{-d/L}$.

1. Datos de entrada

Se utilizaron archivos NetCDF mensuales de precipitación diaria acumulada (mm/día) del reanálisis ERA5-Land, en resolución de 0.1° (~ 9 km), para el período 2003–2024.

Los datos fueron recortados al dominio de la cuenca de Salto Grande (entre 58.5° – 49° O y 34° – 26° S).

2. Remoción del ciclo estacional

Para eliminar el ciclo anual y hacer comparables las correlaciones entre meses, se calcularon

anomalías mensuales restando la climatología media de cada mes.

No se aplicó normalización por desviación estándar, ya que la correlación de Pearson normaliza automáticamente las amplitudes.

3. Selección de puntos de referencia

Se seleccionaron 20 puntos de referencia distribuidos en una grilla regular dentro del dominio, asegurando cobertura espacial y varianza temporal significativa.

4. Cálculo de correlaciones

Para cada punto de referencia se calculó la correlación de Pearson entre su serie temporal de anomalías y la de cada celda del dominio, considerando dos modos:

- Modo ALL: todos los días del registro.
- Modo $PP \geq 1$ mm: sólo los días en los que el punto de referencia registró precipitación efectiva (≥ 1 mm).

Este último modo permite aislar los patrones espaciales característicos de los días lluviosos.

5. Distancias y correlogramas

La distancia entre cada celda y el punto de referencia se calculó mediante la fórmula de Haversine (Robusto, 1957), agrupando los pares (r, d) en intervalos de 25 km.

Para cada intervalo de distancia se calculó el promedio y la desviación estándar de la correlación, obteniendo el correlograma espacial $r(d)$.

6. Ajuste de la función teórica

A los correlogramas promedio se les ajustó la función exponencial $r(d) = e^{-d/L}$

para estimar el parámetro L que mejor reproduce el decaimiento observado.

7. Resultados intermedios y síntesis

Para cada estación del año (DJF, MAM, JJA, SON) se generaron:

- Mapas de correlación espacial $r(lat, lon)$.
- Correlogramas medios con bandas de $\pm 1 \sigma$.
- Curvas promedio $r(d)$ obtenidas al combinar los 20 puntos de referencia.
- Estimaciones de la longitud de decorrelación para cada estación.

5. Resultados.

3.1 Mapas de correlación espacial

Para cada estación se calcularon los mapas de correlación entre cada punto de referencia y el resto del dominio, tanto considerando todos los días como sólo los días con precipitación efectiva ($PP \geq 1$ mm). Estos mapas permiten visualizar la extensión espacial de los eventos de lluvia y su patrón característico.

