
Reporte de Actividad 2.3.2

Comportamiento temporal de los caudales

Proyecto

C-INV-AG-007

Modelación hidrológica de cuencas incorporando las mejores prácticas agrícolas en el cultivo de palma de aceite

Autores

Andrea Zabala
Carlos Ricardo Bojacá

Área de Geomática

Cenipalma

Septiembre 2026

1. Introducción

La actividad 2.3.2 complementa temporalmente el análisis espacial de la actividad 2.3.1 y se centra en caracterizar **cómo varían en el tiempo** los caudales en las subcuencas estudiadas. Mientras que 2.3.1 respondió a la pregunta “¿dónde hay agua y cuánta?” mediante promedios del período completo, esta actividad responde a “¿cuándo hay agua y cómo varía?”, abordando dos escalas temporales:

- **Escala mensual (régimen estacional):** identificación del patrón de distribución intra-anual de caudales, incluyendo los períodos de aguas altas y de estiaje.
- **Escala interanual:** cuantificación de la variabilidad año a año, identificación de tendencias de largo plazo y evaluación del efecto de las fases del ENSO (El Niño y La Niña) sobre los caudales.

Comprender el comportamiento temporal de los caudales es esencial para la planificación del riego en las plantaciones de palma de aceite, ya que los períodos de menor oferta coinciden con las épocas de mayor demanda evapotranspirativa del cultivo. Los resultados de esta actividad, junto con los de 2.3.1, alimentan el balance entre oferta y demanda de la actividad 2.3.3.

2. Metodología

2.1. Alcance y supuestos

- Las cifras “de cuenca” son promedios aritméticos de los COMIDs estratégicos de cada cuenca, no el caudal en un punto de la red; dependen de la selección de COMIDs de la actividad 2.2.1.
- Las tendencias se evalúan COMID a COMID y se reportan con corrección por comparaciones múltiples (Holm y Benjamini-Hochberg).
- El modelo corre con parámetros y números de curva constantes; el único forzante que varía en el tiempo es el clima (precipitación y temperatura), de modo que las series simuladas no incorporan cambios de uso del suelo ni de cobertura.
- La clasificación de fases ENSO proviene del ONI de la NOAA; cada año recibe la fase dominante entre sus meses.

2.2. Unidad de análisis y agregación por cuenca

Todas las estadísticas se calculan primero por COMID sobre la serie diaria simulada del período 1985 a 2023 (39 años). Las cifras “de cuenca” que se presentan son **promedios aritméticos de los 28 COMIDs estratégicos** de cada cuenca (3 en Aracataca, 13 en Frío-Sevilla y 12 en Fundación), no el caudal en un punto de la red: describen una subcuenca típica y dependen de la selección de COMIDs realizada en la actividad 2.2.1. Los COMIDs tienen tamaños y posiciones distintos y varios están anidados, por lo que estos promedios sirven para comparar regímenes y estacionalidad, no para cuantificar volúmenes de la cuenca (para eso, ver 2.3.1).

2.3. Estadísticas de climatología mensual

Para cada COMID y mes del año se calcularon las estadísticas multianuales del caudal diario: media aritmética, mediana, percentiles 25 y 75, valores mínimo y máximo, y coeficiente de

variación mensual. Estas estadísticas se promediaron por cuenca para obtener la climatología representativa de cada sistema fluvial.

2.4. Análisis de variabilidad interanual y ENSO

El caudal medio anual de cada COMID se expresó como anomalía porcentual respecto a la media del período completo:

$$A_i = \frac{Q_i - \bar{Q}}{\bar{Q}} \times 100 \quad (1)$$

donde Q_i es el caudal medio del año i y $\bar{Q}$ el promedio de los 39 años. Para evaluar el efecto del ENSO se usaron los registros mensuales del Índice Oceánico de El Niño (ONI) de la NOAA, descargados con la función `download_oni()` del paquete `rsoi` de R. El ONI clasifica cada trimestre móvil como fase cálida (El Niño), fría (La Niña) o neutra según el promedio de anomalías de temperatura superficial del mar en la región Niño 3.4. Para asignar una fase anual se tomó la fase dominante (moda) entre los meses clasificados de cada año. Del período 1985 a 2023 resultaron 8 años Niño, 12 años Niña y 19 años neutros.

