



Patrones de Precipitación asociados a Extremos de Caudal Medio Mensual en la Provincia de Corrientes (Argentina)

Precipitation Patterns Associated with Monthly Mean Discharge Extremes in Corrientes Province (Argentina)

Blanco, Pedro Samuel^{1,2,3} 

¹Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (DCAO). Buenos Aires, Argentina.

²CONICET - Universidad de Buenos Aires. Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA). Buenos Aires, Argentina.

³Instituto Franco-Argentino de Estudios sobre el Clima y sus Impactos (IFAECI) - IRL 3351 - CNRS-CONICET-IRD-UBA. Buenos Aires, Argentina.

pedro.blanco@cima.fcen.uba.ar

Recibido: 29/07/2024

Aceptado: 14/10/2024

RESUMEN

Se caracterizan los patrones de precipitación asociados a extremos de caudal medio mensual en los principales ríos de la Provincia de Corrientes, Argentina (1980-2022). Se utilizaron datos mensuales de caudal medio de seis estaciones de aforo para identificar casos donde el caudal medio fue inferior al percentil 5 (P05) o superior al percentil 95 (P95), definiendo los extremos mediante el criterio de 'picos sobre un umbral'. Estos extremos se clasificaron según su alcance geográfico en localizados, intermedios y generalizados. Con la precipitación mensual del Reanálisis ERA5, se elaboraron campos de anomalías y se agruparon patrones similares mediante el algoritmo de *k-means*. Se detectaron cuatro patrones de precipitación para los extremos localizados, tres para los intermedios y dos para los generalizados. Los caudales inferiores al P05 se relacionan con anomalías pluviométricas negativas y los caudales superiores al P95 con anomalías positivas, aunque esta relación no es lineal debido a factores locales.

Palabras Claves: Percentiles mensuales; Estaciones de aforo; ERA5; Anomalía de precipitación; Excesos y déficits.

ABSTRACT

Precipitation patterns associated with monthly mean discharge extremes in the main rivers of Corrientes Province, Argentina (1980-2022), were characterized. Monthly mean discharge data from six gauging stations were used to identify cases where the monthly mean discharge was below the 5th percentile (P05) or above the 95th percentile (P95), defining the extremes based on the "peaks over threshold" criterion. These extremes were classified by their geographical extent as localized, intermediate, and generalized extremes. Using monthly precipitation data from the ERA5 Reanalysis, anomaly fields were calculated, and similar patterns were grouped with the *k-means* algorithm. Four precipitation patterns were identified for localized extremes, three for intermediate extremes, and two for generalized extremes. Discharges below P05 are

associated with negative precipitation anomalies, while discharges above P95 are linked to positive anomalies. However, this relationship is not linear due to local factors.

Keywords: Monthly percentiles; Gauging stations; ERA5; Precipitation anomaly; Excesses and deficits.

1. Introducción

En las últimas décadas, se ha observado un incremento en la frecuencia de eventos hidrológicos extremos a nivel global (Liu et al., 2021). Este asunto se ha convertido en un tema crucial para el desarrollo ambiental, social y económico sostenible (Zhang et al., 2021), ya que cualquier modificación en el comportamiento normal del escurrimiento fluvial puede restringir las oportunidades productivas y las actividades humanas (Zucarelli, 2013). El aumento de los extremos hídricos está relacionado con cambios en la precipitación y la escorrentía, como se evidencia en una mayor frecuencia, intensidad, duración y extensión espacial de las sequías e inundaciones (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2021). Esto ha conllevado a una intensificación del ciclo hidrológico a gran escala (Camilloni et al., 2020), donde los procesos involucrados tales como la condensación, evaporación, precipitación, escorrentía, entre otros, se producen a un ritmo más rápido.

Los ríos dependen en gran medida de las precipitaciones, por lo que es probable que cambios más acelerados en esta variable puedan producir extremos de caudal con un mayor impacto. Incluso, si esto se combina con la falta de planificación e infraestructura, dichos impactos pueden exacerbarse aún más (Oliveira et al., 2021). Por lo tanto, es crucial contar con un conocimiento científico detallado sobre las características de los caudales extremadamente bajos y altos, como su frecuencia, intensidad, tendencia y extensión espacial, para desarrollar políticas de gestión efectivas dirigidas a la adaptación y mitigación de sus efectos, especialmente en sectores vulnerables a estos fenómenos adversos (Díaz et al., 2018; Meresa et al., 2022). Asimismo, las investigaciones sobre la relación entre las precipitaciones y los extremos hidrológicos son esenciales para establecer sistemas de alerta y pronóstico, fundamentales para reducir los riesgos y prevenir desastres (Marengo et al., 2006).

En la Provincia de Corrientes, ubicada en la región noreste de Argentina, se ha detectado un aumento de las bajantes y una disminución de las crecientes (Blanco, 2022). Sin embargo, los patrones de precipitación vinculados a estos fenómenos, especialmente a los caudales medios que superan determinados umbrales, siguen siendo poco explorados. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es caracterizar los patrones de precipitación asociados a extremos de caudal medio mensual registrados en los principales ríos de la Provincia de Corrientes. En primer lugar, se identifican y analizan estadísticamente los extremos de caudal medio mensual para los cursos fluviales más relevantes del área de estudio durante el período 1980-2022. En segundo lugar, se detectan los patrones de precipitación asociados a estos extremos de caudal medio mensual.

2. Marco teórico y antecedentes

Los ríos exhiben un régimen caracterizado por períodos con caudales inferiores y superiores al módulo, conocidos como bajas y altas aguas, o estiajes y crecientes, respectivamente (Bruniard, 1992; Baeza Sanz et al., 2003; Vincenti, 2004; Fabre et al., 2008; Lozada et al., 2015). Estos períodos son normales en el comportamiento de los cursos fluviales y responden a diversos factores, como la forma de alimentación, la topografía, la vegetación y los cuerpos hídricos, entre otros (Bruniard, 1992). No obstante, cuando los caudales, tanto en períodos de bajas como de altas aguas, adquieren características que impactan significativamente el espacio geográfico en términos de su magnitud, duración, intensidad y/o extensión espacial, se los clasifica como extremos hidrológicos o extremos de caudal. Desde un enfoque estadístico, y siguiendo los lineamientos del IPCC (2021), los extremos de caudal se definen como la ocurrencia de un valor de caudal por encima o por debajo de un umbral específico cercano a los extremos superior o inferior del rango de valores observados. Esto

implica que no siempre los casos que exceden dichos umbrales corresponden a eventos inusuales en términos físicos, sino que representan valores situados por fuera del comportamiento 'normal' de una distribución estadística de datos.

Los extremos hidrológicos afectan tanto al medio natural como a la sociedad (van Kempen et al., 2021), desencadenando desastres costosos con grandes pérdidas económicas y humanas (Carril et al., 2016). Por un lado, los caudales extremadamente bajos reducen drásticamente el suministro de agua en las ciudades ribereñas al comprometer el acceso a las tomas de aguas (Meis y Llano, 2019). Esto no solo limita la disponibilidad de agua para riego y consumo, sino que también interrumpe la navegación y el comercio y reduce la generación de energía hidroeléctrica (Rivera y Penalba, 2018). Por otro lado, los caudales extremadamente altos provocan inundaciones en áreas rurales y urbanas, generando importantes pérdidas económicas a nivel mundial, valuadas en más de 100 mil millones de dólares en promedio (Camilloni et al., 2020). Estas inundaciones traen consigo severos problemas en la salud y movilidad de la población, así como daños irreparables en los cultivos y la ganadería, además de alterar la circulación por carreteras, las instalaciones energéticas y las presas (Merz et al., 2021). A nivel global, las pérdidas económicas debidas a extremos hidrológicos han disminuido ligeramente en el transcurso del siglo XXI, gracias a las estrategias adoptadas por ciertos países para mitigar los efectos nocivos de las sequías e inundaciones (Gao et al., 2019). Sin embargo, persiste la preocupación por la reducción de los caudales bajos y el incremento de los caudales altos, proyectados a futuro para el 10% de la superficie terrestre mundial (Asadieh y Krakauer, 2017). Por consiguiente, el estudio de los cambios en los caudales extremadamente bajos y altos es relevante para respaldar la toma de decisiones en relación con los impactos ambientales y sociales derivados de su ocurrencia (da Silva et al., 2023).

La variabilidad en el régimen de un río está determinada por una serie de factores, siendo la precipitación uno de los más relevantes, ya que sus cambios espaciales y temporales afectan directamente a las descargas de los cursos de agua, la humedad del suelo y la recarga de los acuíferos (Chauluka et al., 2021). Diversos estudios han explorado la relación entre la variabilidad del caudal de los ríos y la precipitación. Wang et al. (2008) encontraron que los cambios más notables del caudal del río Dongjiang en el sur de China se produjeron durante meses con precipitación normal, mientras que los años donde sucedieron precipitaciones extremas tuvieron un impacto menor en el caudal del río estudiado. Esto sugiere que un extremo de caudal mensual, ya sea por exceso o por déficit, no siempre se corresponde con un extremo de precipitación mensual. En un contexto de clima cambiante, Ashraf et al. (2021) concluyeron que los flujos extremadamente bajos a nivel global tendrán una mayor variabilidad en el futuro debido a la presión humana sobre la disponibilidad de recursos hídricos. Marianetti et al. (2018) observaron una disminución en la frecuencia de caudales extremos en los ríos de los Andes centrales argentinos en los últimos 36 años, asociando este fenómeno a intensas nevadas en la década de 1980 y al reciente período de sequía hidrológica. Dethier et al. (2020) detectaron un aumento en la frecuencia de caudales extremadamente bajos en el oeste y sudeste de los Estados Unidos, duplicándose en la actualidad en comparación con los de mediados del siglo XX. Guimberteau et al. (2013) identificaron que, dentro de una misma cuenca, puede haber regiones con aumentos y disminuciones simultáneas del caudal debido a cambios en la precipitación y evapotranspiración.

En los principales ríos de la Cuenca del Plata, ubicada entre los 15°-35°S y los 44°-68°O, se ha registrado un aumento de los caudales medios desde la década de 1970 hasta la actualidad, debido a cambios en la precipitación y los usos del suelo (Clarke, 2006). Por ejemplo, el caudal del Río Paraná se incrementó en un 37% durante el período 1970-2000, resultando en una mayor frecuencia de crecientes extraordinarias, en simultáneo con precipitaciones más intensas en la región desde la década de 1970 (Barros y Camilloni, 2020). No obstante, a finales del siglo XX, también se reportaron bajantes extremas más frecuentes debido a una disminución marcada de los caudales medios, asociada a la regulación de los embalses brasileños (Gómez, 2020). Por ejemplo, un déficit prolongado de precipitaciones sobre alguna región puede dar lugar a una sequía hidrológica, donde los caudales y niveles hidrométricos son excepcionalmente bajos en los ríos, lagos, embalses y acuíferos

subterráneos (Wang et al., 2008). La bajante excepcional del Río Paraná, que se ha extendido desde mediados de 2019 hasta los años siguientes, ha sido catalogada como “histórica” debido a la marcada reducción en los caudales y niveles del agua, alcanzando mínimos de aproximadamente 5.000 m³/s y 2 metros (Blanco, 2022). Este fenómeno se ha atribuido a un prolongado déficit pluviométrico en la Cuenca del Plata (Naumann et al., 2022), con graves repercusiones en los ecosistemas, la navegación y el suministro de agua (Gomes et al., 2021). En situaciones como la anterior, resulta crucial realizar una evaluación de los peligros asociados (Reshmidevi et al., 2018), dado que los impactos pueden ser severos para las comunidades que no siempre están preparadas para afrontarlos (Carril et al., 2016).

3. Materiales y métodos

3.1. Área de estudio

La Provincia de Corrientes, ubicada hacia el noreste de la República Argentina, se caracteriza por una riqueza hidrológica inigualable (Figura 1a). En su superficie aproximada de 88.200 km², esta provincia cuenta con una compleja red de ríos y cuerpos de agua, que están interconectados tanto en superficie como en capas más profundas, y que se distribuyen a lo largo y ancho del territorio.

