

RECURSOS HÍDRICOS SUPERFICIALES

Superficial water resources

ALBERTO I. J. VICH^(1,2), C. LAURO⁽¹⁾, F.BIZZOTTO⁽²⁾, E.VACCARINO⁽²⁾ & F. MANDUCA ⁽²⁾

⁽¹⁾Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA-CONICET)
Av. Adrián Ruiz Leal, Parque General San Martín, 5500 Mendoza
aijvich@mendoza-conicet.gob.ar

⁽²⁾Instituto de Estudios del Ambiente y los Recursos Naturales (IDEAR)
Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Nacional de Cuyo
Centro Universitario, Parque General San Martín, 5500 Mendoza

RESUMEN

El presente capítulo pretende mejorar el conocimiento de la oferta hídrica superficial a partir del análisis de distintas variables de caudal en la cuenca del río San Juan y Jáchal. El primero, es el río más importante de la cuenca del Desaguadero y el segundo, el afluente más importante del río Bermejo que proviene de la provincia de La Rioja y ha perdido su conexión con el sistema Desaguadero. Ambos, drenan un significativo sector cordillerano del centro oeste argentino y se desarrollan íntegramente en San Juan. Además, se realiza la detección de cambios graduales o abruptos en el régimen de escurrimientos debidos a la variabilidad climática o cambios en las condiciones de la circulación atmosférica regional. Por otra parte, se realiza una cuantificación de la producción de sedimentos en la cuenca a partir de medidas de aforos sólidos y condiciones hidráulicas.

Palabras clave: caudal, homogeneidad, sedimentos, Jáchal, San Juan

SUMMARY

The current chapter searches an improvement in the knowledge of the water offer based on different river flow variables in the San Juan river basin, the most important watercourse in the Desaguadero river basin, which drains a significant sector of the Andes mountains in the Argentine central-west, as well as that of other minor rivers. In addition, detection is made of gradual or abrupt changes in the runoff regime due to climate variability or in regional atmospheric circulation. On the other hand, sediment production in the basin is quantified from measurement of solids and hydraulic conditions.

Key words: caudal, homogeneity, sediments, Jáchal, San Juan

INTRODUCCIÓN

La Argentina es un país de gran extensión, con 2.812.588 km² de superficie continental y con un desarrollo latitudinal de 3700 km, que se caracteriza por poseer una gran variedad de climas y ecosistemas asociados. Los recursos hídricos superficiales cuentan con un caudal medio de 26.000 m³·s⁻¹ (820.000 millones m³·año⁻¹). Sin embargo, esa media distorsiona la real distribución espacial y temporal de los recursos hídricos, ya que el 85% del total de éstos corresponden a la Cuenca del Plata (30% del territorio y 22000 m³·s⁻¹), en tanto que las cuencas de zonas áridas y semiáridas disponen de menos del 1% del total de los recursos hídricos superficiales (11% del territorio y 223 m³·s⁻¹). En el territorio nacional existen extensas regiones cuya disponibilidad hídrica se encuentra por debajo del índice de estrés hídrico publicado por el PNUD (1000 m³·año⁻¹·habitante⁻¹), destacándose las provincias de San Luis y Tucumán. En el caso particular de San Juan, ésta se encuentra en el orden de los 3.400 m³·año⁻¹·habitante⁻¹, debido a su baja población.

El conocimiento actual del ciclo hidrológico regional no permite establecer cómo se articula dentro de las variaciones regionales del clima y que conexión tiene con los procesos asociados al cambio global.

La población de la provincia de San Juan se concentra (más del 90%) en los oasis de los valles del: Tulum, Ullum, Zonda y el resto en los valles de Iglesia y Calingasta.

El objetivo del presente capítulo es mejorar el conocimiento de la oferta hídrica superficial en las cuencas del río San Juan y Jáchal. Ambas cuencas se desarrollan íntegramente en el territorio provincial y pertenecen al sistema del río Desaguadero. Asimismo se pretende evaluar el impacto del cambio climático global sobre los recursos hídricos superficiales, a partir de la detección de posibles cambios de tendencias de largo plazo y cambios abruptos, en el régimen de escurrimiento. También, conocer someramente los procesos de producción de sedimentos en la principal cuenca de la Provincia.

CARACTERÍSTICAS DE LAS CUENCAS

El centro oeste de la cordillera de los Andes comprendido entre los 27°35' y 33°30' S es drenado por el sistema hidrográfico del río Desaguadero-Salado-Chadileuvú o Curacó. De norte a sur está integrado por los ríos Bermejo (La Rioja), Jáchal, San Juan, Mendoza, Tunuyán, Diamante y Atuel. Todos ellos al abandonar las últimas elevaciones al este se transforman en ríos alóctonos.

El río Bermejo, que drena el sistema serrano de las sierras pampeanas de la provincia de la Rioja, ingresa en la provincia de San Juan prácticamente seco. Recibe numerosos afluentes que bajan por el este de las sierras de Valle Fértil y se pierde en el valle de Ampacama, donde concurre el emisario de los bañados del Zanjón, formados por el río Jáchal (CFI, 1962; Colombato *et al.*, 1983). Desaparece en la llamada Depresión de la Travesía antes del sitio que teóricamente correspondería a su desembocadura en el sistema lacustre de San Miguel, correspondiente al sector este de las lagunas de Guanacache.

Toda la región se integra a la Diagonal Árida, franja del territorio sudamericano de escasas precipitaciones que atraviesa el continente desde el norte del Perú hasta las costas patagónicas (González Loyarte, 1995; Martínez Carretero, 2013). Podría considerarse como el límite de las influencias atlánticas y pacíficas sobre la cordillera de los Andes.

CUENCA DEL RÍO SAN JUAN

La cuenca del río San Juan se localiza en el sector suroeste de la provincia y una pequeña fracción al norte de la provincia de Mendoza. Se desarrolla en gran parte sobre terreno montañoso y ocupa alrededor del 45% de la superficie de la provincia. El río San Juan nace de la confluencia de los ríos Castaño Viejo al norte y de Los Patos al sur, que a su vez son colectores de una importante red de afluentes que tienen sus cabeceras en las altas cumbres cordilleranas, a lo que se suma una enorme cantidad de torrentes provenientes de los cordones La Ramada, Mercedario y Agua Negra. Drena un amplio frente cordillerano comprendido entre los 30° 47'S y los 32° 40'S de más de 260 km de longitud y es el río más caudaloso de los integrantes de la cuenca del Desaguadero (CFI, 1962; Colombato, 1983) (Figura 1).

El río Los Patos tiene sus nacientes en la Cordillera Principal y cerros más elevados (Aconcagua, Mercedario, etc.), desde donde recibe el río de los Teatinos. Presenta rumbo general sur-norte, cuando confluye el Blanco prácticamente duplica su caudal. Aguas debajo de Calingasta se junta con el Castaño Viejo para formar el San Juan. El Castaño Viejo proviene desde el sector norte de la cuenca y tiene su origen en la Cordillera Principal, con menores alturas y acumulación nival, lo que explica el menor caudal en relación a Los Patos. Al ingresar en el ámbito de la Precordillera escurre de oeste a este a través de las sierras del Tigre y del Tontal y atraviesa el valle del Zonda. A la salida de la Quebrada de Ullum ingresa en el valle de Tulum. Continúa con rumbo norte-sur y circula por un área relativamente plana extremadamente árida y llega al noroeste de Mendoza, donde desemboca en el sistema lagunar de Guanacache. La cuenca del San Juan posee una superficie aproximada de 38.000 km² (Lupano y Abeuci, 2008)

Las aguas de la cuenca del río San Juan provienen de la fusión de la nieve y ablación de cuerpos de hielo. En el ámbito precordillerano llegan al colector cauces secos que drenan las escasas lluvias estivales de carácter torrencial. En los sectores más elevados y protegidos de la fuerte radiación solar, la nieve persiste de un año al siguiente y forma con el tiempo cuerpos de hielo permanentes. Sin diferenciar el tipo de cuerpo de hielo, el área englazada en el río Castaño es de 93,24 km², en el río Blanco de 286,90 km², en Los Patos 175,88 km²; lo que arroja un total de 556,02 km² para la cuenca del río San Juan (Bottero, 2001). El número de glaciares descubiertos de distintos tamaños (glaciaretos a más de 1000 ha) es de 1616 con una extensión total del orden de 240 km² (UNSJ, 2010). La superficie cubierta en las subcuencas de los ríos Los Patos Superior y Blanco es de 53,07 y 91,44 km², respectivamente.