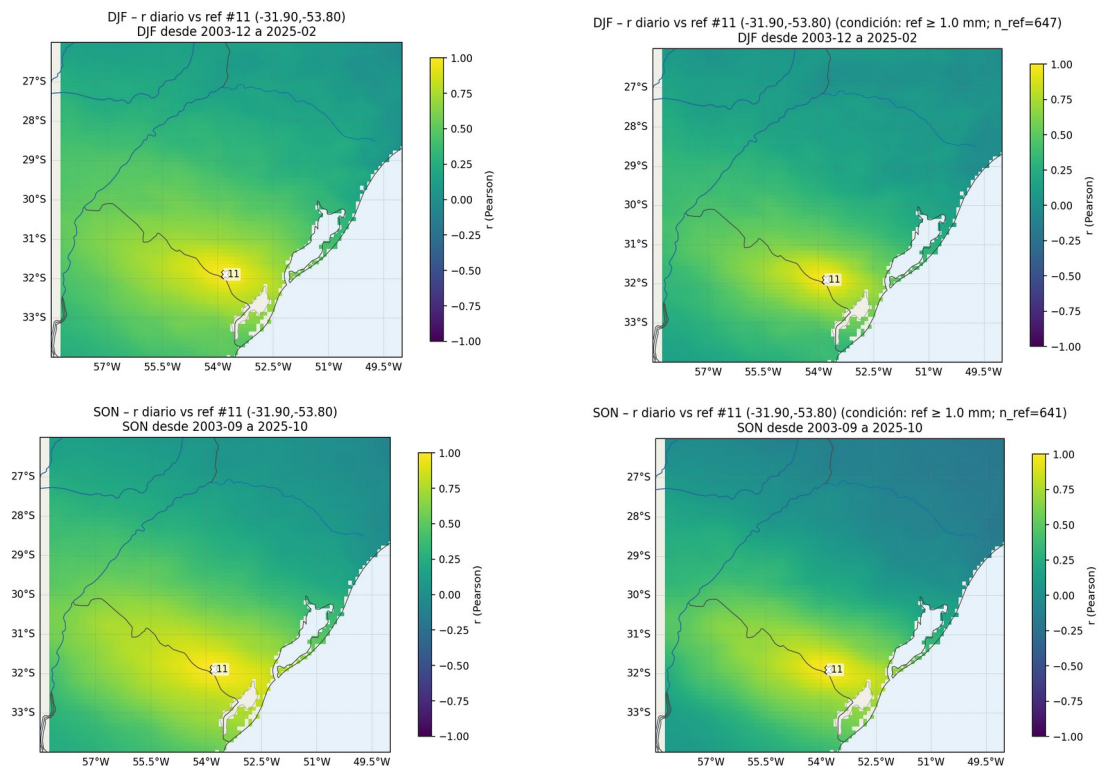


Fig. 1. Ejemplo de mapas de correlación $r(\text{lat}, \text{lon})$ en un punto aleatorio (11) para DJF (paneles superiores) considerando todos los días (columna izquierda) y para SON (paneles inferiores) considerando únicamente días de lluvia (columna derecha).

En ambos casos se observa que las áreas con alta correlación (tonos amarillos) se concentran en torno al punto de referencia y se extienden isotrópicamente, disminuyendo gradualmente hacia valores próximos a cero.

3.2 Correlogramas individuales

Los correlogramas individuales $r(d)$ muestran la correlación media entre el punto de referencia y el resto de las celdas a diferentes distancias. Cada punto azul representa la correlación media dentro de un intervalo de 25 km, y la línea continua indica la media suavizada para todos los puntos de referencia de una misma estación.

Los correlogramas sugieren un decaimiento exponencial: la correlación disminuye rápidamente durante los primeros 200 km y tiende a valores cercanos a cero a distancias mayores a 400 km.