2.5. Análisis de tendencias (Mann-Kendall)

Se aplicó el test no paramétrico de Mann-Kendall a la serie de caudales medios anuales de cada COMID para detectar tendencias monótonas de largo plazo. El estadístico τ de Kendall indica la dirección y magnitud de la tendencia. Como se realizan 28 pruebas, una por COMID, el resultado se reporta con el nivel $\alpha = 0.05$ sin corregir y con dos correcciones por comparaciones múltiples: Holm, que controla la probabilidad de al menos un falso positivo en el conjunto de las 28 pruebas, y Benjamini-Hochberg (BH), que controla la proporción esperada de falsos descubrimientos. Bajo la hipótesis nula se esperan 1.4 rechazos espurios en 28 pruebas al 5 %.

Conviene tener presente que el modelo hidrológico corre con parámetros y números de curva constantes en el tiempo (actividad 2.2.2). Una tendencia en la serie simulada solo puede provenir del forzante climático (precipitación y temperatura); el modelo no representa cambios de uso del suelo ni de cobertura.

2.6. Índice de irregularidad estacional

Para cuantificar la amplitud del régimen estacional se calculó el cociente de irregularidad mensual, definido como la razón entre el caudal medio del mes más húmedo y el del mes más seco de la climatología de cuenca:

$$C_{irr} = \frac{Q_{\text{mes máx}}}{Q_{\text{mes mín}}} \quad (2)$$

Valores elevados de este cociente indican regímenes con marcada estacionalidad, lo que implica mayores retos para la gestión del recurso hídrico durante los meses de estiaje.

3. Resultados

3.1. Régimen estacional: patrón bimodal y estacionalidad marcada

La Figura 1 presenta la climatología mensual de caudales para cada cuenca. Las tres cuencas exhiben un régimen bimodal característico de la región Caribe colombiana, con dos períodos de aguas altas, mayo-junio (primer pico) y septiembre-noviembre (segundo pico, el más pronunciado),

separados por una recesión relativa en julio-agosto (“veranillo de San Juan”) y un estiaje principal entre diciembre y marzo.

En términos cuantitativos, los contrastes estacionales son considerables (Tabla 1). **Frío-Sevilla exhibe la mayor irregularidad estacional**: su caudal medio de marzo equivale al 12 % del de noviembre, frente al 18 % en Aracataca y el 18 % en Fundación. Esta amplitud es particularmente desfavorable para el abastecimiento de las plantaciones de palma concentradas en esa cuenca.

Tabla 1: Caudal medio mensual máximo y mínimo de la climatología de cada cuenca (promedio de sus COMIDs estratégicos) y cociente de irregularidad. Período 1985 a 2023.

Cuenca	Mes máximo	Q (m ³ /s)	Mes mínimo	Q (m ³ /s)	C _{irr}
Aracataca	noviembre	40.1	marzo	7.1	5.6
Frío-Sevilla	noviembre	10.9	marzo	1.3	8.2
Fundación	noviembre	34.3	marzo	6.3	5.4

La amplitud del rango intercuartílico (banda sombreada en la figura) varía según la cuenca y la estación: es más estrecha durante el estiaje, lo que indica que los caudales bajos son consistentes año tras año, y más amplia durante los picos húmedos, que concentran la variabilidad interanual.

Régimen estacional de caudales (1985–2023)