En el sector inferior de la cuenca del río San Juan, particularmente en los valles Ullum-Zonda y Tulum, existen bolsones rellenos de sedimentos que permiten el alma-

cenamiento de agua subterránea. El bolsón de Ullum-Zonda es un potente acuífero libre con muy pocas capas confinantes, con un volumen estimado superior a 2000 Hm³. La cuenca subterránea del Tulum está compuesta por dos grandes subáreas: San Juan, sobre la margen derecha, y Caucete, sobre la margen opuesta. En el sector occidental del valle, se encuentra el cono aluvial que contiene agua subterránea no confinada; más al este, sobre el borde oriental del abanico, se intercalan capas de sedimentos finos y gruesos que generan acuíferos confinados. Se trata de reservorios de agua separados de otros y de la superficie por estratos poco permeables o impermeables que inhiben el movimiento vertical del agua. En la subárea Caucete aparece un único acuífero confinado a semiconfinado. La principal fuente de alimentación es el río San Juan y en menor medida, la infiltración de los canales de riego y la lluvia. La salida de agua del sistema es debido a muchos factores, tales como: descarga del río San Juan, abastecimiento, evapotranspiración y flujo subterráneo. El volumen almacenado en la subárea San Juan, hasta un total de 200 m de acuífero saturado, es de 8000 a 9000 Hm³. En la subárea Caucete, para el mismo espesor de acuífero, el almacenamiento ha sido estimado en 4000 a 16000 Hm³ (PNUMA, 1972).

CUENCA DEL RÍO JÁCHAL

El río Jáchal nace con el nombre de Salado a los 5500 m y desemboca en el río Blanco o Podrido, que hacia el sur recibe los ríos de La Brea y Santa Rosa. Más al sur confluye con el río San Guillermo, para formar el río Jáchal (CFI, 1961). En la localidad de Palca recibe el río de La Palca, formado por el río de La Sal y su afluente Las Taguas y el río del Valle del Cura; el punto de confluencia es considerado el inicio del Jáchal (Bereciartua *et al.*, 2009). La subcuenca del río de La Palca, recoge los aportes de un importante frente cordillerano, entre los paralelos de 27° 37' y 30° 47' S y se extiende varios kilómetros al norte del Nevado de los Tambillos (5547 m) hasta el C° Bañados (5340 m). Aguas abajo recibe aportes menores del cordón Nevados del Colanguil. Luego de la depresión Barreal-Rodeo cambia bruscamente de rumbo al este y recibe el arroyo Iglesias o Tocota, cuyo principal afluente es el arroyo Agua Negra, que colecta los excedentes de la Cordillera Principal y de la Cordillera de Olivares. En las cabeceras de las distintas subcuencas existen numerosos cuerpos de hielo (descubierto y glaciares de escombros). Los glaciares descubiertos ocupan una superficie aproximada de 112 km², distribuidos en 937 cuerpos de tamaños variables entre 0,1 ha a más de 1000 ha. El mayor número y extensión se localiza sobre la Cordillera Principal, en el sector de la subcuenca del río de La Palca y arroyo Agua Negra (UNSJ, 2010).

En San José de Jáchal los caudales se agotan completamente durante los meses estivales por su uso en riego. Al atravesar las sierras de Mogna se derrama junto al río Huaco en los Bañados del Zanjón, con dos emisarios: Zanjón Nuevo y Zanjón Viejo (Figura 2). Posee una cuenca de 34600 km² (Lupano y Abeucci, 2008), y es pobre en caudal. Sobre la extensión de la cuenca superficial se desarrollan importantes acuíferos que se localizan sobre el valle de Iglesia es una depresión intermontanas de rumbo norte-sur y origen tectónico, en el valle de Jáchal-Niquivil y en la depresión intermontanas de Huaco

HIDROLOGÍA

En la cuenca del río San Juan existen cuatro estaciones activas donde se realizan aforos líquidos sistemáticos. Dos sobre el río Los Patos: Álvarez Condarco en la cuenca superior y La Plateada, aguas abajo de la unión con el Blanco. Sobre el San Juan, en Km 101, antes de atravesar las sierras del Tontal y otra en Km 47,3, camino a Calingasta; en este segmento, el río San Juan sólo recibe algunos afluentes esporádicos. La información de base disponible son series de caudales diarios medios proporcionados por la Subsecretaría de Recursos Hídricos. Dichas series poseen diferente longitud de registros, con interrupciones de extensión variable. En las estaciones de aforo citadas también se realizan en forma esporádica aforos de sólidos en suspensión. Se dispone de datos históricos de concentración de sedimentos e información moderna (concentración, geometría y características hidráulicas de la corriente) colectada por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación. Las características de las estaciones de aforo se muestran en la Tabla 1 (EVARSA, 1998).

Los vacíos de información de escurrimiento superficial fueron completados empleando distintos procedimientos (Gyau-Boakye, 1994). Para una longitud de tres días de datos perdidos se emplea un polinomio interpolador de tercer grado. Si la extensión del vacío varía entre 4 y 20 días se usa un modelo autoregresivo de primer orden con corrección. Para vacíos mayores de 20 días se utiliza el método MOVE (Maintenance of Variance Extensión) (Hirsch, 1982, *cit.* Salas, 1992). Se emplea cuando existe información en otro sitio con características similares (estación base) y que posea un registro común, que incluya la interrupción. Este método preserva mejor las características estadísticas de la serie que los métodos tradicionales de regresión (Salas, 1992).

A partir de la información existente, previo completado de vacíos de información, se definieron variables hidrológicas de caudal, tales como: caudal anual Q_A , caudal diario máximo medio Q_{max} , caudal diario mínimo medio Q_{min} , caudales característicos (caudales diarios medios superados durante 10, 30, 90, 180, 270 y 355 días al año), **CCM**, **Q30**, **Q90**, **Q180**, **Q270** y **CCS**, respectivamente, caudales de cada mes Q_{MES} y caudales estacionales (verano Q_v , otoño Q_o , invierno Q_i y primavera Q_p). El año hidrológico se extiende de julio a junio en todos los sitios analizados.

Posteriormente, se efectúa un análisis exploratorio de los datos (**AED**) con el objeto de ordenar y preparar la información disponible. En primer lugar, se identifican los posibles datos atípicos; luego se realiza un análisis numérico de las variables definidas previamente, que permitan su caracterización de manera sintética. Posteriormente se evalúan aspectos relacionados con la normalidad, independencia y posición de dos o más grupos o aleatoriedad de las observaciones (Figueras y Gargallo, 2003).

Cuando se examinan las series de las variables de caudal a veces se presentan datos fuera de rango, atípicos o dudosos. Se trata de medidas muy grandes o pequeñas comparadas con el resto de los valores de la variable bajo análisis y se sospecha que no son representativos de la población de donde se ha extraído la muestra. Para probar la presencia de ellos se emplean test como: Test de Grubbs (U.S. Army Corps of the Engineers, 2001), el Test de Rosner (EPA, 2000) y el desarrollado por la Interagency

Advisory Committee on Water Data (1982) (antiguamente WCR). Se han detectado valores atípicos en: 1954-55 y 1987-88. En general, los caudales atípicos detectados responden a fenómenos globales de características excepcionales como el fenómeno de El Niño (Trenberth, 1997) y difícilmente se puedan deber a errores en las mediciones. Dado que la gran mayoría de las variables hidrológicas empleadas provienen de promedios de un conjunto de observaciones más o menos importantes, con escasos vacíos de información, no se los excluirá.

Para cada variable hidrológica se verificaron las condiciones de: normalidad, independencia y aleatoriedad. Para evaluar la normalidad, se aplicaron los Test de Asimetría y Curtosis (Snedecor y Cochran, 1962, cit. Salas *et al.*, 1980). La independencia entre las observaciones se evaluó mediante el Test de Bartlett y el test de Von Neuman. La medida de la aleatoriedad se realizó mediante el Test de Rachas y Test de Kendall (Kundzewicz y Robson, 2000).

Los valores característicos (promedio, desvío estándar, coeficiente de variación y valores extremos) de las variables de caudal se muestran en la Tabla 2 y Tabla 3; además, se determinó el volumen de descarga **D** (derrame mensual, estacional y anual), caudal específico **q** y lámina de escurrimiento **E**. En todos los casos, el hidrograma medio es unimodal, con un periodo de aguas altas comprendido entre noviembre y febrero, con caudales de estiajes en otoño e invierno, siendo los caudales Q_0 y Q_1 similares con diferencias del orden del 10%. Los caudales diarios medios extremos son importantes, del orden de $700 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, excepto en Los Patos Superior. En los meses estivales se observa una importante variación diaria en los caudales instantáneos, vinculado estrechamente con la gran amplitud térmica diaria.

Se muestra un resumen del **AED**, para las variables analizadas. La nomenclatura empleada es: **A** no se rechaza la hipótesis, **R** se rechaza la hipótesis para un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$. La secuencia es: test de normalidad, independencia y aleatoriedad respectivamente. Como en cada caso, se han aplicado distintos métodos, se ha tomado un criterio restrictivo, basado en el hecho que para asumir estadísticamente la condición de normalidad, o independencia o aleatoriedad de la serie analizada, ningún método debía rechazar tal hipótesis. La condición de normalidad es rechazada en el 66% de los casos, siendo la estación Álvarez Condarco en Los Patos Superior la que más presenta falta de normalidad; la ausencia de independencia y aleatoriedad ocurre en el 27% de las series analizadas, destacándose la sección Km 47,3 sobre el San Juan.