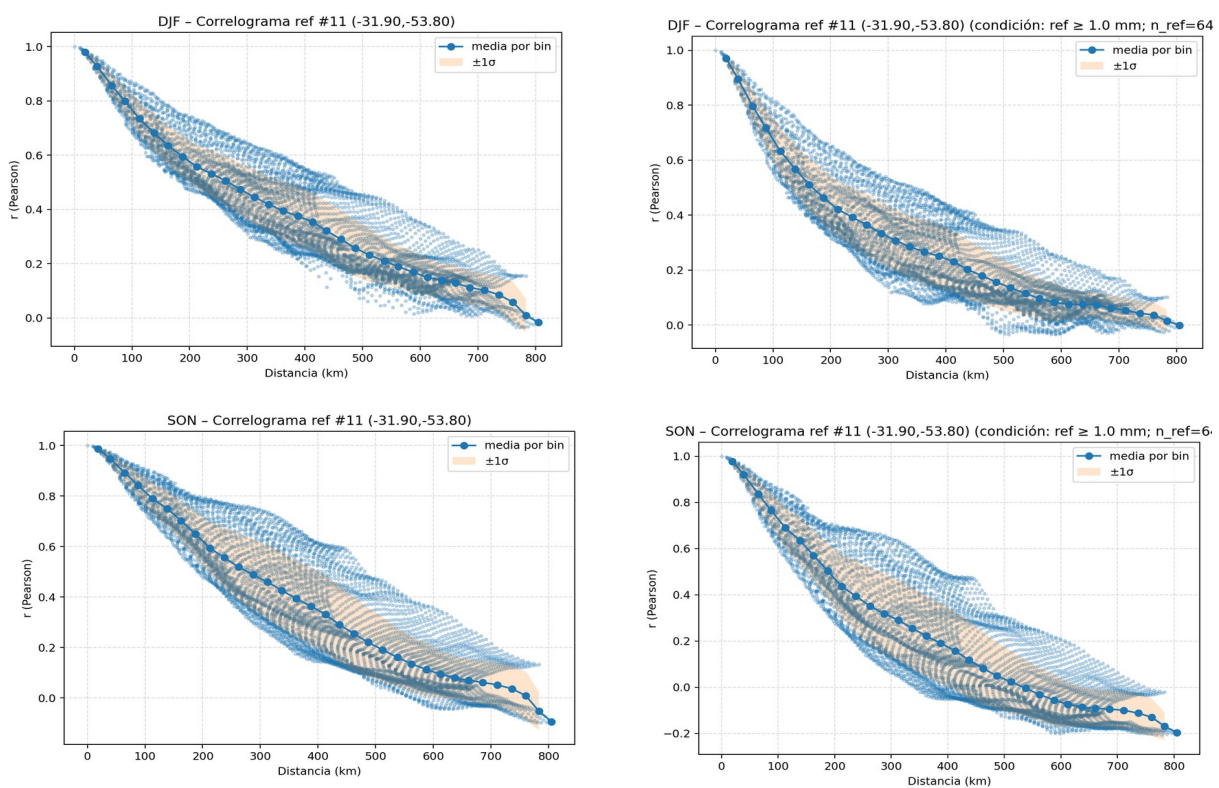


Fig. 2. Ejemplo de correlogramas en un punto aleatorio (11) para DJF (paneles superiores) considerando todos los días (columna izquierda) y para SON (paneles inferiores) considerando únicamente días de lluvia (columna derecha).

3.3 Correlogramas promedio por estación

Para sintetizar la información de los 20 puntos de referencia, se calculó un correlograma medio por estación.

Las curvas son muy similares entre estaciones. La comparación entre los modos ALL y $PP \geq 1$ mm muestra que las correlaciones son levemente mayores cuando se incluyen todos los días, especialmente a distancias cortas (< 100 km), porque los días secos aportan coincidencias de valor cero en ambas series. A diferencia de las relaciones físicas que puedan existir en días de precipitación, tales como el mismo sistema trasladándose, para los días sin precipitación las correlaciones se consideran espúreas. Esto implica que cuando se consideran todos los días la coherencia espacial parece mayor que cuando se consideran únicamente días de lluvia pero la correlación en días sin lluvia no tiene respaldo físico aparente.

Por otro lado, se encuentra que a mayores distancias las diferencias se atenúan, y las curvas convergen.

Por otro lado, la figura 4 muestra en el mismo panel los 4 trimestres. Se destaca que las relaciones entre correlación y distancia son similares en los distintos períodos, con valores levemente inferiores en verano en los primeros 200 kilómetros.