La red de drenaje superficial se organiza en dos grandes sistemas de vertientes con dos colectores principales: los ríos Paraná y Uruguay. Estos cursos de agua, considerados alóctonos por su origen en otras regiones de Sudamérica, recogen los caudales de los ríos autóctonos de la provincia y tienen un desagüe exorreico, ya que desembocan en el Río de la Plata, el cual tiene su salida al Mar Argentino y al Océano Atlántico Sur. Por un lado, el Paraná recorre el norte y oeste de la provincia con un escurrimiento predominante de este a oeste, que luego cambia drásticamente a norte-sur cerca de los 59°O, recogiendo los derrames de algunos ríos autóctonos (Santa Lucía, Corriente y Guayquiraró) y arroyos menores (Itaembe, Riachuelo, Empedrado, San Lorenzo, Ambrosio, etc.). Por otro lado, el Uruguay discurre sus aguas al este de Corrientes en sentido noreste-suroeste, recibiendo los caudales de algunos ríos importantes (Aguapey, Miriñay, Timbó y Mocoretá) y arroyos más pequeños (Chiminay, Garabí, Yohazá, etc.).

Debido a la distribución espacial de la red de drenaje, la provincia exhibe diferentes sistemas hidrográficos (Figura 1a), definidos en función de las líneas divisorias de aguas, entre los cuales destacan los sistemas Santa Lucía (7.430 km²), Corriente (29.670 km²), Guayquiraró (7.510 km²), Aguapey (8.050 km²), Miriñay (12.700 km²) y Mocoretá (2.288 km²). En el noroeste de la provincia se ubican varios sistemas de arroyos que desembocan en el Paraná, mientras que entre los sistemas Aguapey, Miriñay y Mocoretá se hallan cuencas de ríos cortos y arroyos que desaguan en el Uruguay. Algunos de los ríos correntinos cuentan con numerosos afluentes, resultando en cuencas más extensas a diferencia de otros ríos con menos afluentes. Por ejemplo, los ríos Miriñay y Corriente presentan tributarios de considerables dimensiones, como el arroyo Curuzú Cuatiá que desemboca en el Miriñay o los arroyos Batel y Batelito que desaguan en el Corriente. Otros ríos como el Aguapey o el Santa Lucía poseen pocos afluentes, aunque se advierte la presencia de bañados y esteros. Además, en la provincia se encuentra un sistema hidrográfico complejo, donde se interconectan varios ríos importantes, como el Guayquiraró que recibe las aguas del Barrancas que, a su vez, recibe los derrames del Sarandí.

En el centro-norte de Corrientes se ubica un vasto sistema de humedales conocido como los ‘Esteros del Iberá’, que se extiende sobre una superficie aproximada de 12.000 km² (alrededor del 14% del total del territorio). Además, la provincia tiene una gran cantidad de lagunas y bañados poco profundos, que se alimentan principalmente de la precipitación y albergan una vegetación adaptada a su entorno húmedo.

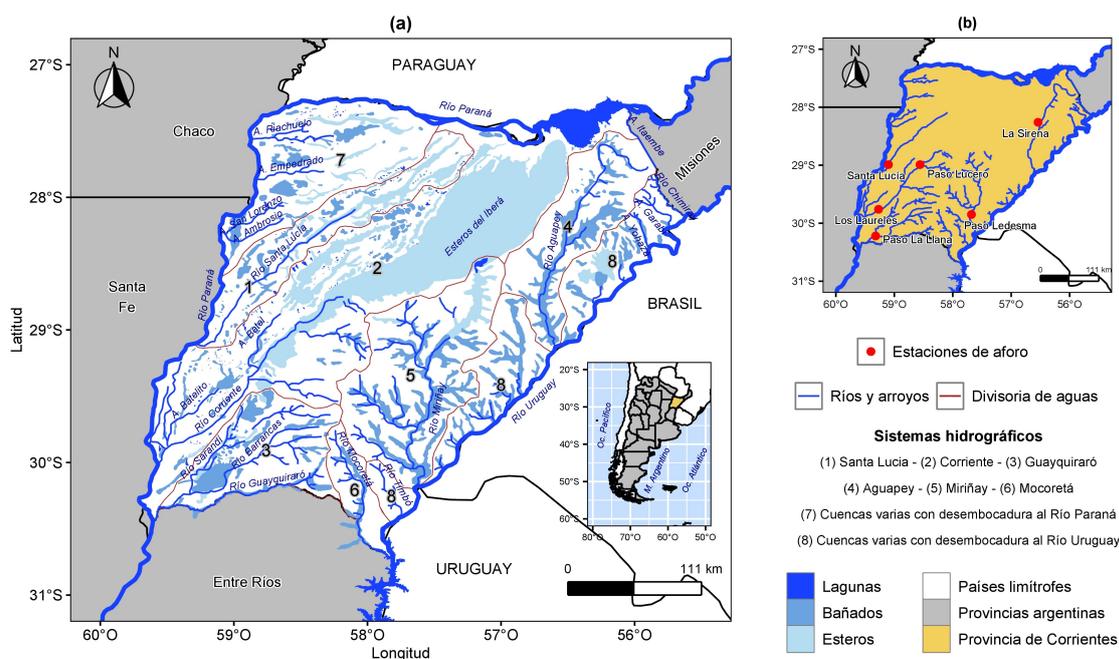


Figura 1. a. Red hidrográfica y delimitación aproximada de las principales cuencas de la Provincia de Corrientes; b. Localización de las estaciones de aforo de los principales ríos de la provincia.

Fuente: Elaboración propia.

3.2. Datos hidrológicos

Se utilizaron datos mensuales de caudal medio para seis estaciones de aforo, ubicadas en de los principales ríos de la Provincia de Corrientes (Figura 1b), durante el período comprendido entre septiembre de 1979 y agosto de 2023. Estos datos fueron extraídos del sitio web del Sistema Nacional de Información Hídrica [SNIH], (2023), dependiente de la Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica del Ministerio de Obras Públicas de la Nación. Anterior al procesamiento de las series, se llevó a cabo un control de calidad de las mismas que consistió en la corrección de cifras atípicas, la detección y relleno de datos faltantes, y la normalización del formato de presentación. En relación al control de calidad, se seleccionaron las estaciones de aforo según la disponibilidad y confiabilidad de los datos de caudal medio mensual, priorizando al menos una estación representativa para cada río principal de la provincia (Tabla 1). Siguiendo estos criterios, se seleccionó a Paso Lucero, La Sirena y Paso Ledesma, a pesar de la ausencia de datos en los años 1985-1987, 1980-1986 y 1988, respectivamente. En contraste, se excluyeron del estudio a los ríos Guayquiraró y Mocoretá debido a la escasez de datos disponibles. Del mismo modo, los ríos Paraná y Uruguay fueron desestimados por pertenecer a cuencas hidrográficas extensas, con nacientes fuera de la provincia, y por tener regímenes hidrológicos no condicionados exclusivamente por las precipitaciones en Corrientes.

Tabla 1. Estaciones de aforo seleccionadas para los principales ríos de la Provincia de Corrientes.

Nº	Estación	Río	Coordenadas	Altura (m)
3.836	Santa Lucía	Santa Lucía	28°59'47'' S, 59°06'07'' O	60
3.803	Paso Lucero	Corriente	28°59'40'' S, 58°33'41'' O	40
3.821	Los Laureles	Corriente	29°45'25'' S, 59°13'01'' O	35
3.810	Paso La Llana	Barrancas	30°13'02'' S, 59°19'27'' O	24
3.811	La Sirena	Aguapey	28°25'00'' S, 56°32'31'' O	55
3.804	Paso Ledesma	Miriñay	29°50'45'' S, 57°40'30'' O	55

Fuente: Elaboración propia.



3.3. Datos climáticos

Los acumulados mensuales de precipitación se extrajeron de la base de datos de Reanálisis ERA5, para analizar sus patrones espaciales en la provincia durante el período 1980-2022. Esta base proporciona datos en un reticulado de $0,25^\circ$ latitud x $0,25^\circ$ longitud (<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home>), los cuales fueron re-muestreados a una mayor resolución espacial ($0,01^\circ$ latitud x $0,01^\circ$ longitud), utilizando el método de regresión bilineal simple. ERA5 emplea una técnica de asimilación de datos donde combina información de modelos con observaciones de todo el mundo, formando un conjunto de datos globalmente completo basado en las leyes de la física (Arshad et al., 2021). Este reanálisis es uno de los más utilizados a nivel global, destacándose en estudios sobre condiciones hidroclimáticas y cambios en el ciclo del agua (Mahto y Mishra, 2019).

3.4. Métodos estadísticos

Antes de analizar los patrones de precipitación asociados a extremos de caudal medio mensual (Q, de aquí en adelante), se examinó el comportamiento hidrológico promedio de los ríos de la provincia. Se elaboraron hidrogramas para mostrar la variación del caudal a lo largo del año, permitiendo identificar los períodos de bajas y altas aguas, o estiajes y crecientes respectivamente, mediante el cálculo del módulo anual (promedio de los caudales medios mensuales). Se empleó el año hidrológico, que se extiende desde septiembre hasta agosto del año siguiente en el área de estudio (Vich et al., 2014), en contraste con el año calendario convencional (de enero a diciembre). Para cuantificar el grado de variabilidad intra-anual o estacional del caudal de los ríos, se construyó un índice de variabilidad de caudal medio (IVQ) que consiste en el cociente entre el caudal medio mensual máximo y mínimo. Este índice es adimensional y los valores alejados de la unidad indican una mayor variabilidad entre los caudales medios mensuales, ya que expresa cuántas veces el caudal medio más alto superó al caudal medio más bajo.

Tras explorar el comportamiento promedio del caudal, se definieron los extremos de caudal medio mensual para los diferentes ríos de la provincia, utilizando el criterio de 'picos sobre un umbral'. Este método selecciona los casos que superan un límite previamente establecido, permitiendo incluir una gran cantidad de datos para el análisis, lo cual es especialmente útil cuando los registros son limitados (Bačová-Mitková y Onderka, 2010) y resulta apropiado para el estudio de la frecuencia de extremos hidroclimáticos en cuencas pequeñas que responden rápidamente a la precipitación (Clarke, 2006). La selección del umbral debe ser un proceso equilibrado, donde el valor elegido sea lo suficientemente alto para identificar los extremos en una distribución estadística, pero lo más bajo posible para incluir la mayor cantidad de casos (Bezák et al., 2014; Far y Wahab, 2016). Considerando la distribución estadística de los caudales medios mensuales para cada río correntino, se establecieron como umbrales los percentiles mensuales 5 (P05) y 95 (P95) para cada mes del año durante el período 1980-2022. Para cada estación de aforo, se identificaron los meses en los que el caudal medio fue inferior al P05 ($Q < P05$) o superior al P95 ($Q > P95$), y se caracterizaron estos extremos mediante un análisis estadístico de la distribución de datos para cada estación por separado. Se destaca que los extremos detectados no necesariamente se corresponden con eventos reales de los ríos, tales como bajantes o crecientes extraordinarias, ya que los datos utilizados son promedios y representan valores que se encuentran por fuera del comportamiento 'normal' de una distribución estadística. Por lo tanto, un caudal medio mensual superior al P95 no indica precisamente la ocurrencia de una creciente extraordinaria, ya que este fenómeno podría manifestarse en una escala temporal diaria, del mismo modo que un caudal medio mensual inferior al P05 no implica una bajante extrema porque la misma podría desarrollarse a lo largo de varios meses.

En diferentes estaciones de aforo, se detectaron extremos de caudal medio mensual simultáneamente. Por lo tanto, si uno de estos extremos se registró en seis estaciones al mismo tiempo, podría considerarse como un caso en el que los caudales medios mensuales superaron un umbral específico, con un alcance geográfico considerable (carácter generalizado). En contraste, cuando los caudales medios mensuales superaron el umbral establecido en una sola estación y no en las demás, se trata de un caso particularmente puntual (carácter

localizado). Para sintetizar la información y analizar su extensión espacial, se clasificaron los extremos de caudal medio mensual según la cantidad de estaciones que los registraron: (1) *Caudal medio mensual extremo de alcance localizado* (cuando 1 estación de aforo ha registrado un caudal medio mensual inferior al P05 o superior al P95, sin que se haya registrado el mismo caso en otra estación); (2) *Caudal medio mensual extremo de alcance intermedio* (cuando 2 o 3 estaciones de aforo han registrado un caudal medio mensual inferior al P05 o superior al P95, de manera simultánea en el mismo mes y año); (3) *Caudal medio mensual extremo de alcance generalizado* (cuando 4, 5 o 6 estaciones de aforo han registrado un caudal medio mensual inferior al P05 o superior al P95, de manera simultánea en el mismo mes y año).