El río Los Patos Superior, medido en Álvarez Condarco, drena la cuenca sur y sus afluentes tienen su nacimiento en alturas mayores de 5000 m (C° Aconcagua, Mercedario, Iglesias, etc.); aguas abajo se une con el Blanco que también drena un importante sector de altas cumbres (Ansilita, Totoras, la Ramada, etc.) y es aforado en La Plateada, en la parte superior del valle de Calingasta. Esta subcuenca aporta aproximadamente el 70% del caudal de río San Juan en origen (estación Km 101) y presenta un caudal específico de $5,31 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$. Hasta trasponer la sierra del Tontal el río no recibe afluentes importantes y su derrame en la estación Km 47,3 es similar a la de aguas arriba, con una disminución importante en su riqueza hídrica con $q = 2,3 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$. La curva de permanencia de los caudales mensuales indica que durante el 30% de los días al año el caudal

se encuentra por arriba de la media. Los valores de Q_A en Km 101 y Km 47,3 son de 64,28 y 59,43 $m^3 \cdot s^{-1}$, respectivamente y es debido a la importante diferencia de longitud de registros; para un periodo común son prácticamente iguales. Presenta una gran irregularidad interanual con el 50% aproximadamente de los años registrados con valores extremadamente ricos o pobres y menos del 10% solamente corresponde a años típicos.

Para las series de caudal anual, las observaciones se tipificaron en años húmedos, años medios o años secos. El sistema de clasificación empleada define siete categorías a saber: año extraordinario, derrame superior al 35% de la media histórica; año rico, entre un +15% y un +35%; año medianamente rico, derrame comprendido entre un +5% y +15% del promedio de la serie; año medio o típico, volumen entre un +5% y -5% de la media; año medianamente pobre, volumen comprendido entre un -5% y -15% por debajo de la media; año pobre, derrame entre un -15% y -35% por debajo de la media; y muy seco; volumen un -35% por debajo de la media histórica. Esta forma de categorización permite un análisis de la irregularidad interanual. En la Tabla 4 se muestran los porcentajes de caudal anual comprendido en cada rango. Como se podrá observar, no existen diferencias importantes en las distintas series y los años muy ricos y muy secos representan el 50% de los casos, en tanto que los años típicos o normales solamente el 7% aproximadamente, lo que denota la gran irregularidad interanual presente en la cuenca del San Juan

En la cuenca del río Jáchal los caudales han sido observados en la sección Pachimoco (30° 13' S y 68° 50' O). El año hidrológico es de julio a junio y sus registros se extienden desde el año 1928-29 hasta 1989-90, con un periodo de interrupción de 8 años. El caudal anual medio 10,20 $m^3 \cdot s^{-1}$ y caudales extremos diarios medios de 214,0 y 2,0 $m^3 \cdot s^{-1}$, para el máximo y mínimo respectivamente. Pese a que esta subcuenca se desarrolla sobre alturas notables, la línea de nieve perenne se encuentra más alto que muchas de las cumbres presentes en la subcuenca y sólo en ocasiones se cubren de nieve, por lo que su contribución al derrame del río es pobre; la contribución líquida es muy escasa e irregular. La curva de permanencia de los caudales mensuales indica que durante más de los 290 días al año el caudal se encuentra debajo de la media y alcanza un mínimo de 37%. Algunos valores característicos (promedio, desvío estándar, coeficiente de variación y valores extremos) de las variables de caudal se muestran en la Tabla 2 y Tabla 3; además, se determinó el derrame (mensual, estacional y anual) **D**, caudal específico **q** y lámina de escurrimiento **E**.

RÉGIMEN FLUVIAL

Las variaciones estacionales del volumen de agua transportado por una corriente es función de las variaciones estacionales de la temperatura y precipitación. Es por ello que entre los extremos de los caudales medios mensuales se presenta una serie de caudales que, en el ciclo anual, describen una curva regular a la que se denomina régimen fluvial (Bruniard, 1992). Es un indicador de su principal fuente de alimentación. Para cada una de las estaciones de aforos analizadas se ha determinado el tipo de régimen en función de la clasificación adaptada de Parde (1955, *cit.* Bruniard, 1992), por ser ésta la más completa y la que presenta un mayor número de subclases.

Los ríos cuyanos (San Juan, Mendoza, Tunuyán, Diamante y Atuel), con nacientes en los Andes Centrales, presentan distintos regímenes de alimentación simple: regímenes glaciarios y regímenes nivales de montaña. El primero se presenta en las cuencas de los ríos Mendoza, Tunuyán y Atuel. En ellos, la ablación glaciaria superficial ocurre en la estación cálida y genera grandes crecidas, más o menos violentas en función del mayor o menor ascenso de la temperatura. En el invierno, la fusión en profundidad no se detiene y aseguran el mantenimiento de un caudal mínimo en la estación fría. Otro, es el régimen nival de montaña, donde el efecto orográfico determina que la fuente de alimentación sea más perdurable y un período de fusión más prolongado y menos pronunciado. La gradación en altura de la cuenca provoca una disminución en la temperatura, evaporación e incremento de la proporción sólida en la precipitación. Se presentan distintos subtipos, según la secuencia de ocurrencia de los caudales altos.

El subtipo nival puro (diciembre, enero, noviembre y febrero) es propio de la cuenca del río de Los Patos, en Álvarez Condarco y en La Plateada. La nieve se acumula en el período abril a septiembre y funde completamente durante los cuatro meses cálidos de noviembre a febrero. Aguas abajo, sobre el río San Juan continúa con el mismo régimen (secciones Km 101 y Km 47,3); ello no implica que no exista la ablación de los cuerpos de hielo, sino que el aporte es menor, en relación al aporte por fusión nival. La Figura 5 muestra la marcha anual adimensional de los caudales mensuales en el año hidrológico, para las distintas secciones de aforo.

En la cuenca del río Jáchal el régimen fluvial ha sido determinado en la sección Pachimoco, presenta una secuencia de caudales mensuales máximos de: enero, diciembre, febrero, lo que indica un régimen simple de alimentación sólida, subtipo glaciario mitigado, lo que revela la contribución de la fusión del hielo presente en los glaciares cubiertos. Por otra parte, los caudales correspondientes a enero y diciembre son similares, lo que mostraría un subtipo nivo-glaciario (secuencia de máximos: diciembre, enero, febrero y noviembre). También, el caudal de febrero y noviembre son muy parecidos, lo que señalaría un subtipo nival puro (secuencia: diciembre, enero, noviembre y febrero). Los distintos subtipos reflejan la variabilidad en la fuente de alimentación.

HOMOGENEIDAD

DETECCIÓN DE TENDENCIA DE LARGO PLAZO O CAMBIOS ABRUPTOS

Se realizó el análisis de homogeneidad para determinar si las series son estacionarias; es decir, aquellas que provienen de regímenes hidrológicos que no han sufrido alteraciones naturales o artificiales. Las faltas de homogeneidad más frecuentes provienen de la intervención humana (trasvase de cuenca, construcción de embalses, cambios en el uso del suelo, etc.) y de fluctuaciones en el régimen de las precipitaciones y las temperaturas, producto de cambios a escala global. En los sistemas naturales la variabilidad es la condición normal y por lo tanto no existen series estrictamente homogéneas. Pese a ello, a los fines prácticos pueden ser consideradas como series estacionarias, ya que la información hidrológica empleada proviene de cuencas que poseen muy baja intervención humana.

Los cambios en las condiciones climáticas, registrados durante las últimas décadas del siglo XX, no tienen precedentes en el contexto temporal de los últimos 1000 años (Mann *et al.*, 1998). Se destacan: aumento entre 0,5 y 0,6°C de la temperatura media del planeta desde comienzos del siglo XX (Oerlemans, 1994), importante incremento en la atmósfera de las concentraciones de gases de efecto invernadero, elevación del nivel medio del mar, disminución de la extensión y el espesor de los hielos árticos, retrocesos de glaciares de montaña (Warrick *et al.*, 1996), degradación del permafrost, prolongadas sequías o catastróficas inundaciones durante los últimos 100 años, cambios en la distribución espacial de las precipitaciones, etc. Sumado a ello, se tiene que un porcentaje de tierras con cubierta vegetal, entre un 39 a 50%, ha sido alterado por la actividad humana (Duarte, 2006). Estas cifras subestiman su efecto global puesto que, en muchas ocasiones, las tierras no afectadas han sido fragmentadas por la modificación de las áreas circundantes.

Los sistemas hidrológicos son potencialmente sensibles al cambio climático, al igual que la población, sus actividades y la infraestructura socioeconómica existente en el territorio de sus cuencas. Este se pone en evidencia, no sólo por el calentamiento de la superficie terrestre y la consecuente modificación de las condiciones de circulación de las masas de aire, sino que además trae aparejado importantes modificaciones en la magnitud y temporalidad de los escurrimientos.