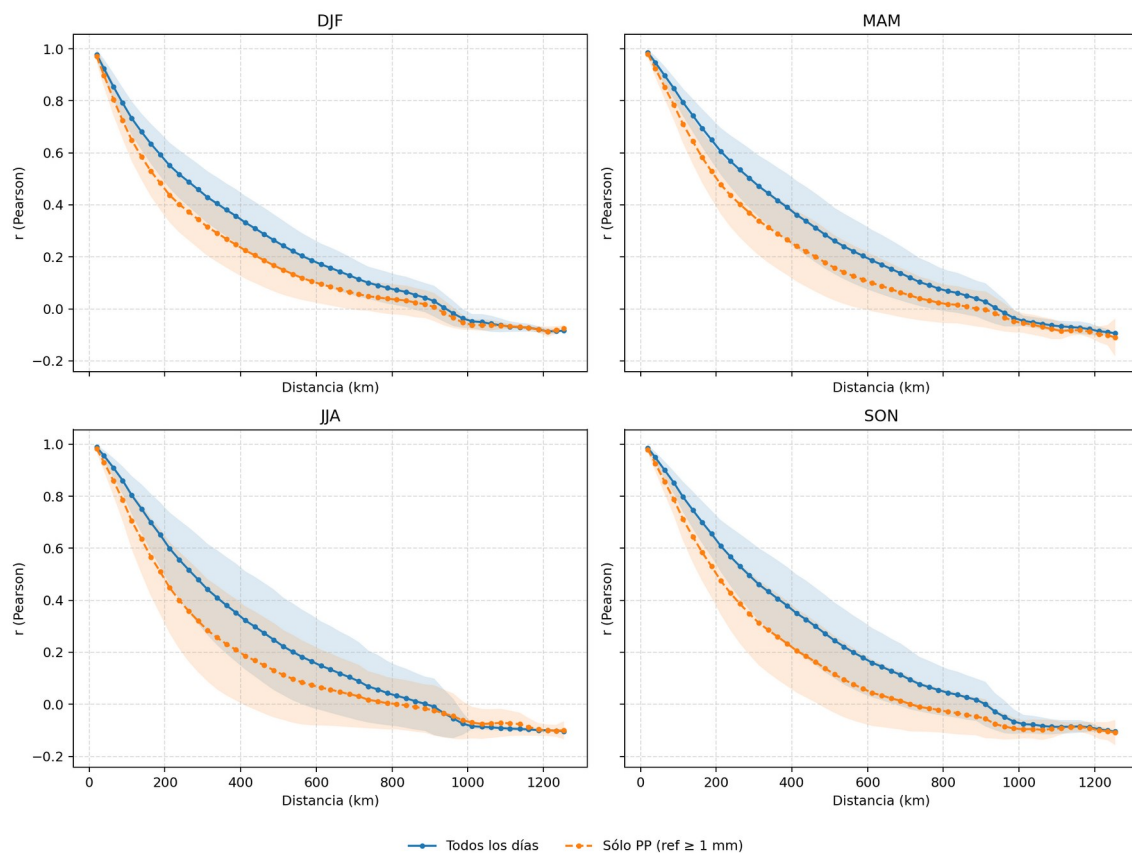


Fig. 3. Correlograma promedio por trimestre. Los puntos azules son las relaciones correlación-distancia considerando todos los días del período mientras que los anaranjados son para los días de precipitación. Las regiones sombreadas indican el umbral de 1 desviación estándar.

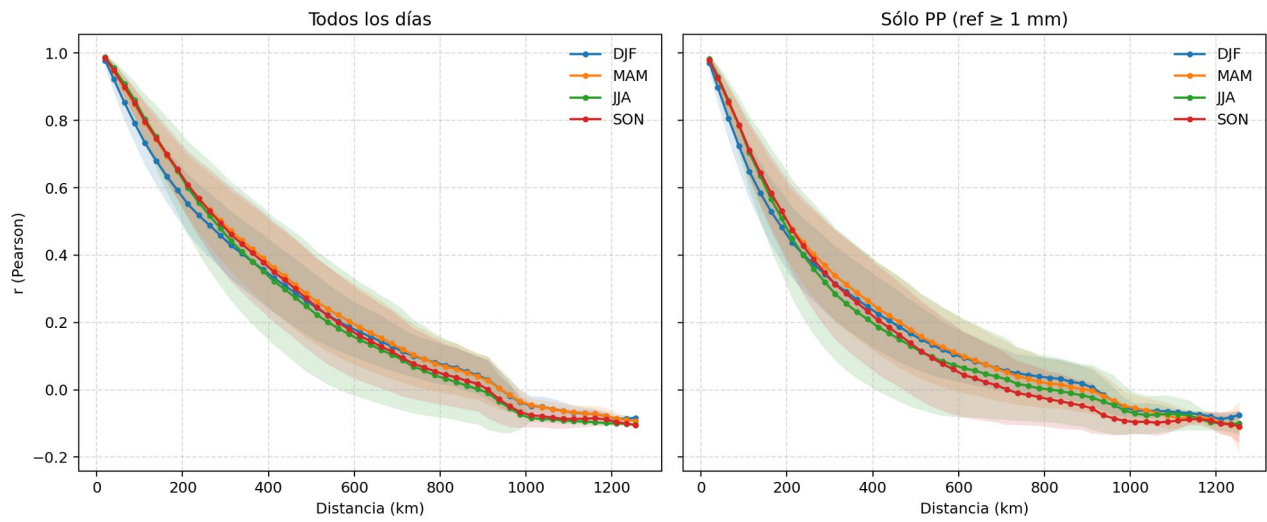


Fig. 4. Correlograma promedio y desviación estándar por trimestre.

3.4 Longitud de decorrelación

A partir del ajuste $r(d)=e^{-d/L}$, se estimó la longitud característica L para cada estación. Los valores obtenidos se presentan en la siguiente figura y tabla.

Estación	L (sólo PP $\geq$ 1 mm)	L (todos los días)
DJF (verano)	268 km	357 km
MAM (otoño)	289 km	389 km
JJA (invierno)	260 km	366 km
SON (primavera)	274 km	380 km

Tabla 1. Distancias de decorrelación para los diferentes trimestres.