Para los diferentes tipos de extremos ($Q < P05$ y $Q > P95$) y sus alcances geográficos (localizado, intermedio y generalizado), se elaboraron composiciones (campos medios) de la precipitación a nivel provincial, utilizando los datos del Reanálisis ERA5. Estas composiciones se realizaron para cada mes del año, considerando la variación del caudal a lo largo del año según los hidrogramas. Posteriormente, se calcularon las anomalías de la precipitación restando la composición mensual de cada caso con respecto al campo climatológico mensual (período 1980-2022). Las anomalías negativas indican déficits de precipitación, mientras que las positivas corresponden a excesos de precipitación.

Se empleó el algoritmo no supervisado de *k-means* para agrupar los meses con patrones similares de anomalías de precipitación para cada tipo de extremo y sus alcances geográficos. Esta técnica estadística clasifica los datos (o campos) en función de un número representativo (k) de grupos o 'clústeres' no jerarquizados. Dentro de cada clúster, se minimizan las variaciones internas, mientras que se maximizan las diferencias entre los clústeres (Pike y Lintner, 2020), de tal forma que la asignación de un dato a un clúster dado se basa en la distancia al centroide más cercano (Abbas, 2008). Para calcular estas distancias en un espacio multidimensional, se utilizó la distancia euclidiana entre los datos (vectores) y los centroides (valores medios de los datos dentro de los grupos), repitiendo este proceso en 2.000 iteraciones para asegurar la convergencia (Carvalho et al., 2016). Para cada tipo de extremo y sus alcances geográficos, se determinó la cantidad de grupos o clústeres mediante el Método del Codo (Cui, 2020; D'Silva y Sharma, 2020; Permadi et al., 2023), que implica representar gráficamente la suma de las distancias de los datos a sus centroides (WCSS, Within Clusters Sum of Squares) en función de diferentes números de clústeres. En el gráfico resultante, se identifica un punto de inflexión donde la disminución de WCSS deja de ser significativa, lo que indica el número óptimo de clústeres (Deka y Saha, 2023).

4. Resultados

4.1. Regímenes hidrológicos medios

Los hidrogramas de caudales medios mensuales para diferentes ríos de Corrientes se muestran en la Figura 2. En general, los ríos de Corrientes presentan módulos anuales o caudales medios anuales que varían entre 55,5 y 268,2 m³/s (Tabla 2). Por ejemplo, los ríos Santa Lucía (64,4 m³/s en Santa Lucía) y Barrancas (55,5 m³/s en Paso la Llana) registran módulos más bajos respecto al río Corriente (179,9-268,2 m³/s). Incluso, este último curso exhibe diferentes valores dentro de la misma área drenada, ya que los derrames más bajos se dan en la alta cuenca (179,9 m³/s en Paso Lucero) y los más altos en la baja cuenca (268,2 m³/s en Los Laureles). En cuanto a los ríos con vertiente al Uruguay, los valores anuales oscilan entre 78,9 y 153,6 m³/s, siendo más alto para el Miriñay (153,6 m³/s en Paso Ledesma) en comparación con el Aguapey (78,9 m³/s en La Sirena). En un entorno donde se producen períodos de sequía seguidos de excesos de lluvia estacionales, el escurrimiento de agua es constante durante todo el año (Bruniard, 1992).

Los ríos correntinos muestran un similar comportamiento estacional del caudal, caracterizado por cuatro fases hidrológicas: dos de altas aguas y dos de bajas aguas. Para estos casos, se observan dos máximos (uno a comienzos del verano y otro a mediados del otoño) y dos mínimos (uno a mediados/finales del verano y

otro durante el invierno o principios de la primavera). Se destaca que el hidrograma del río Barrancas en Paso La Llana presenta una variabilidad similar a los demás cursos, pero sólo se dan dos fases (una de altas aguas desde enero hasta mayo y otra de bajas aguas desde julio hasta diciembre). Algunos factores como la topografía, el tipo de suelo y la vegetación también influyen en estos patrones, promoviendo el lento flujo del agua, la infiltración y la pérdida de caudal en grandes cantidades. Además, los numerosos esteros y bañados regulan el temperamento hidrológico de los ríos, alimentándolos durante el período de déficit pluviométrico (invierno) y retrasando los máximos débitos por el proceso de recarga del suelo durante las épocas lluviosas (otoño y primavera) (Vincenti, 2015; Pyszczyk, 2016). Aunque el verano presenta una alta evaporación y menor precipitación, los humedales ayudan a mantener los máximos de caudal en niveles moderados durante esta época (Capitanelli, 1992), tal como se observa en los hidrogramas de Paso Lucero, Los Laureles, Santa Lucía y Paso Ledesma (Figura 2).

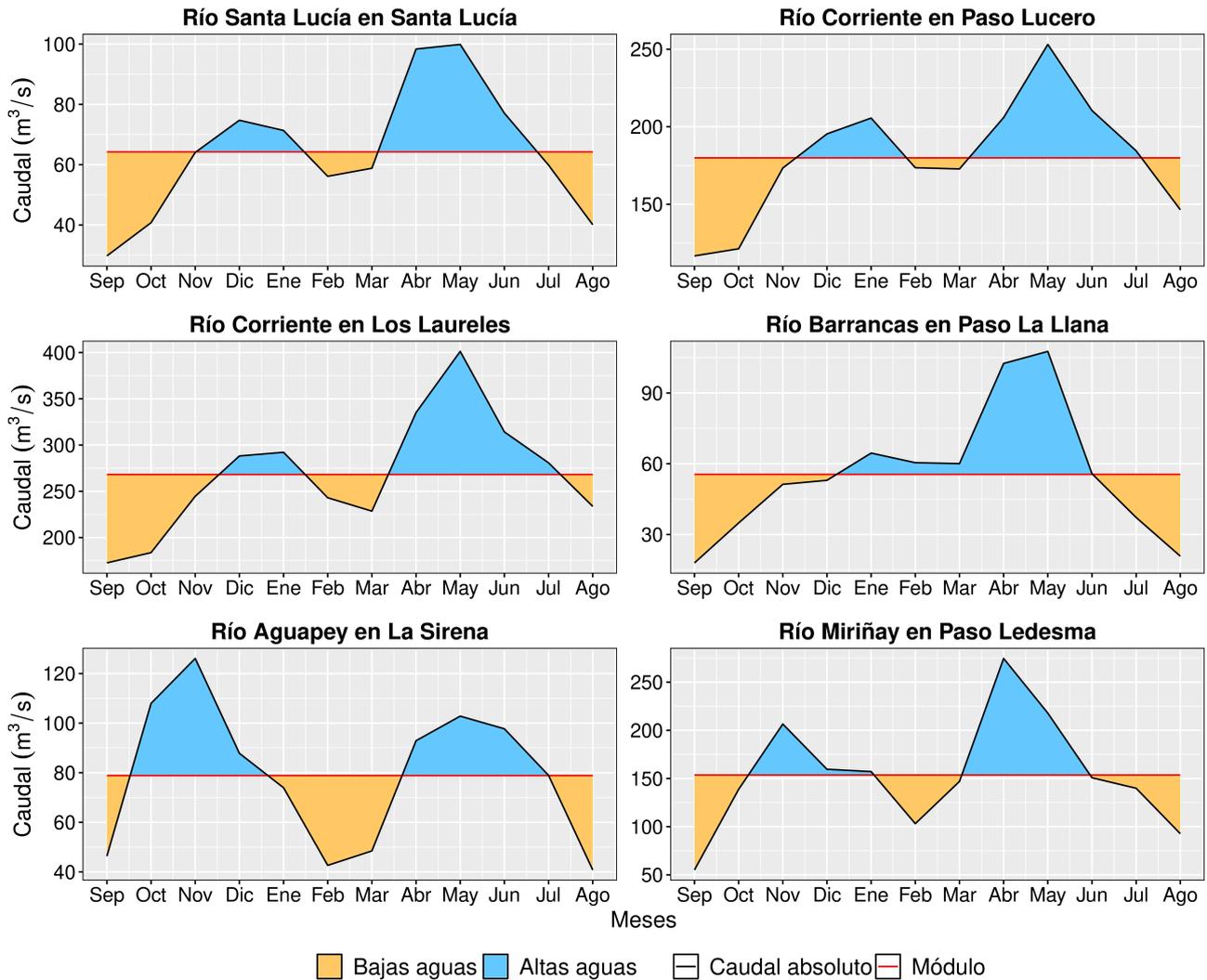


Figura 2. Hidrogramas de los principales ríos de la Provincia de Corrientes (promedio del período 1980-2022).

Fuente: Elaboración propia con base en datos extraídos del SNIH (2023).

La Tabla 2 presenta los caudales medios mensuales máximos y mínimos, así como los correspondientes IVQ, para cada estación de aforo analizada. El río Corriente posee los caudales medios mínimos más altos (entre 116,7 y 172,9 m³/s) en comparación con los demás ríos, cuyos valores medios mínimos oscilan entre 17,9 y 55,1 m³/s. Los caudales medios mensuales máximos más altos se dan en los ríos Corriente y Miriñay (entre 253,1 y 401,2 m³/s), mientras que los demás cursos fluviales registran máximos

caudales medios entre 100 y 107,7 m³/s. En cuanto a la variabilidad intra-anual, el IVQ indica que el río Corriente tiene la menor variación (2,2-2,3), seguido por los ríos Santa Lucía y Aguapey (3,1-3,4). Finalmente, los ríos Miriñay y Barrancas exhiben la mayor variabilidad con IVQ entre 5 y 6.

Tabla 2. Módulo anual o caudal medio anual (Q anual), caudales medios mensuales mínimo (Q min) y máximo (Q max), e índice de variabilidad de caudal medio (IVQ) por estación de aforo.

Estación	Río	Q _{anual} (m ³ /s)	Q _{min} (m ³ /s)	Q _{max} (m ³ /s)	IVQ
Santa Lucía	Santa Lucía	64,2	29,8	100,0	3,4
Paso Lucero	Corriente	179,9	116,7	253,1	2,2
Los Laureles	Corriente	268,2	172,9	401,2	2,3
Paso La Llana	Barrancas	55,5	17,9	107,7	6,0
La Sirena	Aguapey	78,9	40,8	126,1	3,1
Paso Ledesma	Miriñay	153,6	55,1	274,6	5,0

Fuente: Elaboración propia con base en datos extraídos del SNIH (2023).

4.2. Estadística de extremos de caudal medio mensual

La distribución estadística de los caudales medios mensuales inferiores al P05 (Q < P05) y superiores al P95 (Q > P95) para cada estación de aforo por separado se presenta en la Figura 3 La frecuencia de casos para los Q < P05 por estación varía entre 24 y 58 meses, con el menor número en Paso Lucero y el mayor en Paso Ledesma. En promedio, los caudales fluctúan entre 0 y 15 m³/s, con el valor más bajo en Paso La Llana y el más alto en Los Laureles. Asimismo, se observan rangos intercuartílicos entre 1 y 13 m³/s. Para las seis estaciones analizadas, las distribuciones de los datos son asimétricas a la derecha (coeficientes de asimetría entre 0,6 y 2,5) y leptocúrticas (coeficientes de curtosis entre 2,5 y 10). Esto indica que los caudales medios mensuales inferiores al P05 son más bajos en relación a lo que regularmente se registra.

Para los Q > P95, la frecuencia por estación varía entre 24 y 36 meses, destacándose Santa Lucía y Paso La Llana con los valores más altos en comparación con las demás estaciones. En general, los caudales medios oscilan entre 250 y 1.000 m³/s y exhiben distribuciones asimétricas sesgadas a la derecha (coeficientes de asimetría entre 0,4 y 1) y leptocúrticas (coeficientes de curtosis entre 2,3 y 3,9), pero que tienden a ser simétricas y mesocúrticas en comparación con las distribuciones de los Q < P05. Los rangos intercuartílicos para los Q > P95 son más grandes en todas las estaciones (entre 145 y 465 m³/s), con respecto a los rangos intercuartílicos de los Q < P05. Por lo tanto, el 50% de los datos de caudales centrados alrededor del promedio tienen una mayor dispersión en los Q > P95, indicando una mayor probabilidad de ocurrencia de valores más diversos durante este tipo de extremo.

Para algunas estaciones se identificaron caudales atípicos (outliers), es decir, casos que se encuentran por fuera del comportamiento normal en las distribuciones de los datos extremos. Por ejemplo, para los Q < P05, se registraron cinco outliers en Paso Ledesma, cuatro en La Sirena y solo uno en las estaciones Santa Lucía, Paso Lucero y Paso La Llana. Estos casos particulares ocurrieron en diferentes meses y años dentro del período de estudio, por lo que no se encontró un patrón en su momento de ocurrencia. Por el contrario, para los Q > P95, se observaron seis outliers (dos en Los Laureles y uno para cada estación entre Santa Lucía, Paso Lucero, Paso La Llana y Paso Ledesma), los cuales sucedieron en años específicos (cuatro casos en 1998, uno en 1996 y otro en 1992), algunos de ellos en abril y otros en mayo.