En general, la cuenca del río San Juan posee muy baja intervención humana, pero la sola sospecha de cambios a escala planetaria en las condiciones climáticas obliga a evaluar el régimen de escurrimiento en lo relacionado con modificaciones en la tendencia de largo plazo o cambios abruptos en los valores medios de las variables hidrológicas definidas anteriormente.

La estimación de la magnitud de la tendencia se realiza mediante estimador no paramétrico, robusto e insesgado, propuesto por Hirsch *et al.* (1982). Para la estimación de la tendencia se emplearon los Test de **t** de Student (Remington y Schork, 1974), **SROC** (Sperman Rank Order Correlation) usado por la Organización Meteorológica Mundial (Kundzewicz y Robson, 2000), Mann y Kendall (Hirsch *et al.*, 1982; Westmacott y Burn, 1997). Para las series donde la condición de independencia es rechazada se aplicaron dos modificaciones al test. Una de ellas está basada en la corrección de la varianza (Hamed y Rao, 1998), la otra, denominada de preblanqueo (Yue *et al.*, 2002).

Existen numerosos métodos para la detección de cambios abruptos o graduales en una serie de observaciones hidrológicas (Rodionov, 2005). El test más comúnmente usado es el test paramétrico **t** de Student secuencial. Se basan en la verificación de la igualdad estadística de dos medias muestrales. También, se aplicaron otros test como: Pettitt (Pettitt, 1979), Buishand (Buishand, 1982) o Worsley (Worsley, 1979). Se tratan de test de fácil aplicación y válidos para la detección de un solo punto de cambio. Su principal inconveniente radica en el hecho que en algunos casos previamente debe eliminarse la tendencia en la serie y que las observaciones se encuentren normalmente distribuidas.

La homogeneidad de las series, se verifica a partir de la determinación de cambios graduales o abruptos, para un nivel de significancia de $\alpha=5\%$. También, en este análisis se aplicó el criterio exigente; la sola indicación de no homogeneidad significativa de algún método se toma como motivo de sospechas de cambios graduales o saltos en la serie analizada. Los resultados se muestran en el Tabla 5, indica si la tendencia no paramétrica es creciente o decreciente y únicamente se muestra la magnitud en el caso de ser estadísticamente significativa; también, los dos últimos dígitos del año de quiebre en los valores medios conjuntamente con su signo (salto positivo o negativo en los valores medios de la variable).

Los ríos cuyanos, entre los 30° y 40° S, se caracterizan por la gran variabilidad interanual debido a su fuerte dependencia de las fluctuaciones a escala global, que se correlacionan significativamente con ENOS (El Niño Oscilación del Sur) (Compagnucci y Vargas, 1998; Compagnucci *et al.*, 2000; Compagnucci y Araneo, 2007). En la cuenca del río San Juan, la serie Km 101 medida sobre el río San Juan no presenta tendencia significativa en ninguna de las variables de caudal; en el resto (secciones Alvarez Condarco, la Plateada y Km 47,3) el caudal diario mínimo (Q_{\min}) y el caudal característico superado 355 días al año (CCS) serían cada vez más grandes. En los ríos Los Patos (La Plateada) y San Juan (Km 47,3) las variables caudal diario rebasado 270 días al año (Q_{270}), caudal mensual de agosto (Q_{AGO}), septiembre (Q_{SET}) y caudal de invierno (Q_I) presentan tendencias significativas positivas. Para Km 47,3, el periodo de junio a octubre tiende a ser más altos. El caudal anual (Q_A) y estacionales, excepto invierno, en la cuenca del río San Juan, no poseen tendencias significativas; dichos resultados son concordantes con los hallados por Boninsegna (2009); por otra parte, Celis *et al.* (2009) señalan que hay indicios de una leve tendencia negativa en el caudal anual, correspondientes a las series históricas de los ríos Los Patos y San Juan, aspecto que no podido ser demostrado. La Figura 5 muestra la serie de Q_{\min} y su correspondiente recta de tendencia para los 4 sitios de aforos en la cuenca del San Juan.

En relación a la detección de cambios abruptos en las series históricas, el test *t* de Student Secuencial señala puntos de quiebre estadísticamente significativos de manera más frecuente que los otros test. Muchas veces se presentan saltos múltiples, que ningún test de los empleados los identifica. Debe recordarse que los test empleados requieren la condición de normalidad en la distribución, aspecto que sólo se cumple en el 30% de las series analizadas, lo que introduce un importante nivel de incertidumbre en los resultados.

Existen evidencias de cambios abruptos en la gran mayoría de las variables en la cuenca del río San Juan, a mediados de la década del 70, alrededor de 1976 o 1977, de manera más frecuente. En general, los caudales correspondientes a aguas altas (Q_{\max} , Q_{10} , Q_{30} , Q_{NOV} , Q_{DIC} , etc.) no presentan cambios significativos y solo en un caso el salto es negativo. En la cuenca del río San Juan no poseen tendencias significativas; dichos resultados son concordantes con los hallados por Boninsegna (2009); por otra parte, Celis *et al.* (2009) señalan que hay indicios de una leve tendencia negativa en el caudal anual, correspondientes a las series históricas de los ríos Los Patos y San Juan, aspecto que no podido ser demostrado. Los ríos cuyanos han registrados caudales bajos, particu-

laramente en la década de 1960 a 1970, que luego se han recuperado asociado al evento El Niño (Carril *et al.*, 1997), como se demuestra al detectar cambios abruptos positivos en los valores medios a partir de los años 70. Para algunos ríos cuyanos localizados entre los 30° y 37°S se han identificados cambios abruptos en los años 1945 y 1976, aproximadamente (Masiokas *et al.*, 2010). La Figura 5 y Figura 6 muestran los cambios abruptos para la variable Q_{JUL} en los 4 sitios por medio de tres gráficos: a) anomalía adimensionales, b) desviaciones acumuladas y c) tendencias y saltos.

PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS

La cuantificación de los procesos erosivos, típicamente expresada a través de los volúmenes de sedimentos producidos por una cuenca hídrica, y por ende el nivel de degradación o grado de erosión exhibido por la misma, puede hacerse en forma indirecta: a través de relevamientos topográficos y batimétricos de los vasos de eventuales embalses, o bien mediante la utilización de mediciones sistemáticas de caudales sólidos en los cursos de agua, o alternativamente a través de la aplicación de diversas técnicas de estimación. Los relevamientos y mediciones son sumamente importantes en el proceso de validación de distintas metodologías que comúnmente se emplean para estimar la producción de sedimentos en cuencas sin registros. En efecto, no todas las cuencas que componen una región poseen mediciones sistemáticas de caudales sólidos, ni tampoco poseen embalses construidos o, si estos existen, es probable que no se cuente con una cantidad adecuada de relevamientos topo-batimétricos. En relación a los sedimentos producidos por erosión superficial están asociados principalmente al fenómeno de destrucción del suelo por el impacto directo de las gotas de lluvia y el posterior transporte de las partículas por parte del escurrimiento superficial. Este es un proceso que muestra un cierto grado de continuidad temporal asociada a eventos hidrológicos ordinarios característicos de la cuenca. Por su parte, los sedimentos producidos por remoción en masa (deslizamientos de laderas, colapso de márgenes, flujos de barro, flujos de detritos, etc.) se vinculan con eventos hidrológicos extremos y no presentan la continuidad temporal de los primeros. Cabe señalar que tanto las mediciones sistemáticas de caudales sólidos como así también los relevamientos topo-batimétricos de los embalses contemplan en forma agregada los dos tipos de producción de sedimentos mencionados anteriormente.

La estimación de la producción global de sedimentos en una cuenca es un tema que merece especial atención en la planificación de los recursos hídricos de una región. Aunque se han desarrollado modelos más o menos sofisticados a escala distribuida (de Vente *et al.*, 2005) su aplicación no es sencilla por el elevado número de parámetros, y en ciertas instancias de planes de aprovechamiento hídrico (por ejemplo, estudios de factibilidad de sistemas de embalses) se requiere de una estimación expeditiva del aporte global potencial de sólidos al reservorio y no de una modelación detallada.

La metodología aplicada en este trabajo se basa en la determinación del caudal sólido en suspensión y su correspondiente degradación específica en la cuenca del río San Juan, a partir del establecimiento de la relación funcional de forma potencial (Department of Interior, Bureau of Reclamation, 1977) entre caudal líquido y sólido en suspensión.

Con el objeto de mejorar las estimaciones, en cada estación las curvas de transporte para material en suspensión (Q_{ss}), en función del caudal medio diario (Q_d), se ajustaron a series parciales: *estiaje*, cuando las observaciones se realizan durante los meses de julio a septiembre y de abril a junio; *crecida*, aforos realizados entre el 1 de octubre y el caudal pico, que normalmente se presenta a mediados de diciembre, y *bajante*, desde el caudal máximo de crecientes al 31 de marzo. Las tres conforman la serie total con muy buenos coeficientes de determinación. Posteriormente se calcularon los valores de caudal sólido diario para toda la serie y los correspondientes acumulados mensual y anual. Luego se realizó la determinación de la degradación específica anual de cada cuenca.