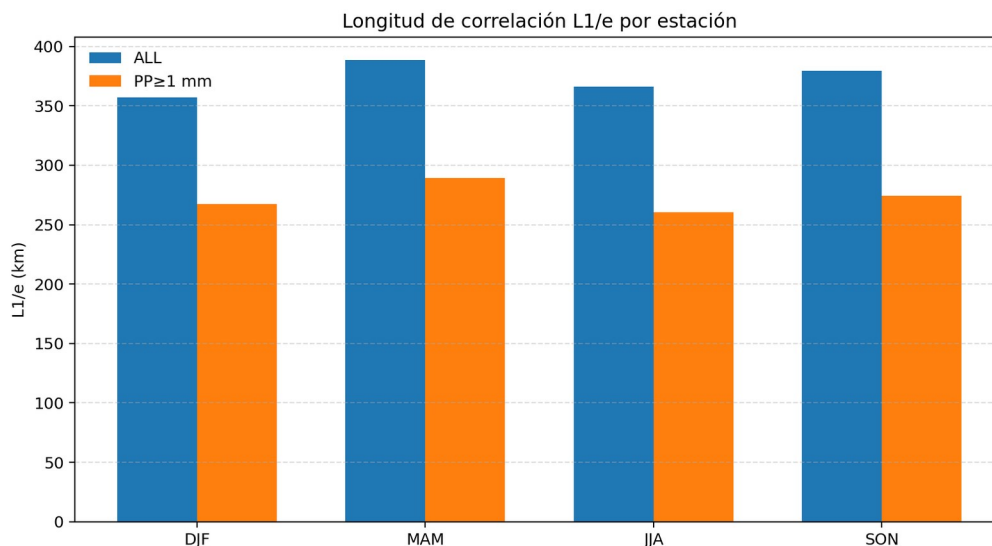


Fig. 5. Distancias características de decorrelación.

El rango de L se ubica entre 260 y 380 km, con un máximo en otoño tanto en todo el período como en los días de lluvia mientras que el mínimo considerando únicamente días de lluvia es en invierno pero cuando se considera todo el período el mínimo se encuentra en verano. Estos valores coinciden con los estimados por Van Leth et al. (2021) para precipitaciones diarias (~260 km).

Las diferencias entre estaciones son pequeñas, lo que sugiere una coherencia espacial similar durante todo el año. Esto no implica que los sistemas convectivos asociados al verano sean de escala similar a los frontales, sino que considerando todo el día los eventos convectivos suceden en muchos puntos del país a la vez.

3.5 Ajuste exponencial

La figura 6 muestra las relaciones correlación-distancia promedio para cada trimestre y la curva exponencial que mejor se ajusta. Se observa que los ajustes representan bien a los datos hasta distancias de 600 km aproximadamente.