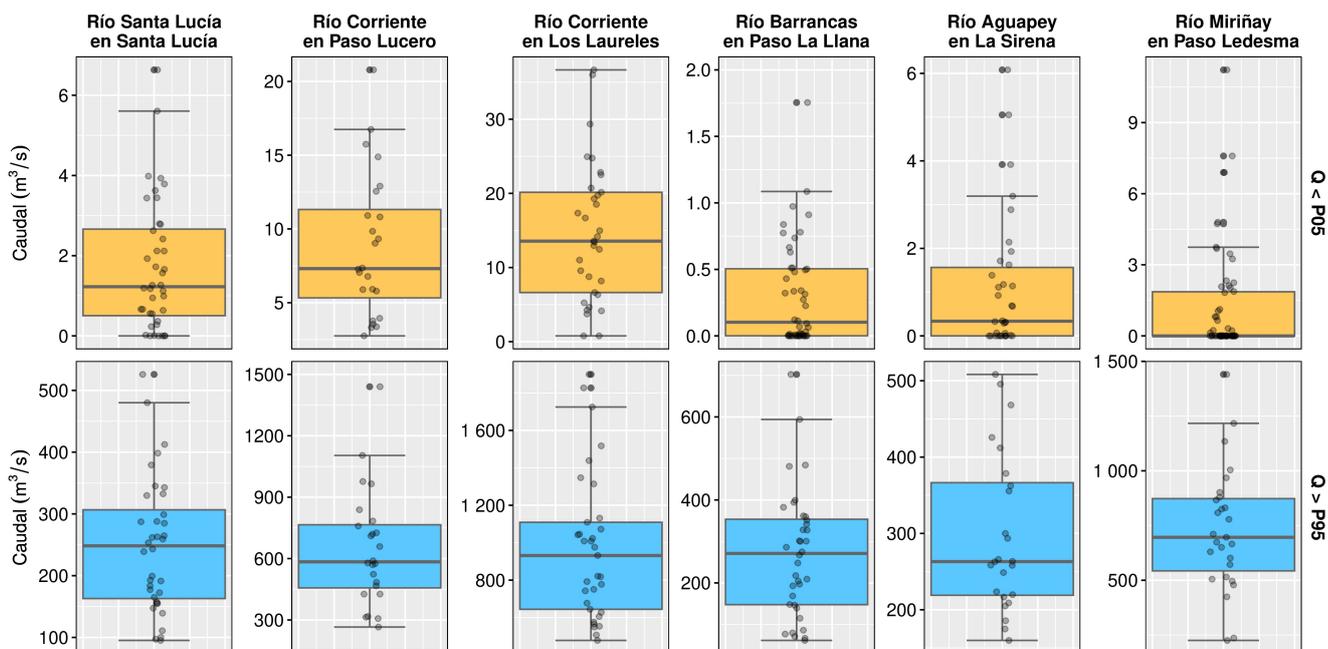


Figura 3. Boxplot de caudales medios mensuales inferiores al P05 ($Q < P05$) y superiores al P95 ($Q > P95$) por estación de aforo para el período 1980-2022.

Fuente: Elaboración propia con base en datos extraídos del SNIH (2023).

4.3. Análisis de la frecuencia de extremos de caudal medio mensual

El análisis de los boxplot resumió el comportamiento estadístico de los extremos de caudal medio mensual (inferiores al P05 y superiores al P95) para cada estación sin considerar el momento de ocurrencia. Por esta razón, se examinó la frecuencia de casos para cada mes y para la serie de años hidrológicos. Se destaca que, si un tipo de extremo ($Q < P05$ o $Q > P95$) fue registrado en el mismo momento (mes y año) por dos o más estaciones, este caso se consideró como uno solo.

La Figura 4 muestra la frecuencia mensual de caudales medios mensuales inferiores al P05 y superiores al P95 para el período comprendido entre septiembre de 1979 y agosto del 2020. Por un lado, los $Q < P05$ se observan en todos los meses con frecuencias entre 7 y 13 casos. En marzo, se advierte una de las frecuencias más altas, que luego disminuye rápidamente hasta junio. A partir de este mes, los valores vuelven a incrementarse en julio y agosto, y decrecen ligeramente en los meses siguientes, pero siempre manteniéndose por encima de 7 casos hasta enero donde se da la mínima frecuencia. Por otro lado, los $Q > P95$ exhiben un único máximo de frecuencia en septiembre (11 casos), que posteriormente disminuyen hasta febrero y marzo con los valores más bajos (5 casos), para luego incrementarse progresivamente hasta julio (10 casos).

Según los regímenes de los ríos de la provincia, se advierte que los casos de $Q < P05$ no están necesariamente asociados a los períodos de bajas aguas, ni los casos de $Q > P95$ con los períodos de altas aguas. Por ejemplo, todos los ríos correntinos experimentan, en promedio, sus bajas aguas en septiembre, pero en este mes se produjo la mayor frecuencia de $Q > P95$, es decir, caudales extremadamente altos en términos estadísticos.

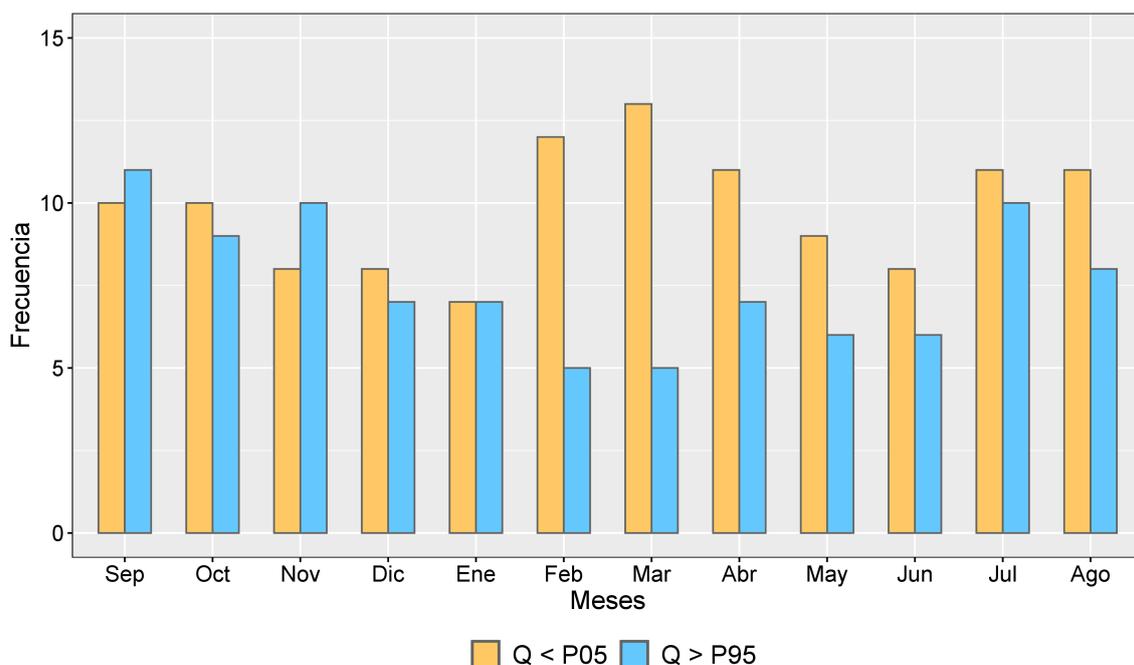


Figura 4. Frecuencia mensual de caudales medios mensuales inferiores al P05 ($Q < P05$) y superiores al P95 ($Q > P95$) para el período comprendido entre septiembre de 1979 y agosto del 2020.

Fuente: Elaboración propia con base en datos extraídos del SNIH (2023).

La Figura 5 muestra la variación temporal de la frecuencia de caudales medios mensuales inferiores al P05 y superiores al P95 durante el período comprendido entre los años hidrológicos desde 1979-1980 hasta 2022-2023. En general, estos tipos de extremos tienen una relación inversa estadísticamente significativa, con coeficiente de correlación de Pearson de -0.601 ($p\text{-value: } 1,58 \times 10^{-05}$). Por ejemplo, desde mediados de la década del 2000 hasta mediados de la década del 2010, se observa una drástica disminución de los $Q > P95$, pero se advierte un aumento significativo de los $Q < P05$. Sin embargo, a fines de la década del 2010, se incrementaron los meses con $Q > P95$ y decrecieron los casos con $Q < P05$, o prácticamente no se registran. Finalmente, desde el año hidrológico 2019-2020 en adelante, hay más meses con $Q < P05$ a comparación de los meses con $Q > P95$.

A lo largo del período de estudio de 44 años (1980-2022), se registraron caudales medios mensuales inferiores al P05 en 29 años y superiores al P95 en otros 29 años. En el primer caso, hubo 9 años con $Q < P05$ observados entre 6 y 10 meses por año, mientras que, en el segundo caso, se advirtieron 6 años con $Q > P95$ detectados entre 6 y 9 meses por año. Las mayores frecuencias de meses con $Q < P05$ se concentraron a partir de mediados de la década del 2000, destacándose los períodos 2008-2009 y 2010-2011 con valores entre 9 y 10 meses. Por otro lado, la frecuencia más alta de meses con $Q > P95$ ocurrió principalmente en 1997-1998 con 9 meses con caudales medios por encima de dicho umbral, pero también hubo tres años consecutivos (2014-2015, 2015-2016 y 2016-2017) donde los caudales medios superaron al P95 entre 5 y 7 meses para cada año hidrológico.



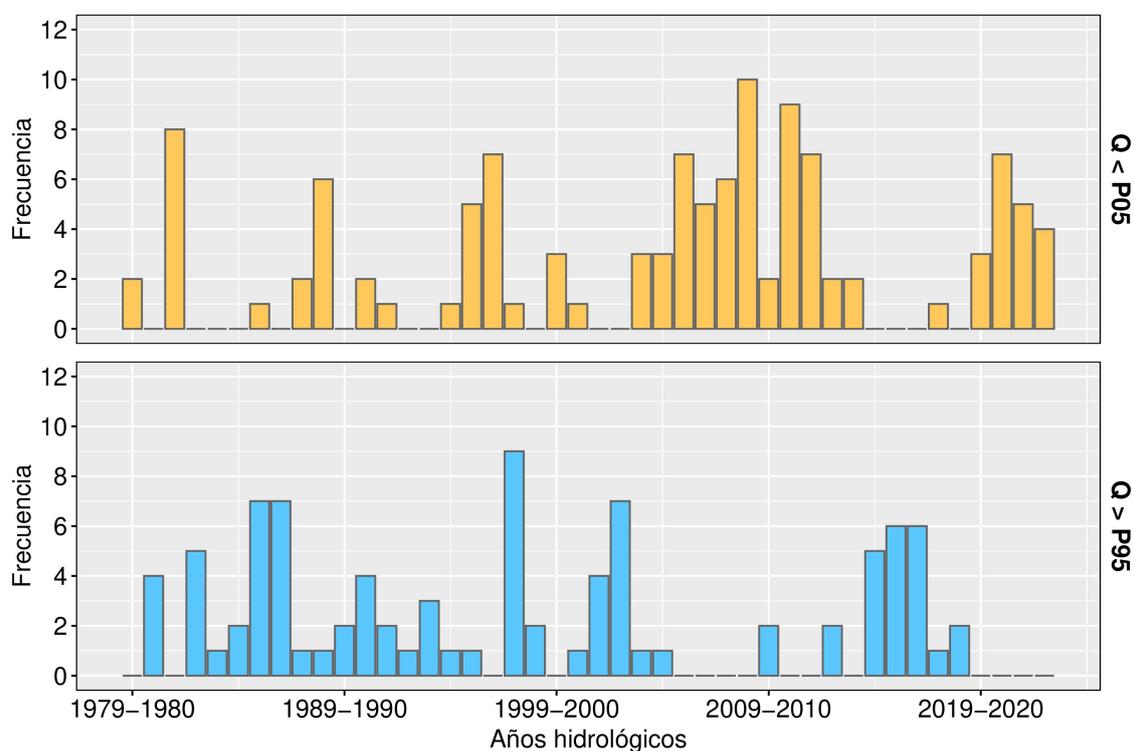


Figura 5. Series temporales de frecuencia anual de caudales medios mensuales inferiores al P05 ($Q < P05$) y superiores al P95 ($Q > P95$) por año hidrológico (período comprendido entre 1979-1980 y 2022-2023).