Por otra parte, se establecieron en todas las estaciones de la cuenca, excepto en Km 101, las relaciones de geometría hidráulica que describen el carácter de un cauce en relación con las variaciones de la profundidad media, ancho y velocidad en una sección transversal en particular, por ejemplo la sección de aforos. Aún se requiere un mayor número de investigaciones para poder establecer relaciones cuantitativas de la geometría hidráulica más precisas y para comprender sus mecanismos que, en parte, se relacionan con el transporte de sedimentos del río (Vich, 1996). A pesar de las deficiencias es posible deducir y utilizar una relación aceptable para la mayoría de los cauces como las que se muestran en la Tabla 6.

Finalmente, a partir de la información hidrológica disponible (series de caudales líquidos medios diarios) y las relaciones de geometría hidráulica, se realizó la estimación de la producción anual de material (fracción granular “gruesa”) que es capaz de transportar la corriente. Sobre la base de experiencias previas en ríos de similares características se decidió la aplicación de las siguientes formulaciones para predecir la capacidad de transporte de sedimentos empleando las fórmulas que predicen la carga de fondo (bed-load) como Meyer-Peter & Müller (MPM), Engelund & Fredsoe (MPM modificada) y Parker. En general, las distintas aplicaciones se presentan en una banda de dispersión que se reduce a menos de un orden de magnitud. Como estimación expeditiva se usó el promedio de las aplicaciones (Q_{sf}). Posteriormente, a este valor se le adiciona el caudal en sólido de suspensión y se obtiene la carga total o producción de sedimentos total. Se calcula la degradación específica y se observa que la mayor tasa de erosión se presenta en la cuenca del río los Patos con cierre en La Plateada, donde el agua de fusión y lluvia circula por un relieve muy accidentado. En tanto que la degradación total de la cuenca del río San Juan es más baja ya que el sector medio y bajo de ella se desarrolla sobre una región de escasísimas precipitaciones. La Tabla 7 presenta los valores mensuales y anuales promedio de producción de sedimentos en suspensión y degradación específica

BIBLIOGRAFÍA

- ANIYA, M. & Y. WAKAO, 1997. Glacier variations of Hielo Patagónico Norte, Chile, between 1944/45 and 1995/96. *Bulletin of Glacier Research* 15:11-18.
- BERECIARTUA, P., N. ANTUNEZ, L. MANCELLI, P. LÓPEZ, & C. CALLAU PODUJE, 2009. *Estudio Integral de la cuenca del río Desaguadero-Salado-Chadileuvú-Curacó-Colorado*. Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería.
- BONINSEGNA, J., 2009. *Impacto del Cambio Climático en la región Centro Oeste de Argentina y posibles medidas de adaptación*. Foro: Escenarios climáticos y medidas de adaptación. 25 – 26 de febrero de 2009. Secretaria de Ambiente de la Nación. Buenos Aires. www.ambiente.gov.ar/archivos/web/AdCC/File/09_boninsegua.pdf
- BOTTERO, R., 2002. Inventario de Glaciares de Mendoza y San Juan”, IANIGLA. En: *IANIGLA: 25 Años de Investigación Básica y Aplicada en Ciencias Ambientales* (Ed. Darío Trombotto; Ricardo Villalba). Mendoza. Zeta Editores. 2002. ISBN 987-43-4545-4.
- BUISSHAND, T. A., 1982. Some methods for testing the homogeneity of rainfall records. *Journal of Hydrology* 58:11-17.
- BRUNIARD, E., 1992. *Hidrografía. Procesos y tipos de escurrimiento superficial*. Editorial CEYNE.
- CARRIL, A., M. DOYLE, V. BARROS & M. NÚÑEZ, 1997. Impacts of climate change on the oases of the Argentinean cordillera. *Climate Reserch* 9:121- 129.
- CELIS, A., F. OSTUNI, G. KISILEVSKY, E. SCHWARTZ, S. FERNÁNDEZ BOUZO & L. LOPRESTI, 2009. Cambio climático: variabilidad pasada y una prospectiva de las amenazas de acuerdo a los escenarios futuros. *Documento País: Riesgos de desastres en Argentina*. Cruz Roja Argentina, Centro Estudios Sociales y Ambientales. Buenos Aires.
- CFI, 1962. *Recursos Hidráulicos Superficiales*. Volumen I. Buenos Aires.
- COLOMBATO, J., M. COVAS DE GARCIA, G. TOURN, O. BENEITEZ & E. PÉREZ, 1983. *Estudio Integral de la cuenca del Desaguadero*. Centro de Investigaciones Geográficas, pp. 282. Santa Rosa, La Pampa.
- COMPAGNUCCI, R. & W. VARGAS, 1998. Inter-annual variability of the cuyo river’ streamflow in the Argentinean Andean mountains and ENSO events. *International Journal of Climatology* 18: 1593–1609.
- COMPAGNUCCI, R., S. A. BLANCO, M. A. FIGLIOLA & P. M. JACOVKIS, 2000. Inter-annual variability of the Cuyo rivers’ stream flow in the Argentinean Andean mountains and ENSO events. *Environmetrics* 11: 251-269.
- COMPAGNUCCI, R. & D. ARANEO, 2007. Alcances de El Niño como predictor del caudal de los ríos andinos argentinos. *Ingeniería Hidráulica en México*. XXII (3): 23-35.
- CORIA JOFRÉ, D., 1999. *Uso conjunto del agua superficial y subterránea. Valles de Tulum, Ullum y Zonda*. Centro Regional de Agua Subterránea (CRAS). San Juan.
- DE VENTE, J., J. POESEN & G. VERSTRAETEN, 2005. The application of semi-quantitative methods and reservoir sedimentation rates for the prediction of basin sediment yield in Spain. *Journal of Hydrology* 305: 63–86.

- DUARTE, C. (ed.), 2006. *Cambio Global. Impacto de la actividad humana sobre la Tierra*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, pp. 170. Colección Divulgación. Madrid.
- EPA, 2000. *Guidance for data quality assessment. Practical methods for data analysis*. EPA QA/G-9. QA00 Update, pp. 219.
- EVARSA, 1998. *Estadística Hidrológica 1997*. Secretaría de Recursos Naturales y Desarrollo Sustentable, Subsecretaría de Recursos Hídricos. Tomo I y Tomo II. Buenos Aires.
- FAUD-UNSJ, 2007. *Identificación de estrategias para la formulación de planes de ordenamiento territorial para los departamentos de Jáchal, Iglesias y Calingasta. Etapa I Diagnóstico integrado Departamento Jáchal*. Convenio de Asistencia Técnica. Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Diseño, Universidad Nacional de San Juan. San Juan.
- FIGUERAS, S. & P. GARGALLO, 2003. *Análisis Exploratorio de Datos* (en línea)
<http://www.5campus.com/leccion/aed>
- GONZÁLEZ LOYARTE, M., 1995. La diagonale aride Argentine: une réalité écologique oscillante. *Sécheresse* 1(6): 35-44.
- GYAU-BOAKYE, P. & G. A. SCHULTZ, 1994. Filling gaps in runoff time series in West Africa. *Hydrological Sciences - Journal - des Sciences Hydrologiques* 39(6): 621-636.
- HAMED, K.H. & A.R. RAO, 1998. A Modified Mann-Kendall Trend Test for Autocorrelated Data. *Journal of Hydrology* 204: 182-196.
- HIRSCH, R., J. SNACK & R. SMITH, 1982. Techniques of Trend Analysis for Monthly Water Quality data. *Water Resources Research* 18(1):107-121.
- INTA, 1984. *Documento básico para el programa de riego y drenaje*. EEA. Mendoza. Luján. INCYTH. 1976. Informe
- INTERAGENCY ADVISORY COMITÉ ON WATER DATA, 1982. *Guidelines for Determining Flood Flow Frequency*. Bulletin 17 B. U.S. Department of Interior, Geological Survey. Office of Water Data Coordination.
- KUNDZEWICZ, Z. & A. ROBSON, 2000. *Detecting trend and other changes in hydrological data*. WCDMP-45. WMO/TD No 1013. Geneva.
- LANDA, A., 1946. Reseña histórica de obras hidráulicas y el régimen legal de las aguas de la provincia de San Juan. *Boletín de de la Junta de Historia de la provincia de San Juan* 9:3-69.
- LEIVA, J., L. LENZANO, G. CABRERA & J. SUAREZ, 1989. Variations of the Río Plomo glaciers, Andes Centrales Argentinos. En: J. Oerlemans (ed), *Glacier Fluctuations and Climatic Change*: 143 - 151. Kluwer Academic Publishers.
- LUPANO, C. & C. ABEUCCI, 2008. Cuenca del rio San Juan. Cuenca N° 54. En: Subsecretaría de Recursos Hídricos. *Atlas Digital de los Recursos Hídricos Superficiales de la República Argentina* CD-ROM, Buenos Aires.
- MANN, M., R. BRADLEY & M. HUGHES, 1998. Global-scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries. *Nature* 392: 779-787.
- MARTÍNEZ CARRETERO, E., 2013. La Diagonal Árida Argentina. Entidad Bioclimática. En: D. Pérez (ed.), *Restauración Ecológica en la Diagonal Árida Argentina*, pp. 14-31.