Banda: percentiles 25–75 · Línea continua: media · Línea punteada: mediana

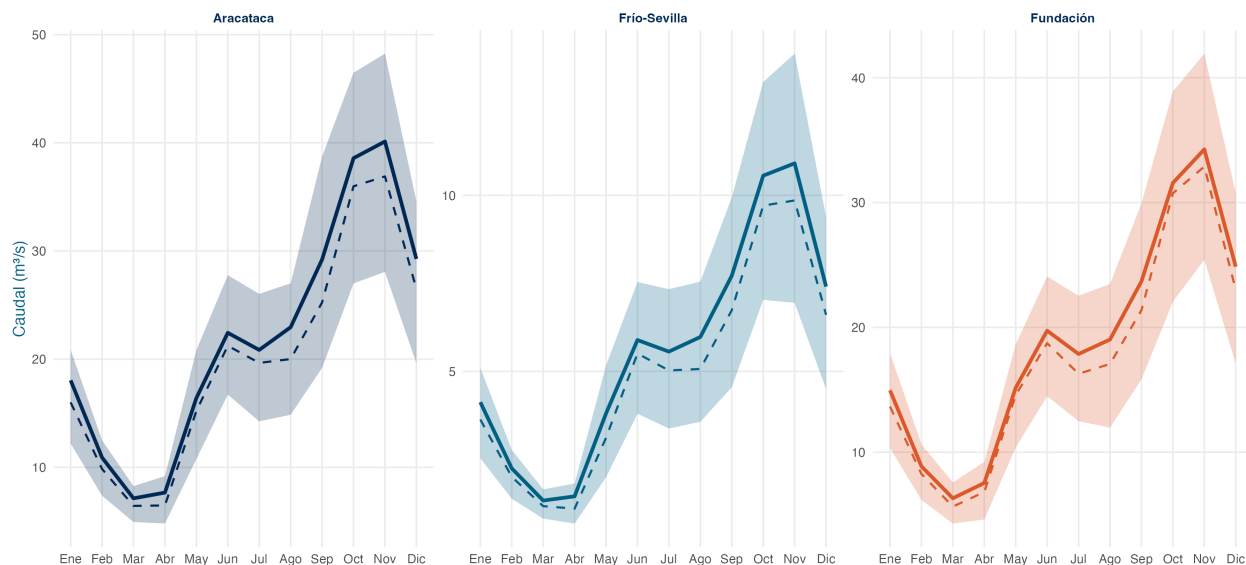


Figura 1: Régimen estacional de caudales por cuenca (promedio de los COMIDs estratégicos). La banda sombreada representa el rango intercuartílico (P25 a P75), la línea continua el caudal medio y la línea punteada la mediana mensual multianual. Período 1985 a 2023.

La Figura 2 complementa el análisis mostrando la frecuencia de días con caudal superior a la media del COMID por mes. Este indicador confirma la estructura bimodal: en las tres cuencas la frecuencia supera el 50 % entre junio y diciembre, con un leve descenso en julio, mientras que entre enero y mayo cae por debajo del 30 %. Marzo presenta la frecuencia más baja (0 % a 1 % según la cuenca): prácticamente todos los días de ese mes registran caudales inferiores al promedio anual.