Fuente: Elaboración propia con base en datos extraídos del SNIH (2023).

Hasta ahora, la frecuencia de los tipos de extremos se cuantificó sin considerar cuántas estaciones los detectaron. Esto implica que un mes con caudal medio que superó un determinado percentil ($Q < P05$ o $Q > P95$) pudo haber sido identificado por una sola estación de aforo, mientras que otro mes con el mismo tipo de extremo pudo haber sido observado por dos o más estaciones. Por ello, se examinó la frecuencia de caudales medios mensuales inferiores al P05 y superiores al P95 en función del número de estaciones que los registraron, abarcando el período 1980-2022 (Figura 6).

La frecuencia de meses para cada tipo de extremo disminuye a medida que aumenta el número de estaciones. Alrededor del 50-53% de los casos se concentra en una sola estación, y estas proporciones decrecen al considerar dos o más estaciones. Del total de casos para cada extremo, entre un 31 y 38% fueron identificados por dos o tres estaciones, mientras que entre un 12 y 16% fueron detectados por cuatro, cinco o seis estaciones. Esto sugiere que un extremo de caudal medio mensual (ya sea menor al P05 o mayor al P95) puede tener diferentes alcances geográficos. Por ejemplo, si dicho extremo es identificado simultáneamente por seis estaciones distribuidas en el territorio provincial, podría estar asociado a un proceso de escala generalizada, mientras que un extremo registrado por una sola estación podría estar relacionado con un proceso de escala localizada.

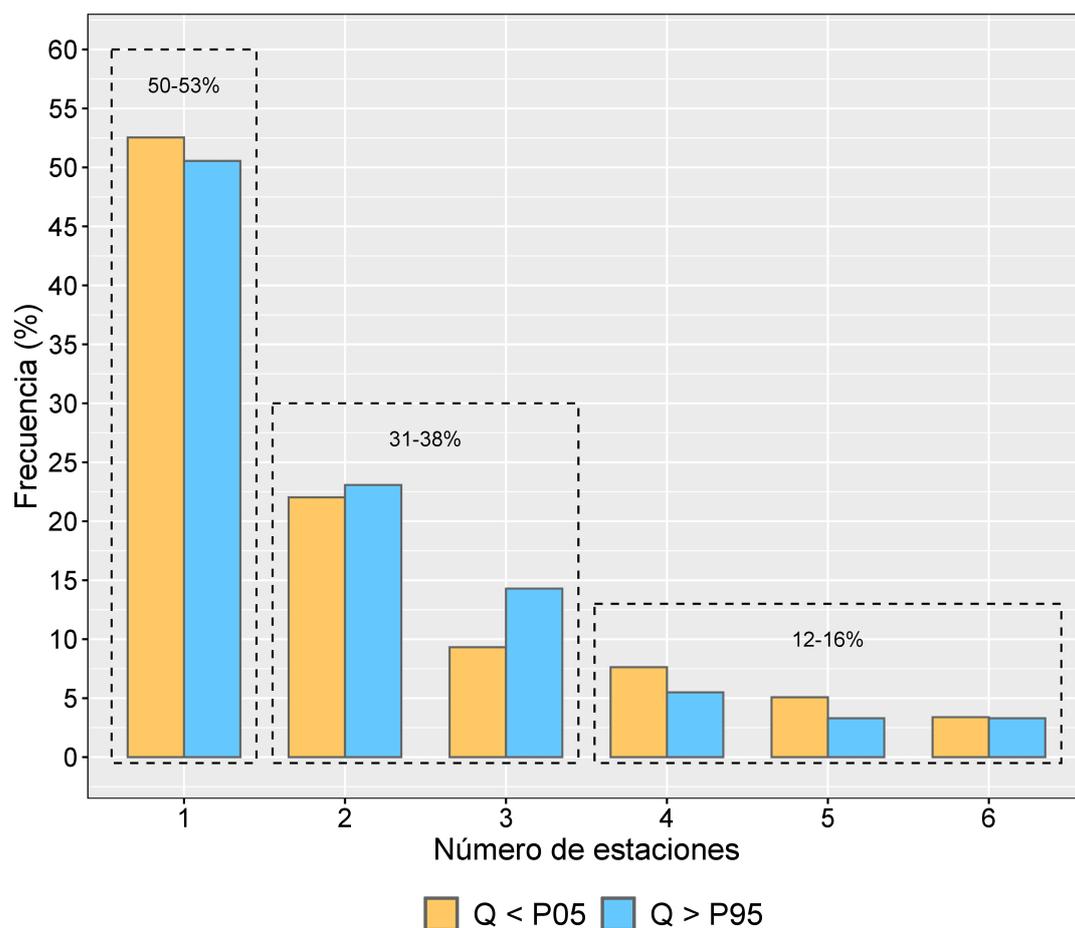


Figura 6. Frecuencia porcentual de caudales medios mensuales inferiores al P05 ($Q < P05$) y superiores al P95 ($Q > P95$) por número de estaciones de aforo para el período septiembre/1979-agosto/2020. Los porcentajes dentro del gráfico indican la frecuencia acumulada de $Q < P05$ o $Q > P95$, sumando los valores encerrados en las líneas negras discontinuas. Fuente: Elaboración propia con base en datos extraídos del SNIH (2023).

A partir de los criterios definidos en la Sección 3.4, se agruparon los extremos de caudal medio mensual según el número de estaciones. En la Tabla 3, se exhibe la frecuencia mensual de caudales medios inferiores al P05 ($Q < P05$) y superiores al P95 ($Q > P95$), discriminados por el alcance geográfico. En general, ambos tipos de extremos muestran una mayor cantidad de casos localizados durante casi todos los meses del año en comparación con las demás situaciones, lo que podría considerarse como casos normales dentro de los extremos. Por otro lado, los extremos de alcance intermedio también se observan en gran parte del año, aunque hay un mes sin registros de casos (en abril, tanto para los $Q < P05$ como para los $Q > P95$). Los extremos generalizados presentan frecuencias entre 1 y 3 casos por mes, pero los $Q < P05$ se encuentran en diez meses (de octubre a febrero y de abril a agosto), a diferencia de los $Q > P95$ que se concentran en siete meses (de diciembre a junio). A pesar de su menor frecuencia, los extremos generalizados son importantes debido a su extensión geográfica, ya que pueden afectar gran parte de la provincia. Por ejemplo, desde abril hasta agosto del 2009, entre cuatro y seis estaciones de aforo detectaron caudales medios mensuales inferiores al P05, indicando una sucesión de cinco meses con caudales significativamente más bajos que lo normal en gran parte del territorio provincial.

Tabla 3. Frecuencia mensual de caudales medios mensuales inferiores al P05 ($Q < P05$) y superiores al P95 ($Q > P95$) según su alcance geográfico para el período septiembre/1979-agosto/2020.

Meses	Q < P05			Q > P95		
	Localizado	Intermedio	Generalizado	Localizado	Intermedio	Generalizado
Septiembre	5	5	0	9	2	0
Octubre	7	2	1	4	5	0
Noviembre	3	3	2	6	4	0
Diciembre	4	3	1	4	1	2
Enero	1	4	2	4	2	1
Febrero	5	5	2	1	3	1
Marzo	7	6	0	2	1	2
Abril	8	0	3	5	0	2
Mayo	4	3	2	1	4	1
Junio	4	2	2	2	2	2
Julio	7	2	2	6	4	0
Agosto	7	2	2	2	6	0

Fuente: Elaboración propia.

4.4. Patrones de precipitación

En este apartado, se describen los principales patrones de anomalías de precipitación a nivel provincial para los tipos de extremos de caudal medio mensual ($Q < P05$ y $Q > P95$) y sus alcances geográficos (localizado, intermedio y generalizado). Basados en los datos de ERA5, la precipitación anual en Corrientes (no mostrada) disminuye gradualmente desde el noreste (~1.800 mm) hasta el suroeste (~1.200 mm). Sin embargo, esta distribución y sus valores en la provincia y las principales cuencas hidrográficas varían según los meses del año (Figura 7). Desde octubre hasta abril, se registran los acumulados más altos, superando los 100 mm en todo el territorio provincial. Los meses más lluviosos son octubre y abril (140-200 mm), mientras que la precipitación es levemente más baja entre noviembre y marzo (120-160 mm). Entre mayo y septiembre, la precipitación disminuye considerablemente, donde algunos sectores presentan montos inferiores a 100 mm. Los meses menos lluviosos son de junio a agosto, con precipitaciones que oscilan entre 20 y 100 mm en gran parte del área de estudio.

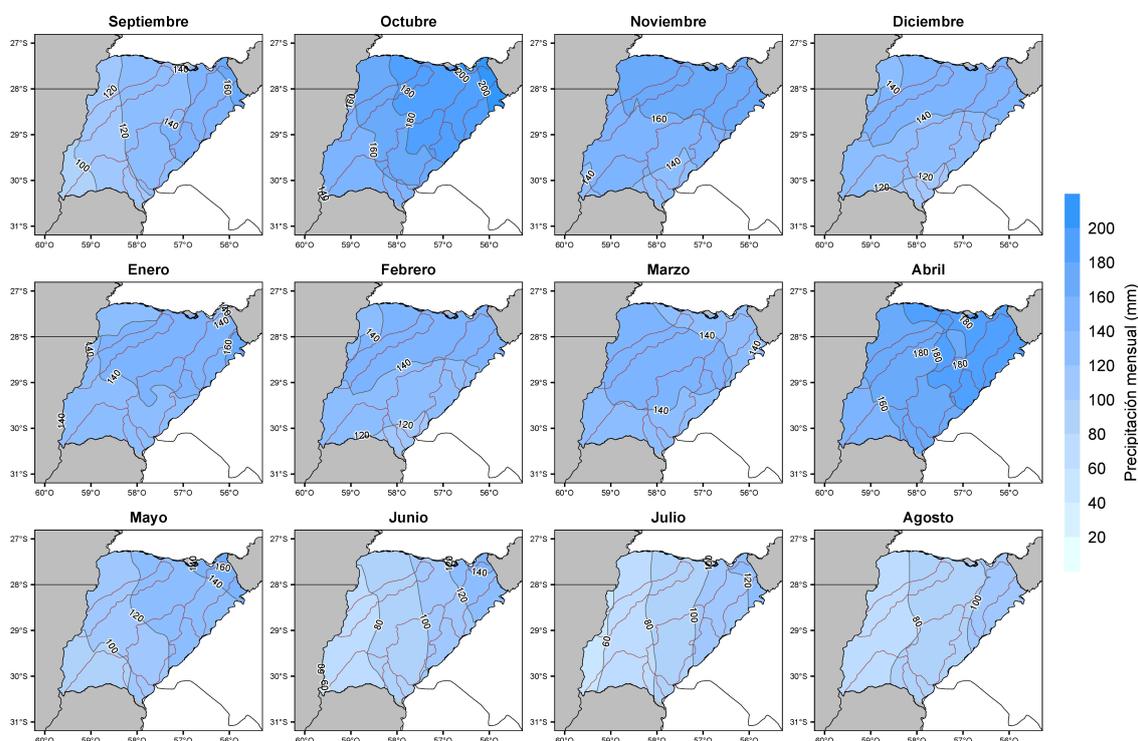


Figura 7. Campos medios de precipitación mensual para la Provincia de Corrientes (promedio del período 1980-2022). Las líneas continuas marrones indican las divisorias de aguas.

Fuente: Elaboración propia con base en datos extraídos del Reanálisis ERA5.



Los caudales de los ríos correntinos dependen en gran medida de los aportes de la precipitación, lo que podría sugerir que un aumento de los montos pluviométricos podría conducir a un incremento del caudal. Sin embargo, este enfoque no es adecuado para identificar los patrones de precipitación asociados a extremos de caudal medio mensual, ya que los datos no tienen una distribución simétrica y los valores no están uniformemente repartidos alrededor del promedio. En efecto, es poco probable que un conjunto de datos de caudales que superen determinados umbrales estadísticos siga una distribución Gaussiana, de manera que el análisis de correlaciones lineales y regresiones no es apropiado (Clarke, 2006). Asimismo, las condiciones físicas del medio (topografía, suelo, vegetación, etc.) y la presencia de cuerpos de agua (esteros y bañados), también influyen en la ocurrencia e intensidad de los extremos de caudal medio mensual inferior al P05 y superior al P95, de modo que un acumulado muy alto de precipitación no necesariamente se traduce en un caudal medio excepcionalmente elevado o por fuera del comportamiento normal del conjunto de datos (valores entre P05 y P95).