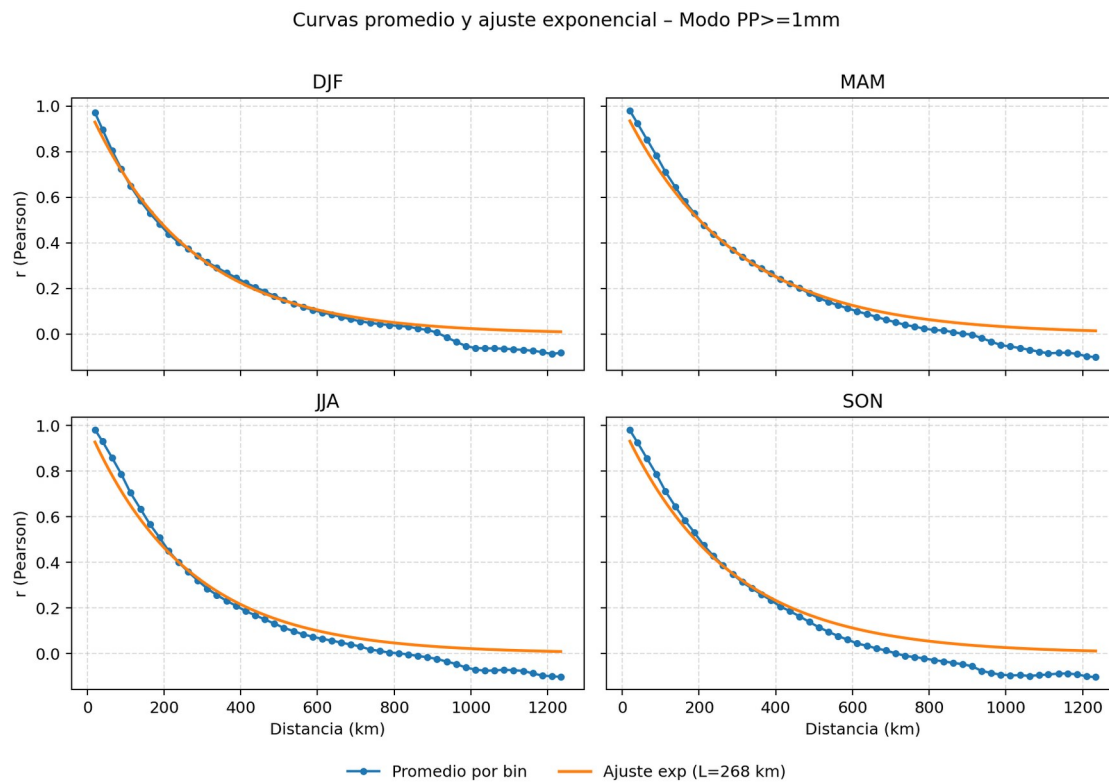


Fig. 6. Distancias características de decorrelación.

3.6 Síntesis general

- La correlación espacial de la precipitación diaria en Uruguay disminuye exponencialmente con la distancia, validando el uso de la función $r(d)=e^{-d/L}$.
- La longitud característica L de los días con precipitación se mantiene estable en torno a 270 km, con leves diferencias estacionales.
- Otoño presenta la mayor coherencia espacial, aunque las diferencias son poco significativas.
- El ajuste exponencial se ajusta de manera adecuada a los datos.

6. Conclusiones y recomendaciones.

Los análisis realizados a partir de los datos diarios de ERA5-Land (2003-2024) permiten caracterizar la coherencia espacial de la precipitación sobre Uruguay.

Las correlaciones medias decrecen de forma clara con la distancia, y el modelo exponencial $r(d)=e^{-d/L}$ describe adecuadamente ese decaimiento para todas las estaciones.

Los valores obtenidos de la longitud de decorrelación característica L se ubican en el rango de 260–390 km, dependiendo de la estación y del modo de cálculo.

Las curvas promedio muestran un comportamiento muy similar entre estaciones, con una ligera tendencia a mayores coherencias en otoño, aunque las diferencias son pequeñas.

Estos valores son coherentes con los reportados por Van Leth et al. (2021) para escalas diarias (≈ 260 km). Esto sugiere que los sistemas frontales que afectan a Uruguay suelen extenderse cientos de kilómetros mientras que los sistemas convectivos que son de menor escala se caracterizan por ocurrencia simultánea (en el mismo día) en una gran extensión.

La comparación entre modos confirma que, al considerar sólo los días con lluvia efectiva ($PP \geq 1$ mm), la correlación espacial disminuye ligeramente, ya que se eliminan los días secos coincidentes que tienden a incrementar artificialmente la correlación.

En términos prácticos, los resultados permiten cuantificar la escala espacial típica de la lluvia diaria y ofrecen una base objetiva para varias aplicaciones:

- Definición de regiones coherentes dentro del dominio del CEGH, utilizando distancias de ~ 260 km como referencia para delimitar áreas de comportamiento similar.
- Construcción de escenarios estocásticos de caudal: el parámetro L puede emplearse para generar perturbaciones espaciales realistas en los campos de precipitación o para agrupar puntos en los modelos de predicción.
- Validación de pronósticos regionales mediante la comparación de sus escalas de coherencia frente a las observadas en ERA5-Land.

7. Bibliografía

- Muñoz Sabater, J. (2019). ERA5-Land hourly data from 1981 to present. *Copernicus climate change service (C3S) climate data store (CDS)*, 10(10.24381).
- Robusto, C. C. (1957). The cosine-haversine formula. *The American Mathematical Monthly*, 64(1), 38-40.
- van Leth, T. C., Leijnse, H., Overeem, A., & Uijlenhoet, R. (2021). Rainfall spatiotemporal correlation and intermittency structure from micro- γ to meso- β scale in the Netherlands. *Journal of Hydrometeorology*, 22(8), 2227-2240.