Patrón estacional: frecuencia de caudales sobre la media

Porcentaje de días por mes con caudal superior al promedio del COMID

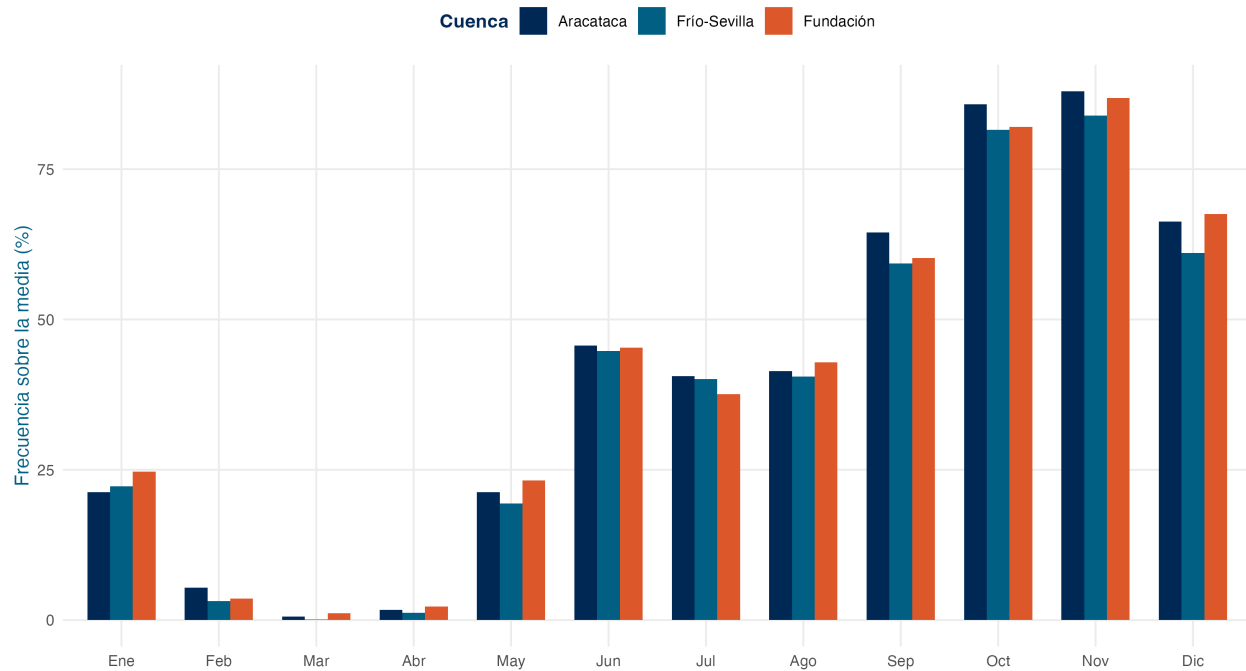


Figura 2: Frecuencia de días con caudal superior a la media del COMID por mes y cuenca. Valores inferiores al 50 % indican predominio de caudales por debajo del promedio anual.

3.2. Variabilidad interanual y efecto del ENSO

La Figura 3 muestra la serie de anomalías anuales de caudal clasificadas por fase ENSO. El patrón es claro: los años La Niña se asocian sistemáticamente con anomalías positivas y los años El Niño con anomalías negativas. El año 2023, clasificado como Niño, fue el más seco del período en las tres cuencas, con anomalías de -63 % (Aracataca), -64 % (Frío-Sevilla) y -59 % (Fundación). En el extremo opuesto, las mayores anomalías positivas se registraron en 2011 en Aracataca (97 %), 2010 en Frío-Sevilla (84 %) y 2010 en Fundación (83 %), durante el evento La Niña de 2010 y 2011.

La magnitud de estas oscilaciones tiene implicaciones prácticas directas: en un año seco extremo como 2023, el caudal medio anual se redujo a poco más de un tercio del valor normal, lo que compromete la oferta hídrica para todos los usos.