La Figura 8 muestra los campos de anomalías de precipitación mensual derivados de la base de datos ERA5, correspondiente a los diferentes tipos de extremos y sus respectivos alcances geográficos. En la Provincia de Corrientes, se observan generalmente anomalías pluviométricas negativas en los casos con $Q < P05$, mientras que predominan anomalías positivas en los casos con $Q > P95$. Estos patrones de precipitación anómalos varían ampliamente según el mes del año y el alcance geográfico de cada tipo de extremo.

En los casos de caudales medios mensuales por debajo del P05, predominan las anomalías pluviométricas negativas en la provincia, lo que sugieren que los caudales medios extremadamente bajos están asociados a un déficit de precipitaciones, con magnitudes que varían entre 0 y -140 mm según el alcance geográfico. Sin embargo, aunque este déficit es generalizado en el área de estudio, provocando una reducción del aporte de agua a los ríos y cuencas en comparación con los niveles normales, para algunos casos particulares se detectan patrones de anomalías positivas en sectores específicos o en gran parte de la provincia. Por ejemplo, en la provincia, se observa un predominio de excesos de precipitación en febrero para los extremos localizados (entre 0 y 40 mm), en julio para los extremos intermedios (entre 0 y 40 mm) y en enero para los extremos generalizados (entre 0 y 120 mm). Estos patrones de excesos en casos con $Q < P05$ indican que, aunque un río pueda registrar un caudal medio extremadamente bajo, inferior al umbral estadístico del P05, esto no implica que la precipitación mensual sea igualmente baja.

En los casos de caudales medios mensuales superiores al P95, la provincia presenta principalmente anomalías positivas de precipitación, con valores que oscilan entre 0 y 200 mm, dependiendo del alcance geográfico. Esta situación podría indicar que los caudales medios extremadamente altos están relacionados a excesos pluviométricos mensuales, lo que conllevaría a mayores aportes de agua a los ríos y cuencas en relación a lo normal. Sin embargo, para determinados casos particulares, se registran anomalías negativas de precipitación en áreas específicas o en gran parte del territorio provincial. De hecho, se advierte que el déficit pluviométrico es predominante en la provincia en octubre y marzo para los extremos localizados (entre 0 y -60 mm), en febrero y julio para los extremos intermedios (entre 0 y -60 mm) y en junio para los extremos generalizados (entre 0 y 20 mm). Por lo tanto, aunque se produzca un déficit de precipitación en los casos con $Q > P95$, la precipitación mensual no necesariamente se traduce en caudales medios extremadamente altos.

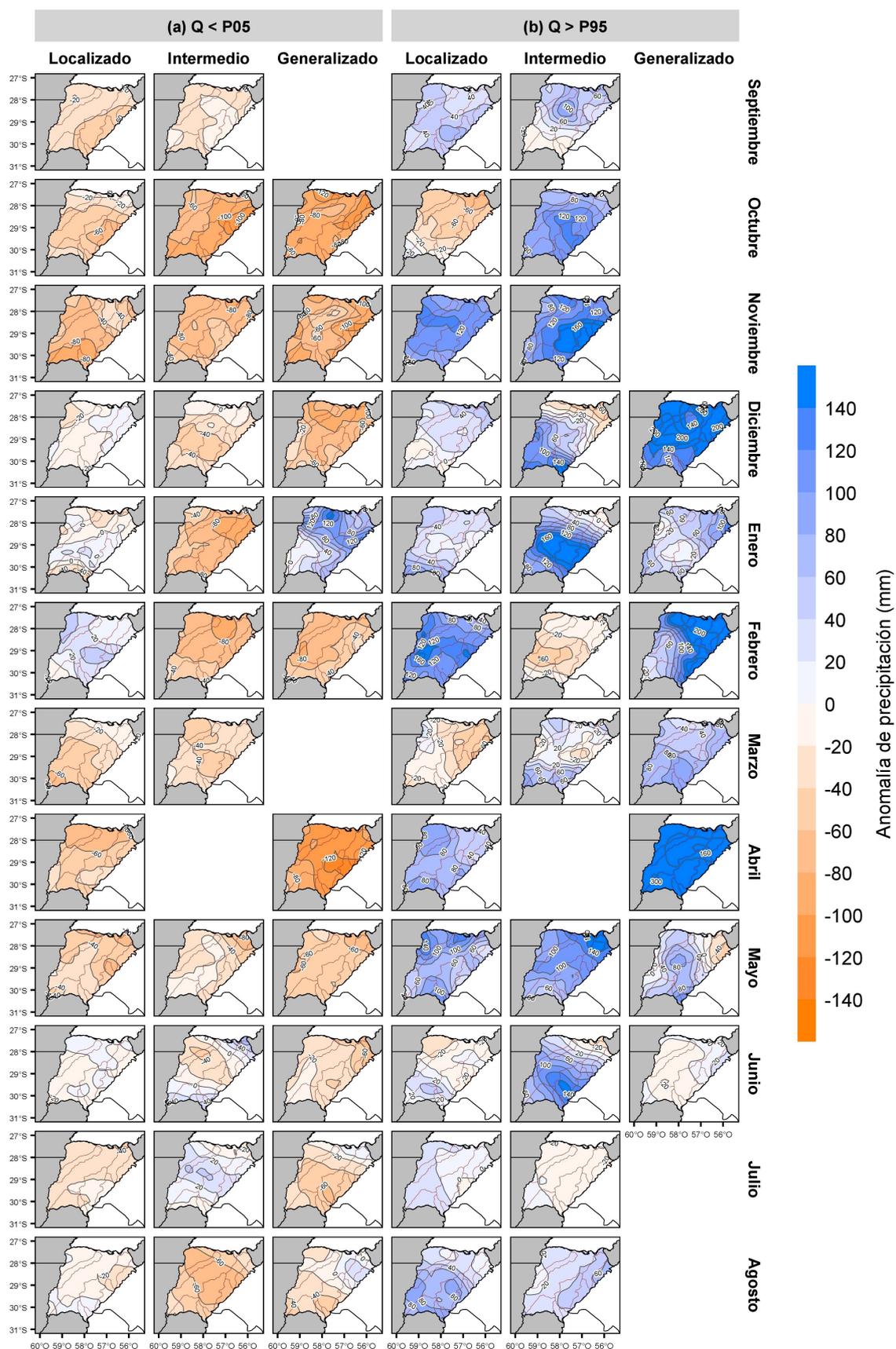


Figura 8. Composiciones de anomalías de precipitación mensual, discriminadas por mes del año y por alcance geográfico del tipo de extremo. Se muestran las composiciones para casos con a. caudales medios mensuales inferiores al P05 ($Q < P05$) y b. superiores al P95 ($Q > P95$). Las líneas continuas marrones indican las divisorias de aguas.

Fuente: Elaboración propia con base en datos extraídos del Reanálisis ERA5.



En la Provincia de Corrientes, existen diferentes patrones de anomalías de precipitación que varían según los meses del año, el tipo de extremo y su alcance geográfico. Por lo tanto, agrupar los meses con similares patrones resulta útil para condensar la información en unos pocos campos que describan el comportamiento espacial de la precipitación en cada tipo de extremo. Esto podría garantizar que patrones similares observados en diferentes momentos del año se relacionen con un mismo proceso físico.

La Tabla 4 muestra el agrupamiento de meses para cada tipo de extremos y sus alcances geográficos. Los meses dentro de cada grupo presentan patrones espaciales semejantes de anomalías de precipitación. La cantidad de grupos para cada caso se determinó mediante los gráficos dados por el Método del Codo (no mostrado), resultando en cuatro grupos para los extremos localizados, tres para los intermedios y dos para los generalizados. Algunos de estos grupos están conformados por un único mes, lo que señala que sus patrones de anomalías pluviométricas son diferentes a los de los demás meses y no logran incluirse dentro de algún grupo. Asimismo, otros grupos están constituidos por meses consecutivos (p. ej. en el grupo D de los extremos localizados para los $Q < P05$ se encuentran, además de junio y agosto, a los meses de diciembre a febrero). Para los extremos generalizados, aunque se registren en pocos meses, se identifican al menos dos tipos de patrones de anomalías de precipitación tanto para los $Q < P05$ como para los $Q > P95$.

Tabla 4. Agrupamiento de meses discriminados por tipo de extremo (caudales medios mensuales inferiores al P05 [$Q < P05$] y superiores al P95 [$Q > P95$]) y alcance geográfico (localizado, intermedio y generalizado). Los nombres de los grupos (A, B, C y D) fueron definidos arbitrariamente y no indican un orden específico.

Grupos	Q < P05			Q > P95		
	Localizado	Intermedio	Generalizado	Localizado	Intermedio	Generalizado
A	Marzo, Julio, Septiembre, Octubre	Marzo, Mayo, Junio, Septiembre, Diciembre	Febrero, Abril, Mayo, Octubre, Noviembre, Diciembre	Marzo, Octubre	Febrero, Marzo, Julio, Agosto, Septiembre	Enero, Marzo, Mayo, Junio
B	Abril, Mayo	Julio	Enero, Junio, Julio, Agosto	Abril, Mayo, Agosto, Septiembre	Agosto, Octubre, Noviembre	Febrero, Abril, Diciembre
C	Noviembre	Enero, Febrero, Agosto, Octubre, Noviembre		Febrero, Noviembre	Enero, Junio, Diciembre	
D	Enero, Febrero, Junio, Agosto, Diciembre			Enero, Junio, Julio, Diciembre		

Fuente: Elaboración propia.

La metodología de *k-means* agrupa patrones similares sin seguir un orden específico, lo que podría ocasionar la mezcla de casos extremos ocurridos en distintas estaciones del año y originados por diferentes procesos físicos. Por lo tanto, se ordenaron los grupos de patrones de precipitación para cada tipo de extremo y sus alcances geográficos según el año hidrológico (de septiembre a agosto), de tal forma que algunos de ellos se presentan en meses consecutivos, mientras que otros se dan en uno o dos meses, constituyéndose como casos particulares dentro de los extremos (Figura 9). Además, se cuantificó la frecuencia para cada tipo de extremo con sus grupos asociados, indicando la variación del número de casos producidos por grupos a lo largo del año.

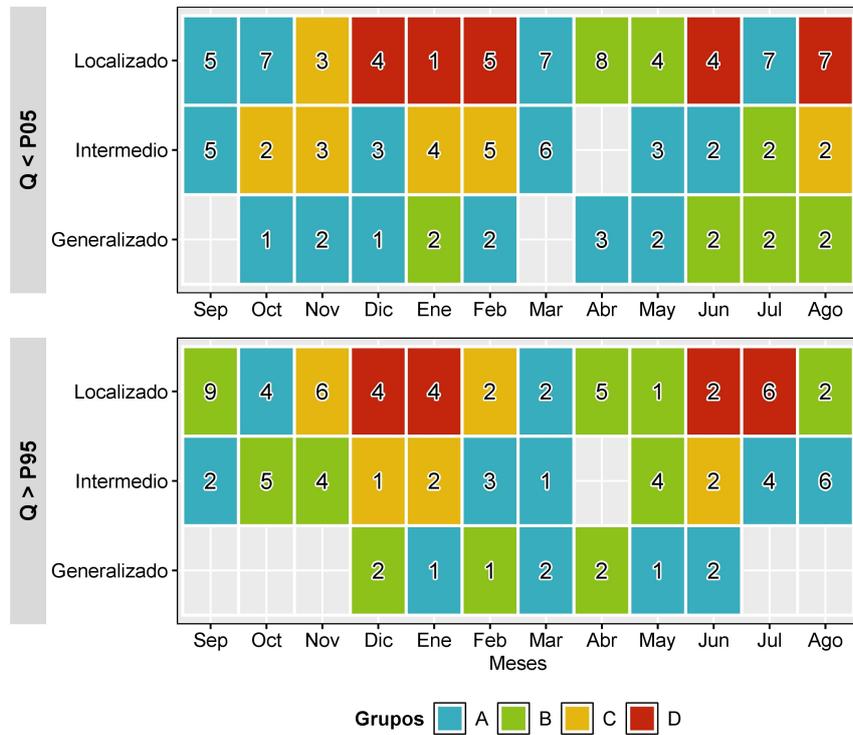


Figura 9. Ordenamiento de los grupos de patrones de precipitación por tipo de extremo (caudales medios mensuales inferiores al P05 [$Q < P05$] y superiores al P95 [$Q > P95$]) y alcance geográfico (localizado, intermedio y generalizado) en función del año hidrológico. Los nombres de los grupos (A, B, C y D) y sus colores correspondientes fueron definidos arbitrariamente. El número en cada casillero indica la frecuencia de casos.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 10 se presentan las composiciones de anomalías de precipitación clasificadas por tipo de extremo y por alcance geográfico, según los grupos de meses definidos en la Tabla 4. Por ejemplo, para los casos localizados de caudales medios mensuales inferiores al P05 ($Q < P05$), el mapa del Grupo A corresponde al campo promedio de las anomalías de precipitación para todos los meses con $Q < P05$ registrados únicamente por una estación de aforo en septiembre, octubre, marzo y julio (meses que integran el grupo con 26 casos en total). Esta interpretación puede aplicarse también al mapa del Grupo C del mismo tipo de extremo, con la diferencia de que sólo se consideraron los casos producidos en noviembre (3 casos en total). En general, en el área de estudio predominan las anomalías pluviométricas negativas para los casos con $Q < P05$, mientras que se observan anomalías positivas para los casos con $Q > P95$. Sin embargo, la distribución espacial de estas anomalías exhibe variaciones según los grupos y los alcances geográficos de los tipos de extremos.