- MASIOKAS, M., R. LBA, B. LUCKMAN & S. MAUGET, 2010. Intra- to Multidecadal Variations of Snowpack and Stream flow Records in the Andes of Chile and Argentina between 30° and 37°S. *Journal of Hydrometeorology* 11: 822-831.
- MILLER, A., 1976. The climate of Chile. En: W. Schwerdtfeger, (ed.), *World Survey of Climatology. Climates of Central and South America*. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
- MIRANDA, O., 1999. *Uso del agua subterránea para riego en los valles sanjuaninos*. Primeras Jornadas Interdisciplinarias de Estudios Agrarios y Agroindustriales. Facultad de Ciencias Económicas, Universidad Nacional de Buenos Aires. Buenos Aires.
- OERLEMANS, J., 1994. Quantifying global warming from the retreat of glaciers. *Science* 264: 243-245.
- PETTITT, A., 1979. A nonparametric approach to the change-point problem. *Applied Statistics* 28: 126-135.
- PNUMA, 1972. *Reconocimiento de las aguas subterráneas en los valles de Tulun y Ullum-Zonda. Provincia de San Juan*. Informe Técnico No. 1.
- PROHASKA, F., 1976. The climate of Argentina, Paraguay and Uruguay. En: W. Schwerdtfeger, (ed.), *World Survey of Climatology. Climates of Central and South America*. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
- REMINGTON, R. & M. SCHORK, 1974. *Estadística Biométrica y Sanitaria*. Prentice Hall Internacional.
- RODIONOV, S., 2005. *A brief overview of the regime shift detection methods*. Joint Institute for the Study of Atmosphere and Ocean. University of Washington.
- [hpt://www.beringclimate.noaa.gov/regimes/Regime_shift_methods_list.htm](http://www.beringclimate.noaa.gov/regimes/Regime_shift_methods_list.htm).
- SALAS, J., J. DELLEUR, V. YEVJEVICH & W. LANE, 1980. *Applied modeling of hydrologic time series*. Water Resources Publications. Colorado.
- SALAS, J., 1992. Analysis and modelling of hydrologic time series. En: Maidment, David (ed), *Handbook of Hydrology*. MacGraw-Hill.
- TRENBERTH, K., 1997. The definition of El Niño. *Bulletin of American Meteorology Society* 78: 2771-2777.
- UNSJ, 2010. *Relevamiento inicial de los glaciares de San Juan. Informe Final*. Convenio: Universidad Nacional de San Juan, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Instituto de Geología (INGEO) y Gobierno de la provincia de San Juan, Secretaría de Estado de Minería . San Juan, 27 de diciembre de 2010.
- U.S. ARMY CORPS OF THE ENGINEERS, 2001. *Performance Evaluation (PE) Program*. Engineer Manual 200-1-7.
- U S DEPARTMENT OF INTERIOR, BUREAU OF RECLAMATION, 1977. *Design of small dams: Appendix A reservoir sedimentation*.
- VICH, A., 1996. *Aguas Continentales. Formas y Procesos*. Talleres Gráficos de CELA-INA, pp. 190. Zeta Editores.
- VILLALBA, R., J. LEIVA, S. RUBULIS, J. SUAREZ & L. LENZANO, 1990. Climate, tree rings and glacier fluctuations in the Frías valley, Río Negro, Argentina. *Arctic and Alpi-*

ne Research 22: 150-174.

WESTMACOTT, J. & D. BURN, 1997. Climate Change Effects on the Hydrologic Regime within the Churchill Nelson River Basin. *Journal of Hydrology* 202: 263-279.

WORSLEY, K., 1979. On the likelihood ratio test for a shift in location of normal populations. *Journal of American Statistic Associations* 74: 365-367.

WARRICK, R., 1996. Changes in Sea Level. In: J. T. Houghton (ed.), *Climate Change 1995. The Science of Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, 359-405.

YUE, S., P. PILON & G. CAVADIAS, 2002. Power de Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series. *Journal of Hydrology* 259: 254-271.

Tabla 1. Estaciones de aforos: ubicación, área de drenaje, porcentaje de datos existentes, longitud de registro y número de aforos sólidos

Table 1. Gauging stations: location, drainage area, percentage of existing data, amplitude and number of records of solids

río	estación	sigla ⁽¹⁾	coordenadas		área (km ²)	cota (m)	datos ⁽²⁾ (%)	long. registro	No. aforos sólidos	
			lat.	long.					hist. ⁽³⁾	moder. ⁽⁴⁾
Jáchal ⁽⁵⁾	Pachimoco	JAC	30°13'	68°50'	25500	1160	88.4	1921-90	-	-
Los Patos	Álvarez	ACO	31°57'	69°42'	3710	1950	95.4	1951-10	1994	402
	Condarco	ACO	31°57'	69°42'	3710	1950	95.4	1951-10	1994	402
San Juan	La Plateada	LPL	31°53'	69°41'	8500	1950	95.8	1951-10	744	481
	Km 101	101	31°20'	69°06'	18348	1310	86.5	1971-10	-	335
	Km 473	473	31°32'	68°53'	25670	945	99.9	1951-10	1569	4567

(1) Denominación sintética de la estación de aforos.

(2) Porcentaje de datos disponibles de caudal diario medio, proporcionado por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación.

(3) Número de aforos sólidos históricos medidos por Agua y Energía, extraído de anales.

(4) Número de aforos sólidos proporcionados por la SSRH.

(5) Únicamente se disponen de observaciones de caudales mensuales, obtenido de anuarios.

Tabla 2. Características estadísticas y análisis exploratorio de datos. Caudales diarios en m³·s⁻¹

Table 2. Statistical characteristics and exploratory analysis of data. Annual, monthly and seasonal flow in m³·s⁻¹

río	estación	par. (1)	Q _A	Q _{max}	Q _{min}	CCM	Q30	Q90	Q180	Q270	CCS
Jáchal	Pachimoco	Media	10,16	42,67	4,97	76,17	18,23	11,00	7,70	5,95	3,63
		s									
		CV									
		max.	36,10	214,00	10,20						
		min.	3,72	6,00	2,00						
Los Patos	Alvarez Condarco	Media	20,08	89,57	4,74	58,27	47,29	27,22	13,14	9,02	5,90
		s	10,01	132,24	1,83	40,94	31,96	14,60	4,63	2,23	1,71
		CV	49,8	147,6	38,6	70,3	67,6	53,6	35,3	24,7	28,9
		max.	49,64	1010,00	10,32	169,84	128,22	72,52	26,56	17,00	10,82
		min.	5,41	11,04	1,70	7,77	7,25	5,92	5,24	4,54	2,90
Los Patos	La Plateada	AED	RAA	RAA	RAA	RAA	RAA	RAA	RAA	RRR	ARR
		media	45,02	166,58	12,57	129,76	104,51	58,95	30,04	21,30	15,25
		s	26,78	156,56	4,75	114,08	88,85	37,02	11,39	6,10	4,43
		CV	59,5	94,0	37,8	87,9	85,0	62,8	37,9	28,6	29,1
		max.	136,47	739,82	25,98	486,20	418,36	175,52	57,98	36,44	27,40
San Juan	Km 101	min.	11,64	25,58	3,00	19,40	16,91	12,30	10,30	9,59	7,17
		AED	RAA	RAA	ARR	RAA	RAA	RAA	RAA	ARR	ARR
		media	64,28	194,57	27,79	152,96	128,37	81,24	47,75	38,44	30,44
		s	32,38	172,47	7,98	124,52	97,08	44,94	16,61	11,01	8,48
		CV	50,4	88,6	28,7	81,4	75,6	55,3	34,8	28,6	27,8
San Juan	Km 101	max.	151,72	795,00	43,70	499,14	376,57	186,57	91,44	65,42	46,23
		min.	19,98	30,11	7,25	26,33	24,37	22,23	20,44	16,82	8,81
		AED	RAA	RAA	ARR	RAA	RAA	AAA	AAA	AAR	AAR
		media	59,01	169,65	28,05	136,17	114,37	72,39	44,98	37,44	30,89
		s	29,81	142,46	7,68	111,04	90,00	42,02	15,29	10,70	7,57
San Juan	Km 101	CV	50,5	84,0	27,4	81,5	78,7	58,1	34,0	28,6	24,5
		max.	149,92	663,14	45,00	474,69	391,38	196,63	86,16	65,46	46,04
		min.	19,83	32,15	10,00	28,52	24,60	21,98	18,78	17,16	13,80
		AED	RAA	RAA	ARR	RAA	RAA	RAA	ARR	ARR	ARR

(1) promedio (**media**), desvío estándar (**s**), valor máximo (**max.**), valor mínimo (**min.**), coeficiente de variación (**CV**) y Análisis Exploratorio de Datos (**AED**) con la siguiente nomenclatura: **A**=no se rechaza la hipótesis, **R**=se rechaza la hipótesis para un nivel de significancia $\alpha=5\%$, para las pruebas de normalidad, independencia y aleatoriedad, respectivamente.