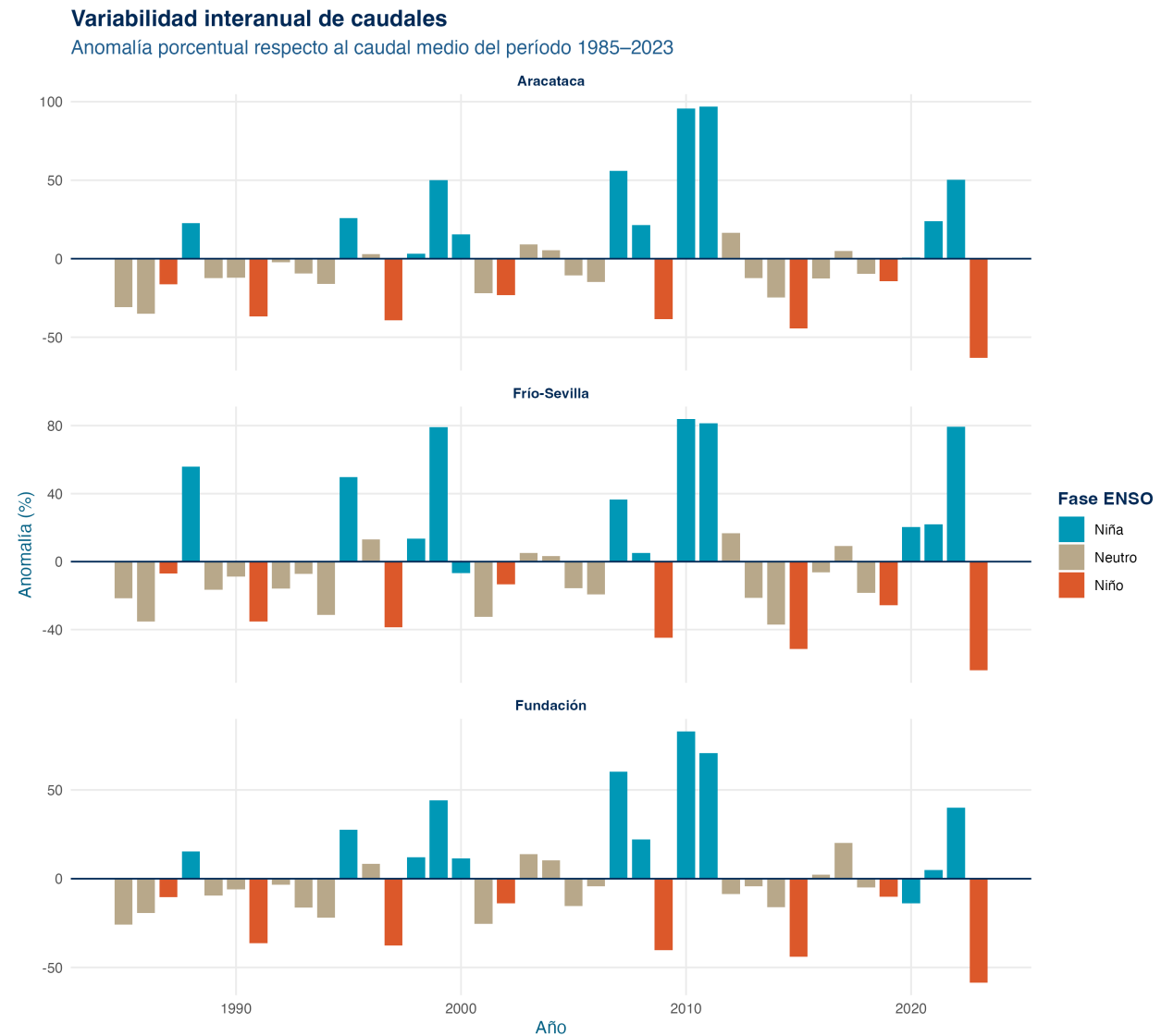


Figura 3: Anomalías porcentuales del caudal medio anual por cuenca (promedio de los COMIDs estratégicos), clasificadas por fase ENSO. El año 2023 registró las anomalías negativas más extremas del período.

La Figura 4 complementa el análisis mediante diagramas de caja del caudal medio anual por fase climática. Conviene distinguir el efecto promedio de cada fase del efecto de un año extremo (Tabla 2): en promedio, los años La Niña presentan caudales entre 40 % y 53 % superiores a los de los años neutros, los años El Niño entre 25 % y 27 % inferiores, y la diferencia entre ambas fases es de 88 % a 110 %. El año 2023 está muy por debajo del promedio de su fase. La dispersión dentro de cada fase indica que la magnitud del impacto varía de un evento a otro, por lo que la planificación del riego no debe basarse en un único escenario promedio de El Niño sino considerar el rango de severidad observado.

Tabla 2: Caudal medio anual por fase ENSO (m^3/s , promedio de los COMIDs estratégicos de cada cuenca) y diferencias relativas entre fases. Período 1985 a 2023.

Cuenca	Niña	Neutro	Niño	Niña vs Neutro	Niño vs Neutro	Niña vs Niño
Aracataca	30.4	19.9	14.5	+53 %	-27 %	+110 %
Frío-Sevilla	7.7	5.0	3.8	+53 %	-25 %	+104 %
Fundación	24.5	17.5	13.0	+40 %	-26 %	+88 %