En los extremos de caudales medios inferiores al P05, predominan las anomalías pluviométricas negativas en la provincia, indicando que la disminución de los caudales medios podría estar asociada a un menor aporte de agua de precipitación a ríos y cuencas hidrográficas. Estos patrones de anomalías varían según los alcances geográficos, con diferentes distribuciones espaciales entre los grupos, pero con magnitudes que generalmente oscilan entre 0 y -80 mm. Sin embargo, en algunos casos específicos de $Q < P05$, se observan regiones del área de estudio con anomalías positivas, como en el Grupo D de los extremos localizados (21 casos distribuidos en diciembre, enero, febrero, junio y agosto) y en el Grupo B de los extremos intermedios (2 casos en julio) y los extremos generalizados (5 casos en diciembre, febrero y abril). En tales situaciones, las anomalías positivas coinciden con los meses en que terminan los períodos de altas aguas y comienzan los de bajas aguas. Si la relación fuera estrictamente lineal, estas anomalías positivas tenderían a aumentar los caudales medios en lugar de reducirlos, por lo que estos patrones probablemente estén influenciados por factores locales. Al analizar los campos de anomalías mensuales (Figura 8, $Q < P05$), entre diciembre y febrero se encuentran grandes

sectores de la provincia con precipitaciones superiores a lo normal, pero la alta evaporación estacional y el almacenamiento de agua en los humedales y el subsuelo produce una pérdida significativa de agua, impidiendo la alimentación óptima de los ríos hasta registrarse caudales medios extremadamente bajos o inferiores al P05. Entre junio y agosto, cuando la evaporación estacional es baja, las anomalías pluviométricas positivas impactan de manera diferencial en la disminución de los caudales medios dependiendo de la presencia de humedales: en áreas con muchos humedales (centro y oeste), la precipitación es retenida por estos cuerpos hídricos, mientras que en áreas con pocos humedales (noreste y sur), el suelo absorbe y almacena lentamente la precipitación sin cederla a los ríos, lo que genera condiciones de caudales medios inferiores al P05.

En los extremos de caudales medios que superan el P95, las anomalías pluviométricas para los diferentes grupos y alcances geográficos generalmente oscilan entre 0 y 200 mm. Esto indica que, en la mayoría de los casos, hay un predominio de excesos de precipitación en el área de estudio, lo que genera un aumento en el aporte de agua a ríos y cuencas hidrográficas, resultando en caudales medios extremadamente altos o superiores al P95. Sin embargo, en algunos casos particulares, se observan áreas de la provincia con patrones de anomalías negativas. Por ejemplo, en el Grupo A de los extremos localizados se identifica un déficit pluviométrico que abarca toda la provincia, mientras que en los Grupos A y C de los extremos intermedios, este déficit se limita a regiones o cuencas específicas. La coincidencia entre caudales medios mensuales superiores al P95 y anomalías pluviométricas negativas sugiere un desfase temporal entre el temperamento hidrológico de los cursos fluviales y los aportes directos de precipitación. Al analizar el comportamiento de los caudales medios mensuales para estos casos, se identificó que los máximos caudales medios mensuales se adelantaron con respecto a los registros normales (según lo mostrado en los hidrogramas de la Figura 2), produciendo caudales medios mensuales anómalamente más altos en relación con los parámetros promedios. Esto podría vincularse con la dinámica de los humedales, los cuales liberan lentamente el agua acumulada en períodos previos, manteniendo los caudales elevados incluso en presencia de escasas precipitaciones. Si el máximo de caudal medio se adelanta, esto podría implicar que los humedales están agotando su capacidad de almacenamiento y liberación de agua antes de lo habitual, posiblemente debido a un prolongado período de déficit pluvial.

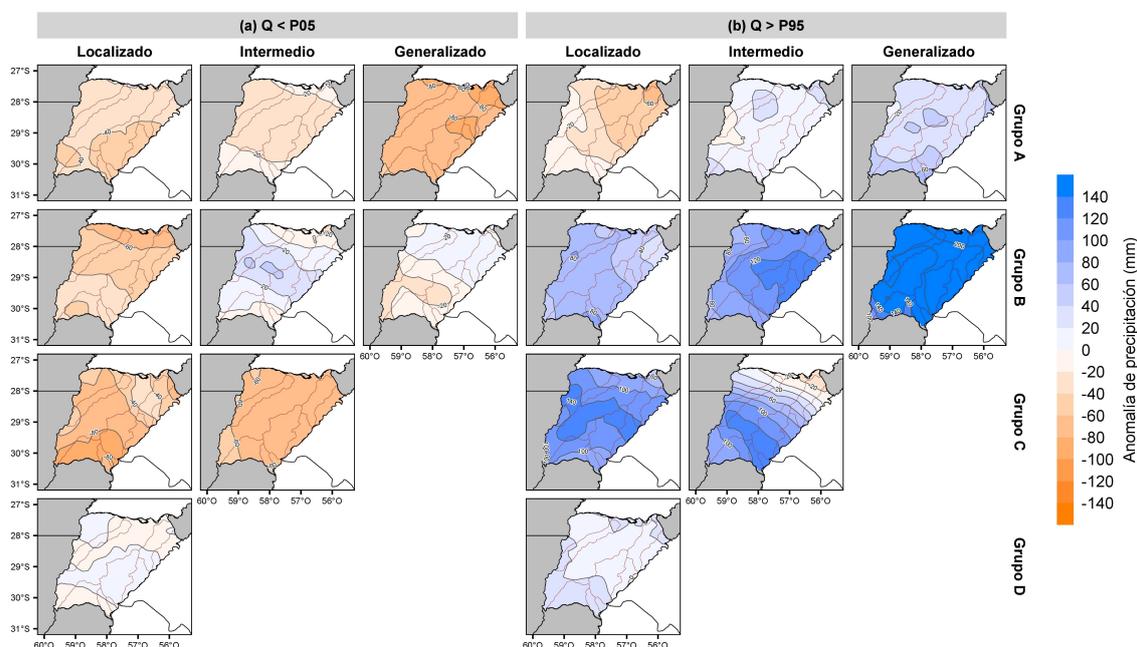


Figura 10. Composiciones de anomalías de precipitación, discriminadas por grupo de meses y por alcance geográfico del tipo de extremo. Se muestran las composiciones para casos con a. caudales medios mensuales inferiores al P05 ($Q < P05$) y b. superiores al P95 ($Q > P95$). Las líneas continuas marrones indican las divisorias de aguas.

Fuente: Elaboración propia con base en datos extraídos del Reanálisis ERA5.

5. Conclusiones

En la investigación, se caracterizaron los patrones de precipitación asociados a los extremos de caudal medio mensual registrados en los ríos de la Provincia de Corrientes. En general, los caudales medios mensuales inferiores al 5° percentil ($Q < P05$) se concentran en valores significativamente bajos, mientras que los caudales medios mensuales superiores al 95° percentil ($Q > P95$) presentan una mayor dispersión de datos. Los outliers de $Q < P05$ ocurren en diversos momentos, a diferencia de los de $Q > P95$, que se agrupan en meses y años específicos, lo que podría facilitar el pronóstico mensual y estacional de las caudales medios extremadamente altos en comparación con los caudales medios extremadamente bajos, cuya predicción es más compleja debido a su ocurrencia en cualquier época del año.

A lo largo del año y con el paso del tiempo, las frecuencias de ambos tipos de extremos varían y generalmente presentan una relación inversa. Esto podría asociarse fenómenos cíclicos, como El Niño-Oscilación del Sur, que impactan en el clima regional del noreste argentino, tema que se abordará en futuras investigaciones. A medida que aumenta el número de estaciones de aforo que registran caudales medios mensuales que superan un determinado umbral, la frecuencia de casos disminuye, sugiriendo distintos alcances geográficos (localizado, intermedio y generalizado). Así, tanto para los casos con $Q < P05$ como para los de $Q > P95$, se observa una mayor frecuencia de casos localizados y menor en los generalizados. Sin embargo, aunque son menos recurrentes, los extremos generalizados son de gran importancia, ya que pueden afectar a gran parte de la provincia debido a su mayor extensión geográfica.

En la Provincia de Corrientes, los patrones de precipitación asociados a los extremos de caudal medio varían según los meses del año. Generalmente, los casos con $Q < P05$ coinciden con anomalías negativas de precipitación, mientras que los casos con $Q > P95$ se vinculan a anomalías positivas. Sin embargo, hay excepciones donde esta relación no es lineal, y los montos pluviométricos mensuales bajos o altos no se corresponden en caudales medios bajos o altos. Debido a la amplia variedad de patrones detectados, se agruparon los meses con patrones similares de precipitación mediante la técnica de *k-means*, identificando cuatro grupos para los extremos localizados, tres para los intermedios y dos para los generalizados, tanto para los caudales medios inferiores al P05 como para los superiores al P95. Esto permitió condensar la información en unos pocos campos que describen el comportamiento espacial de la precipitación para cada tipo de extremo y su alcance geográfico. Aunque los patrones agrupados de anomalías pluviométricas también muestran valores negativos para los $Q < P05$ y positivos para los $Q > P95$, algunos casos particulares están influenciados por factores locales como humedales y lagunas que regulan la ocurrencia e intensidad de los extremos hidrológicos.

Agradecimientos

Se agradece a la Lic. Sabrina Ayala (Universidad de Buenos Aires) y a la Dra. Claudia Gómez (Universidad Nacional del Nordeste) por sus valiosas sugerencias, que contribuyeron a mejorar este trabajo. Asimismo, se agradece a los editores de la revista y a los revisores por sus comentarios, que permitieron perfeccionar el manuscrito.

Referencias bibliográficas

Abbas, O. A. (2008). Comparisons between data clustering algorithms. *The International Arab Journal of Information Technology*, 5(3), 320-325. <https://iajit.org/portal/PDF/vol.5,no.3/15-191.pdf>

Arshad, M., Ma, X., Yin, J., Ullah, W., Liu, M. y Ullah, I. (2021). Performance evaluation of ERA-5, JRA-55, MERRA-2, and CFS-2 reanalysis datasets, over diverse climate regions of Pakistan. *Weather and Climate Extremes*, 33(100373). <https://doi.org/10.1016/j.wace.2021.100373>

Asadieh, B. y Krakauer, N. Y. (2017). Global change in streamflow extremes under climate change over the 21st century. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(11), 5863-5874. <https://doi.org/10.5194/hess-21-5863-2017>

Ashraf, M. S., Ahmad, I., Khan, N. M., Zhang, F., Bilal, A. y Guo, J. (2021). Streamflow variations in monthly, seasonal, annual and extreme values using Mann-Kendall, Spearman's Rho and innovative trend analysis. *Water Resources Management*, 35, 243-261. <https://doi.org/10.1007/s11269-020-02723-0>

Báčová-Mitková, V. y Onderka, M. (2010). Analysis of extreme hydrological events on the Danube using the peak over threshold method. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 58(2), 88-101. <https://doi.org/10.2478/v10098-010-0009-x>

Baeza Sanz, D., Martínez-Capel, F. y García de Jalón Lastra, D. (2003). Variabilidad temporal de caudales: aplicación a la gestión de ríos regulados. *Ingeniería del agua*, 10(4), 469-478. <https://doi.org/10.4995/ia.2003.2590>

Barros, V. y Camilloni, I. (2020). *La Argentina y el cambio climático: de la física a la política*. EUDEBA.