Tabla 3. Características estadísticas y análisis exploratorio de datos. Caudal anual, mensual y estacional en m³·s⁻¹
 Table 3. Characteristic statistics and exploratory analysis of data. Annual, monthly and stationnal caudal in m³·s⁻¹

Río	Estación	Par. ⁽¹⁾	Q mensual, en m ³ ·s ⁻¹												
			ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	
Jachal	Pachimoco	media	16,15	12,87	10,04	8,65	8,32	7,20	6,46	6,53	7,83	9,80	12,49	15,65	
		s													
		CV													
		max.	114,00	69,30	41,20	25,80	17,80	13,80	13,20	13,90	14,40	28,80	51,90	144,00	
		min	3,40	3,60	3,80	3,80	4,50	3,30	3,20	3,00	4,00	4,40	3,70	3,10	
		AED													
		D	509,31	405,87	316,62	272,79	262,38	227,06	203,72	205,93	246,93	309,05	393,88	493,54	
q	0,63	0,50	0,39	0,34	0,33	0,28	0,25	0,26	0,31	0,38	0,49	0,61			
E	20,0	15,9	12,4	10,7	10,3	8,9	8,0	8,1	9,7	12,1	15,4	19,4			
Los Patos	Alvarez Condarco	media	42,30	26,70	17,61	12,22	9,86	8,19	7,40	8,63	10,13	17,13	32,78	48,09	
		s	30,73	15,95	8,35	4,73	3,37	2,56	2,24	5,07	2,75	6,99	18,65	34,37	
		CV	72,6	59,7	47,4	38,7	34,2	31,2	30,3	58,8	27,2	40,8	56,9	71,5	
		max.	127,82	82,23	42,70	26,59	20,17	15,15	11,74	43,53	19,15	36,70	95,94	134,13	
		min	7,01	6,87	6,12	5,44	4,89	3,72	3,18	4,04	4,71	5,16	5,19	5,35	
		AED	RAA	RAA	RAA	RAA	RAA	AAA	ARA	RRR	RAA	RAR	RAA	RAA	
		D	113,3	64,6	47,2	31,7	26,4	21,2	19,8	23,1	26,3	45,9	85,0	128,8	
q	11,4	7,2	4,7	3,3	2,7	2,2	2,0	2,3	2,7	4,6	8,8	13,0			
E	30,5	17,4	12,7	8,5	7,1	5,7	5,3	6,2	7,1	12,4	22,9	34,7			
Los Patos	La Plateada	media	85,61	54,00	37,17	27,07	22,78	20,31	18,76	19,59	23,76	41,29	78,98	110,79	
		s	74,59	36,71	19,46	12,77	8,60	7,06	6,34	5,62	6,52	17,01	55,23	102,07	
		CV	87,1	68,0	52,3	47,2	37,8	34,8	33,8	28,7	27,5	41,2	69,9	92,1	
		max.	351,86	170,14	101,12	72,27	42,95	35,33	37,29	36,11	38,56	86,33	276,80	451,08	
		min	14,34	15,78	14,76	9,77	9,51	8,13	7,68	8,74	10,42	10,80	12,14	11,33	
		AED	RAA	RAA	RAA	RAA	RAA	ARR	RRR	RRR	AAR	AAR	RAA	RAA	
		D	229,3	130,6	99,6	70,2	61,0	52,6	50,2	52,5	61,6	110,6	204,7	296,7	
q	10,1	6,4	4,4	3,2	2,7	2,4	2,2	2,3	2,8	4,9	9,3	13,0			
E	27,0	15,4	11,7	8,3	7,2	6,2	5,9	6,2	7,2	13,0	24,1	34,9			
San Juan	Km 101	media	111,63	78,88	55,42	43,80	41,52	41,44	38,80	38,05	39,57	55,57	97,13	129,77	
		s	85,93	50,56	28,11	19,22	15,07	13,26	11,51	10,78	10,35	20,43	64,43	104,04	
		CV	77,0	64,1	50,7	43,9	36,3	32,0	29,7	28,3	26,2	36,8	66,3	80,2	
		max.	330,93	222,90	131,64	95,42	75,13	77,41	69,59	64,59	58,74	115,30	329,09	368,07	
		min	20,10	21,30	16,75	16,78	17,07	21,88	18,71	18,68	20,60	20,79	16,55	15,75	
		AED	RAA	RAA	RAA	RRA	AAA	AAA	AAR	ARR	ARR	AAA	RAA	RAA	
		D	299,0	190,8	148,4	113,5	111,2	107,4	103,9	101,9	102,6	148,8	251,8	347,6	
q	6,1	4,3	3,0	2,4	2,3	2,3	2,1	2,1	2,2	3,0	5,3	7,1			
E	16,3	10,4	8,1	6,2	6,1	5,9	5,7	5,6	5,6	8,1	13,7	18,9			
San Juan	Km 47,3	media	100,19	70,06	51,40	41,69	40,07	39,39	37,70	36,74	38,27	51,12	85,05	116,41	
		s	81,13	43,30	25,16	17,51	13,99	11,64	10,13	9,78	9,79	19,13	55,45	96,88	
		CV	81,0	61,8	49,0	42,0	34,9	29,5	26,9	26,6	25,6	37,4	65,2	83,2	
		max.	364,68	200,92	133,54	90,59	77,62	70,18	64,22	59,93	57,76	115,04	273,08	411,14	
		min	17,28	19,81	18,89	17,24	18,33	19,08	18,68	18,66	18,98	17,06	17,37	16,34	
		AED	RAA	RAA	RAA	RRA	RRA	ARR	ARR	ARR	ARR	RAR	RAA	RAA	
		D	268,3	169,5	137,7	108,1	107,3	102,1	101,0	98,4	99,2	136,9	220,5	311,8	
q	3,9	2,7	2,0	1,6	1,6	1,5	1,5	1,4	1,5	2,0	3,3	4,5			
E	10,5	6,6	5,4	4,2	4,2	4,0	3,9	3,8	3,9	5,3	8,6	12,1			

caudal estacional, en m ³ ·s ⁻¹				QA
QV	QO	QI	QP	m ³ ·s ⁻¹
13,03	8,06	6,93	12,65	10,16
410,76	254,17	218,55	398,88	320,28
0,51	0,32	0,27	0,50	0,40
16,1	10,0	8,6	15,6	12,6
28,94	10,08	8,71	32,67	20,08
18,17	3,47	2,77	18,55	10,01
62,8	34,4	31,8	56,8	49,8
83,85	20,63	22,52	86,88	49,64
6,66	4,69	4,59	5,29	5,41
RAA	RAA	RAA	RAA	RAA
225,0	79,3	69,2	259,7	633,3
7,8	2,7	2,3	8,8	5,4
60,7	21,4	18,7	70,0	170,7
59,07	23,38	20,67	77,00	45,02
43,36	9,19	5,63	55,15	26,78
73,4	39,3	27,2	71,6	59,5
205,34	48,22	37,31	264,28	136,47
15,82	9,14	9,83	11,41	11,64
RAA	RRA	ARR	RAA	RAA
459,3	183,8	164,3	612,1	1419,7
6,9	2,8	2,4	9,1	5,3
54,0	21,6	19,3	72,0	167,0
82,08	42,24	38,80	94,13	64,28
54,05	15,57	10,48	59,93	32,38
65,9	36,9	27,0	63,7	50,4
211,42	82,45	63,62	258,14	151,72
20,93	18,56	19,31	17,71	19,98
RAA	RRA	ARR	RAA	RAA
638,2	332,1	308,4	748,2	2027,2
4,5	2,3	2,1	5,1	3,5
34,8	18,1	16,8	40,8	110,5
74,00	40,38	37,56	84,19	59,01
49,30	14,18	9,60	54,36	29,81
66,6	35,1	25,6	64,6	50,5
211,02	79,44	58,88	253,33	149,92
19,99	18,42	19,27	16,92	19,83
RAA	RAA	ARR	RAA	RAA
575,4	317,5	298,6	669,2	1861,0
2,9	1,6	1,5	3,3	2,3
22,4	12,4	11,6	26,1	72,5

(I) promedio (**media**), desvío estándar (**s**), valor máximo (**m x.**), valor mínimo (**min.**), coeficiente de variación (**CV**) y Análisis Exploratorio de Datos (**AED**) con la siguiente nomenclatura: **A**=no se rechaza la hipótesis, **R**=se rechaza la hipótesis para un nivel de significancia $\alpha=5\%$, para las pruebas de normalidad, independencia y aleatoriedad, respectivamente. **D** derrame en Hm3, mensual, **q** caudal específico en l·s⁻¹·km⁻² y **E** lámina de escurrimiento en mm

Tabla 4. Clasificación de los derrames anuales

Table 4. Classification of annual spills

Rango	Los Patos A. Condarco	Los Patos La plateada	San Juan Km 101	San Juan Km 47,3
$D > 1.35\bar{D}^{(1)}$	23,3	23,3	20,0	21,7
$1.35\bar{D} \geq D > 1.15\bar{D}^{(2)}$	6,7	6,7	7,5	8,3
$1.15\bar{D} \geq D > 1.05\bar{D}^{(3)}$	5,0	3,3	10,0	3,3
$1.05\bar{D} \geq D > 0.95\bar{D}^{(4)}$	6,7	8,3	7,5	6,7
$0.95\bar{D} \geq D > 0.85\bar{D}^{(5)}$	15,0	5,0	10,0	11,7
$0.85\bar{D} \geq D > 0.65\bar{D}^{(6)}$	16,7	18,3	20,0	21,7
$D < 0.65\bar{D}^{(7)}$	26,7	35,0	25,0	26,7

(1) año extraordinario, derrame superior al 35% de la media.