Efecto del ENSO sobre los caudales anuales

Distribución por fase climática y cuenca · Período 1985–2023

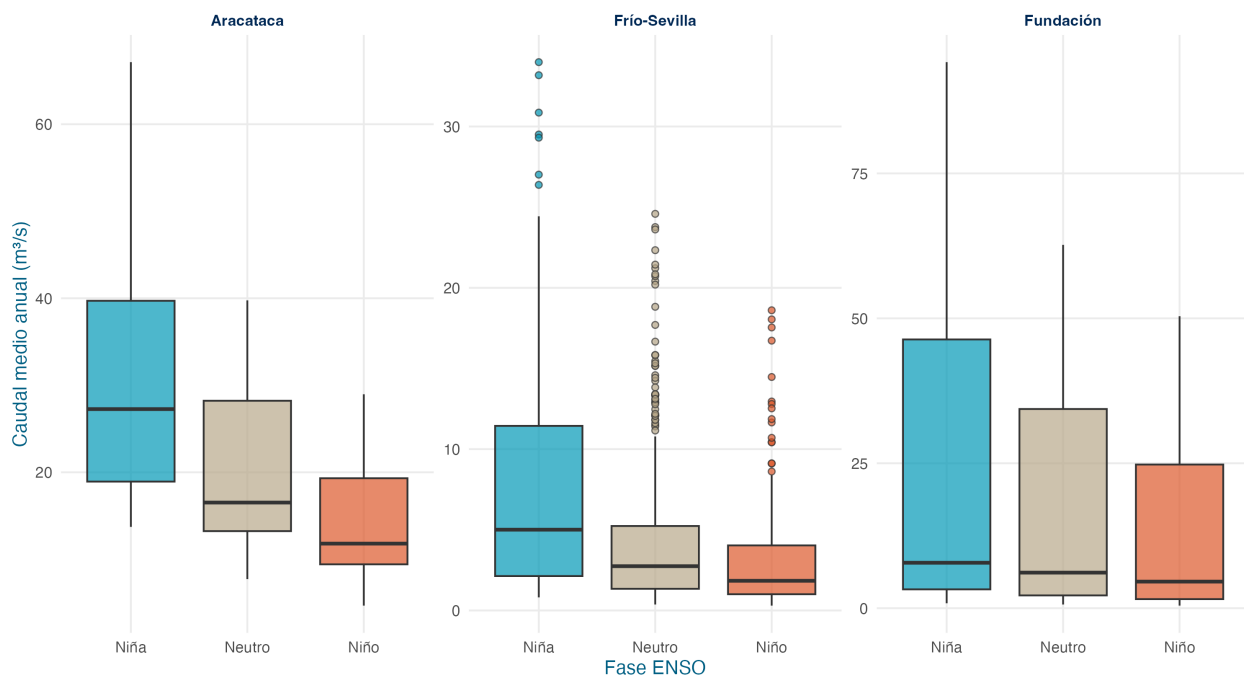


Figura 4: Distribución de caudales medios anuales por fase ENSO y cuenca (un valor por COMID y año). La separación entre las medianas de Niña y Niño muestra la modulación climática de los caudales.

3.3. Tendencias de largo plazo

La Figura 5 presenta el resultado del test de Mann-Kendall sin corregir, tal como se aplica COMID a COMID. Con $\alpha = 0.05$, 27 de los 28 COMIDs no presentan tendencia y 1 la presenta: el COMID 300079400 (Fundación), con $\tau = 0.25$ y $p = 0.026$. Ese resultado no sobrevive la corrección por comparaciones múltiples: con Holm el valor p ajustado es 0.73 y con BH es 0.37, de modo que ningún COMID (0 con Holm, 0 con BH) muestra una tendencia distinguible del azar. Un rechazo aislado en 28 pruebas es, además, lo que se espera bajo la hipótesis nula (1.4 falsos positivos en promedio).

La lectura es la misma para toda el área de estudio: la variabilidad de los caudales simulados en 39 años responde a la oscilación climática interanual, dominada por el ENSO, y no a cambios direccionales del forzante climático en el período. Como el modelo corre con parámetros constantes, la serie simulada no puede reflejar cambios de uso del suelo; cualquier tendencia de ese origen en los caudales observados quedaría fuera de este análisis. Las estadísticas del período 1985 a 2023 constituyen, por tanto, una base razonable para la planificación hídrica, siempre que

se considere la variabilidad asociada al ENSO.