Bezák, N., Brilly, M. y Šraj, M. (2014). Comparison between the peaks-over-threshold method and the annual maximum method for flood frequency analysis. *Hydrological Sciences Journal*, 59(5), 959-977. <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.831174>

Blanco, P. S. (2022). Estacionalidad del Río Paraná a la altura de Corrientes-Argentina durante eventos de bajantes históricas (1910-2021). *Investigaciones y ensayos geográficos*, (19), 13-30. <http://hdl.handle.net/11336/214806>

Bruniard, E. (1992). *Hidrografía. Procesos y tipos de escurrimiento superficial*. CEYNE.

Camilloni, I., Barro, V., Moreiras, S., Poveda, G. y Tomasella, J. (2020). Inundaciones y sequías. En: J. Moreno, C. Laguna-Deflor, V. Barros, E. Calvo Buendía, J. Marengo, y U. Oswald Spring (Eds.), *Adaptación frente a los riesgos del cambio climático en los países iberoamericanos* (pp. 391-417). McGraw-Hill.

Capitanelli, R. (1992). Los ambientes naturales del territorio argentino. Un sistema basado en la diversidad. En J. A. Roccatagliata (Ed.), *La Argentina: Geografía General y los marcos regionales* (pp. 63-120). Planeta.

Carril, A., Cavalcanti, I., Menendez, C., Sörensson, A., López-Franca, N., Rivera, J., Robledo, F., Zaninelli, P., Ambrizzi, T., Penalba, O., da Rocha, R., Sanchez, E., Bettolli, M., Pessacg, N., Renom, M., Ruscica, R., Solman, S., Tencer, B., Grimm, A., ... Zamboni, L. (2016). Extreme events in the La Plata basin: a retrospective analysis of what we have learned during CLARIS-LPB project. *Climate Research*, 68(2-3), 95-116. <http://dx.doi.org/10.3354/cr01374>

Carvalho, M. J., Melo-Gonçalves, P., Teixeira, J. C. y Rocha, A. (2016). Regionalization of Europe based on a *k-means* Cluster Analysis of the climate change of temperatures and precipitation. *Physics and Chemistry of the Earth*, 94, 22-28. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2016.05.001>

Chauluka, F., Singh, S., y Kumar, R. (2021). Rainfall and streamflow trends of thuchila river, southern Malawi. *Materials Today: Proceedings*, 34, 846-855. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.228>

Clarke, R. (2006). Análisis estadístico de eventos extremos en un contexto no estacionario. En: V. Barros, R. Clarke, y P. Silva Dias (Eds.), *El cambio climático en la Cuenca del Plata* (pp. 209-226). Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera, CONICET.

Cui, M. (2020). Introduction to the k-means clustering algorithm based on the elbow method. *Accounting, Auditing and Finance*, 1(1), 5-8. <https://www.clausiuspress.com/article/592.html>

D'Silva, J. y Sharma, U. (2020). Unsupervised automatic text summarization of Konkani texts using K-

means with Elbow method. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 13(9), 2380-2384. <https://dx.doi.org/10.37624/IJERT/13.9.2020.2380-2384>

da Silva, C. L. F., da Silva, D. D., Moreira, M. C., Rodrigues, J. M., de Sousa Rocha, I. S., Lima, R. P. C., y Calegario, A. T. (2023). Trend analysis and identification of possible periods of change in the occurrence of extreme streamflow events in a tropical basin. *Journal of South American Earth Sciences*, 128(104485). <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104485>

Deka, P. y Saha, U. (2023). Introduction of *k-means* clustering into random cascade model for disaggregation of rainfall from daily to 1-hour resolution with improved preservation of extreme rainfall. *Journal of Hydrology*, 620(129478). <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129478>

Dethier, E., Sartain, S., Renshaw, C. y Magilligan, F. (2020). Spatially coherent regional changes in seasonal extreme streamflow events in the United States and Canada since 1950. *Science advances*, 6(49). <https://doi.org/10.1126/sciadv.aba5939>

Díaz, E., García, M., Rodríguez, A., Dölling, O., Ochoa, S. y Bertoni, J. (2018). Temporal evolution of hydrological drought in Argentina and its relationship with macroclimatic indicators. *Tecnología y ciencias del agua*, 9(5), 1-32. <https://revistatyca.org.mx/index.php/tyca/article/view/1973/1413>

Fabre, M., Ojeda, A. y Tena, M. (2008). El río Guadalaviar: su comportamiento hidrológico. *REHALDA*, (7), 37-52. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2602973>

Far, S. S. y Wahab, A. K. A. (2016). Evaluation of peaks-over-threshold method. *Ocean Science Discussions*, 47, 1-25. <https://doi.org/10.5194/os-2016-47>

Gao, L., Tao, B., Miao, Y., Zhang, L., Song, X., Ren, W., He, L. y Xu, X. (2019). A global data set for economic losses of extreme hydrological events during 1960-2014. *Water Resources Research*, 55(6), 5165-5175. <https://doi.org/10.1029/2019WR025135>

Guimberteau, M., Ronchail, J., Espinoza, J., Lengaigne, M., Sultan, B., Polcher, J., Drapeau, G., Guyot, J. L., Ducharne, A. y Ciais, P. (2013). Future changes in precipitation and impacts on extreme streamflow over Amazonian sub-basins. *Environmental Research Letters*, 8(1), 1-13. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/1/014035>

Gomes, M., de Albuquerque Cavalcanti, I. F., y Müller, G. V. (2021). 2019/2020 drought impacts on South America and atmospheric and oceanic influences. *Weather and Climate Extremes*, 34(100404). <https://doi.org/10.1016/j.wace.2021.100404>

Gómez, C. (2020). Las represas internacionales y su influencia en la dinámica temporal del curso medio del Río Paraná. *Párrafos Geográficos*, 19(1), 89-99. <https://www.revistas.unp.edu.ar/index.php/parrafosgeograficos/issue/view/54>

Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC]. (2021). Summary for Policymakers. En: V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. Matthews, T. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (Eds.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 3-32). Cambridge, Reino Unido y New York, Estados Unidos: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.001>

Liu, M., Ma, X., Yin, Y., Zhang, Z., Yin, J., Ullah, I. y Arshad, M. (2021). Non-stationary frequency analysis of extreme streamflow disturbance in a typical ecological function reserve of China under a changing climate. *Ecohydrology*, 14(7). <https://doi.org/10.1002/eco.2323>

Lozada, J., García, C., Herrero, H., Barchiesi, G., Romagnoli, M., Portapila, M., López, F., Castelló,

E., Cossavella, A. y Brarda, J. P. (2015). Cuantificación del escurrimiento superficial de la cuenca del Río Carcarañá. *Revista de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 2(1), 59-72. <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/FCEFYN/article/view/9232>

Mahto, S. S. y Mishra, V. (2019). Does ERA5 outperform other reanalysis products for hydrologic applications in India? *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(16), 9423-9441. <https://doi.org/10.1029/2019JD031155>

Marengo, J. A., Menéndez, A., Guetter, A., Hogue, T. y Mechoso, C. R. (2006). Eventos Hidrometeorológicos Extremos. Caracterización y Evaluación de Métodos de Predicción de Eventos Extremos de Clima y de la Hidrología en la Cuenca del Plata. *Revista de Gestão de Água da América Latina*, 3(2), 83-95. https://abrh.s3-sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/68/2fec10c7c34f3142d88dcb5f4a0e178d_4ff96015c3b2b75e379f7f904c05f159.pdf

Marianetti, G., Hinrichs, S. y Rivera, J. (2018). Cuando el río suena: análisis de los períodos de caudales extremos en los ríos de los Andes centrales de Argentina. *Investigación, Ciencia y Universidad*, 2(3), 195-197. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/94881>

Meis, M. y Llano, M. P. (2019). Hydrostatistical study of the Paraná and Uruguay Rivers. *International Journal of River Basin Management*, 17(1), 1-12. <http://doi.org/10.1080/15715124.2018.1446962>

Meresa, H., Tischbein, B., Mendela, J., Demoz, R., Abreha, T., Weldemichael, M. y Ogbu, K. (2022). The role of input and hydrological parameters uncertainties in extreme hydrological simulations. *Natural Resource Modeling*, 35(1). <https://doi.org/10.1111/nrm.12320>

Merz, B., Blöschl, G., Vorogushyn, S., Dottori, F., Aerts, J. C., Bates, P., Bertola, M., Kemter, M., Kreibich, H., Lall, U. y Macdonald, E. (2021). Causes, impacts and patterns of disastrous river floods. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2(9), 592-609. <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00195-3>

Naumann, G., Podestá, G., Marengo, J., Luterbacher, J., Bavera, D., Arias Muñoz, C., Barbosa, P., Cammalleri, C., Chamorro, L., Cuartas, L., De Jager, A., Escobar, C., Hidalgo, C., Leal De Moraes, O., McCormick, N., Maetens, W., Magni, D., Masante, D., Mazzeschi, M., ... Toreti, A. (2022). *The 2019-2021 extreme drought episode in La Plata Basin*. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2760/773>

Oliveira, D. H. M. C., Lima, K. C. y Spyrides, M. H. C. (2021). Rainfall and streamflow extreme events in the São Francisco hydrographic region. *International Journal of Climatology*, 41(2), 1279-1291. <https://doi.org/10.1002/joc.6807>

Permadi, V., Tahalea, S. y Agusdin, R. (2023). K-Means and Elbow Method for Cluster Analysis of Elementary School Data. *Progres Pendidikan*, 4(1), 50-57. <https://doi.org/10.29303/prospek.v4i1.328>

Pike, M. y Lintner, B. R. (2020). Application of clustering algorithms to TRMM precipitation over the tropical and South Pacific Ocean. *Journal of Climate*, 33(13), 5767-5785. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0537.1>

Pyszczyk, O. L. (2016). Condiciones atmosféricas y clasificación climática del espacio geográfico correntino. En F. I. Contreras y M. P. Odriozola (Comps.), *III Libro de la Junta de Geografía de la Provincia de Corrientes* (pp. 6-17). Junta de Geografía de la Provincia de Corrientes.

Reshmidevi, T., Kumar, D., Mehrotra, R. y Sharma, A. (2018). Estimation of the climate change impact on a catchment water balance using an ensemble of GCMs. *Journal of Hydrology*, 556, 1192-1204. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.02.016>

Rivera, J. y Penalba, O. (2018). Spatio-temporal assessment of streamflow droughts over Southern South America: 1961-2006. *Theoretical and applied climatology*, 133(3), 1021-1033. <http://dx.doi.org/10.1007/s00162-017-0411-1>

07/s00704-017-2243-1

Sistema Nacional de Información Hídrica [SNIH]. (2023). *Sistema Nacional de Información Hídrica* [Base de datos]. Secretaría de Infraestructura y Políticas Hídricas, Ministerio de Obras Públicas de la Nación. <http://snih.hidricosargentina.gob.ar>

van Kempen, G., van der Wiel, K. y Melsen, L. (2021). The impact of hydrological model structure on the simulation of extreme runoff events. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 21(3), 961-976. <https://doi.org/10.5194/nhess-21-961-2021>

Vincenti, R. D. (2004). La incidencia de los factores litológicos en el escurrimiento fluvial. *Revista Geográfica*, 63-78. <https://www.jstor.org/stable/40996679>

Vincenti, R. D. (2015). Simetrías y asimetrías en el escurrimiento fluvial superficial encauzado en las provincias de Chaco y Corrientes, según sus características fisiográficas. *Investigaciones y ensayos geográficos*, (12), 40-55. <http://repositorio.unne.edu.ar/handle/123456789/51144>

Vich, A., Norte, F. y Lauro, C. (2014). Análisis regional de frecuencias de caudales de ríos pertenecientes a cuencas con nacientes en la Cordillera de los Andes. *Meteorológica*, 39(1), 3-26. http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-468X2014000100001

Wang, W., Chen, X., Shi, P. y Van Gelder, P. (2008). Detecting changes in extreme precipitation and extreme streamflow in the Dongjiang River Basin in southern China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 12(1), 207-221. <https://doi.org/10.5194/hess-12-207-2008>

Zhang, L., Liu, Y., Zhan, H., Jin, M. y Liang, X. (2021). Influence of solar activity and El Niño-Southern Oscillation on precipitation extremes, streamflow variability and flooding events in an arid-semiarid region of China. *Journal of Hydrology*, 601, 126630. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126630>

Zucarelli, G. (2013). Identificación de eventos hídricos extremos en la cuenca del río Paraná. *Tecnología y ciencias del agua*, 4(5), 181-187. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222013000500012