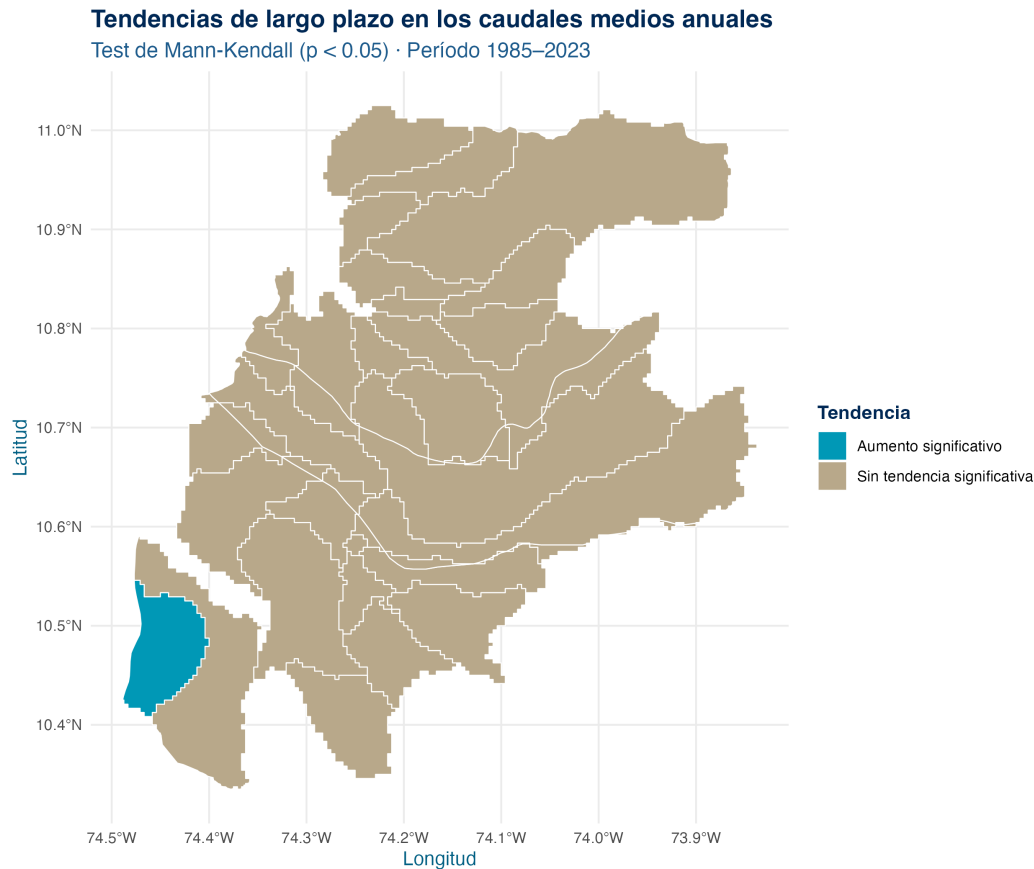


Figura 5: Tendencias en los caudales medios anuales por COMID (test de Mann-Kendall sin corrección por comparaciones múltiples, $\alpha = 0.05$). El único COMID señalado (300079400, Fundación) deja de ser significativo con las correcciones de Holm y BH. Período 1985 a 2023.

3.4. Síntesis: escenario crítico para la palma de aceite

La integración del régimen estacional con la variabilidad interanual permite identificar el escenario de mayor riesgo hídrico: **los meses de enero a marzo durante años El Niño**. En estas condiciones, la reducción estacional (que lleva los caudales a su mínimo anual) se superpone con la reducción interanual asociada a El Niño (en promedio 25 % a 27 % respecto a un año neutro, y hasta 64 % en 2023). Para Frío-Sevilla, cuyo caudal medio de marzo en una subcuenca típica es de 1.3 m³/s en condiciones normales, un año El Niño severo puede reducir ese valor a menos de la mitad.

Aracataca y Fundación, aunque mejor dotadas en términos absolutos, también experimentan reducciones severas durante el estiaje: sus caudales medios de marzo (7.1 y 6.3 m³/s) representan menos de una quinta parte de sus máximos de noviembre.

4. Conclusiones

- Las tres cuencas de estudio presentan un régimen de caudales con patrón bimodal, con dos períodos de aguas altas (mayo-junio y septiembre-noviembre) y un estiaje principal entre diciembre y marzo. El cociente de irregularidad estacional es de 5.6 en

Aracataca, 8.2 en Frío-Sevilla y 5.4 en Fundación.

- La variabilidad interanual está modulada por el ENSO: en promedio, los caudales de los años La Niña superan a los de los años neutros entre un 40 % y un 53 %, y los de los años El Niño quedan entre un 25 % y un 27 % por debajo. El año 2023 fue el más seco del período, con anomalías de –63 % a –64 %.
- El test de Mann-Kendall no detecta tendencias de largo plazo en los caudales simulados de 1985 a 2023: el único COMID con $p < 0.05$ sin corregir deja de serlo con las correcciones de Holm y BH, y coincide con el número de falsos positivos esperado en 28 pruebas. La variabilidad observada corresponde a la oscilación climática natural.
- Las cifras de cuenca de este reporte son promedios de sus COMIDs estratégicos y describen una subcuenca típica; la identificación de los meses y fases climáticas de mayor escasez es el insumo de la actividad 2.3.3, donde se cruzan con las demandas sectoriales para cuantificar el déficit y clasificar la vulnerabilidad de cada subcuenca.