(2) año rico, derrame entre un +15% y un +35% de la media.

(3) año medianamente rico, derrame comprendido entre un +5% y +15% de la media. (4) año medio o típico, derrame entre un +5% y -5% de la media.

(5) año medianamente pobre, derrame entre un -5% y -15% por debajo de la media.

(6) año pobre, derrame entre un -15% y -35% por debajo de la media.

(7) año muy seco, derrame -35% por debajo de la media histórica.

Tabla 5. Cambios graduales y abruptos para distintas variables

Table 5. Gradual and abrupt changes for different variables

Var.(1)	Tendencia , en $m^3 \cdot s^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ (2)				Cambios abruptos en el valor medio(3)			
	Álvarez Condarco	La Plateada	Km 101	Km 43.7	Álvarez Condarco	La Plateada	Km 101	Km 43.7
Q_A	ns	ns	ns	ns	(+) 1976	ns	ns	(+) 1976
Q_{\max}	ns	ns	ns	ns	(-) 1960	ns	(-) 1987	(+) 1971
Q_{\min}	0,03	0,11	ns	0,14	(+) 1977	(+) 1977	ns	(+) 1977
CCM	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	(+) 1976
Q_{30}	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	(+) 1976
Q_{90}	ns	ns	ns	ns	(+) 1971	ns	ns	(+) 1976
Q_{180}	ns	ns	ns	ns	(+) 1976	(+) 1976	ns	(+) 1976
Q_{270}	ns	0,14	ns	0,19	(+) 1976	(+) 1977	(+) 1981	(+) 1976
CCS	0,02	0,09	ns	0,12	(+) 1977	(+) 1977	ns	(+) 1977
Q_{ENE}	ns	ns	ns	ns	(+) 1971	(+) 1977	ns	(+) 1971
Q_{FEB}	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	(+) 1971
Q_{MAR}	ns	ns	ns	ns	(+) 1976	(+) 1971	ns	(+) 1976
Q_{ABR}	ns	ns	ns	ns	(+) 1976	(+) 1971	ns	(+) 1976
Q_{MAY}	ns	ns	ns	ns	(+) 1976	(+) 1976	ns	(+) 1976
Q_{JUN}	ns	ns	ns	0,19	(+) 1976	(+) 1977	ns	(+) 1976
Q_{JUL}	ns	ns	ns	0,18	(+) 1977	(+) 1977	(+) 1982	(+) 1977
Q_{AGO}	ns	0,14	ns	0,19	ns	(+) 1977	(+) 1981	(+) 1977
Q_{SET}	ns	0,14	ns	0,22	ns	(+) 1976	(+) 1981	(+) 1976
Q_{OCT}	ns	ns	ns	0,32	(+) 1976	(+) 1976	(+) 1981	(+) 1976
Q_{NOV}	ns	ns	ns	ns	ns	(+) 1976	ns	(+) 1976
Q_{DIC}	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Q_V	ns	ns	ns	ns	(+) 1971	ns	ns	(+) 1971
Q_O	ns	ns	ns	ns	(+) 1976	(+) 1976	ns	(+) 1976
Q_I	ns	0,13	ns	0,19	(+) 1977	(+) 1976	(+) 1981	(+) 1977
Q_P	ns	ns	ns	ns	(+) 1976	(+) 1977	ns	(+) 1976

(1) caudal anual Q_A , caudal diario máximo medio Q_{\max} , caudal diario mínimo medio Q_{\min} , caudales característicos (caudales diarios medios superados durante 10, 30, 90, 180, 270 y 355 días al año), CCM, Q_{30} , Q_{90} , Q_{180} , Q_{270} y CCS, respectivamente, caudales de cada mes Q_{MES} y caudales estacionales (verano Q_V , otoño Q_O , invierno Q_I y primavera Q_P)

(2) ns no se detecta tendencia estadísticamente significativa, + tendencia creciente, - tendencia decreciente para un nivel de significancia $\alpha=5\%$.

(3) ns no se detecta cambio estadísticamente significativo, + valor medio mayor para el periodo que se extiende desde el año indicado hasta el final de la serie, - valor medio inferior para un nivel de significancia $\alpha=5\%$

Tabla 6. Geometría hidráulica

Table 6. Hydraulic geometry

Río	Estación	Ancho medio $W = a Q^b$		Profundidad media $D = c Q^f$		Velocidad media $V = k Q^m$	
		a	b	c	f	k	m
Los Patos	AlvarezCondarco	16.225	0.099	0.175	0.470	0.352	0.431
	La Plateada	29.572	0.101	0.131	0.478	0.259	0.421
San Juan	Km 473	31.101	0.078	0.087	0.525	0.382	0.397

Tabla 7. Producción de sedimentos en miles de toneladas en suspensión, fondo y total

Table 7. Sediment production in thousand tons in suspension, at bottom and total

var(1)	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	AÑO
Estación: AlvarezCondarco													
Q_{SS}	0.2	0.2	0.4	26.6	86.9	173.6	112.7	28.6	8.9	0.9	0.4	0.2	439.8
DE_{SS}	0.05	0.06	0.12	7.18	23.43	46.80	30.39	7.71	2.39	0.25	0.12	0.06	118.55
Q_{SF}	91.5	104.4	140.0	314.2	622.8	985.6	880.1	491.5	323.4	189.2	143.2	104.7	4390.6
Q_{SS+SF}	91.6	104.6	140.5	340.8	709.8	1159.2	992.9	520.1	332.3	190.1	143.6	105.0	4830.4
DE	24.70	28.19	37.86	91.86	191.31	312.46	267.62	140.19	89.56	51.25	38.71	28.29	1302.00
Estación: La Plateada													
Q_{SS}	6.6	6.8	7.5	136.2	348.9	505.0	284.4	114.9	67.2	8.3	7.7	6.8	1500.3
DE_{SS}	0.77	0.80	0.88	16.03	41.05	59.41	33.46	13.52	7.91	0.97	0.90	0.80	176.50
Q_{SF}	312.6	336.7	434.8	1009.8	2020.3	3015.6	2358.4	1284.0	896.5	552.8	447.4	348.8	13017.5
Q_{SS+SF}	319.1	343.5	442.3	1146.0	2369.2	3520.6	2642.8	1398.9	963.7	561.0	455.1	355.6	14517.8
DE	37.55	40.41	52.03	134.83	278.73	414.18	310.92	164.57	113.37	66.00	53.54	41.84	1707.97
Río: San Juan. Estación: Km 101													
Q_{SS}	17.8	17.6	16.2	225.3	794.4	1858.6	1454.0	360.3	115.4	18.0	17.6	16.6	4911.8
DE_{SS}	0.97	0.96	0.88	12.28	43.30	101.30	79.25	19.64	6.29	0.98	0.96	0.91	267.70
Q_{SF}													
Q_{SS+SF}													
DE													
Río: San Juan. Estación: Km 47.3													
Q_{SS}	22.8	21.2	22.5	206.2	696.3	1630.2	1180.4	325.0	133.4	42.4	33.2	26.3	4339.8
DE_{SS}	0.89	0.82	0.88	8.03	27.12	63.50	45.98	12.66	5.20	1.65	1.29	1.03	169.06
Q_{SF}	429.4	412.9	423.3	685.7	1332.5	2047.3	1725.9	996.7	717.5	511.7	493.1	451.2	10227.1
Q_{SS+SF}	452.2	434.1	445.8	891.9	2028.8	3677.4	2906.3	1321.7	850.9	554.1	526.4	477.5	14566.9
DE	17.62	16.91	17.37	34.74	79.03	143.26	113.22	51.49	33.15	21.59	20.50	18.60	567.47

(1) Q_{SS} caudal sólido en suspensión en miles de toneladas para el periodo indicado; DE_{SS} degradación específica en ton·km² calculada en base al caudal en suspensión; Q_{SF} caudal sólido de fondo en miles de toneladas para el periodo indicado; Q_{SS+SF} caudal sólido total en miles de toneladas para el periodo indicado, DE degradación específica total en ton·km²

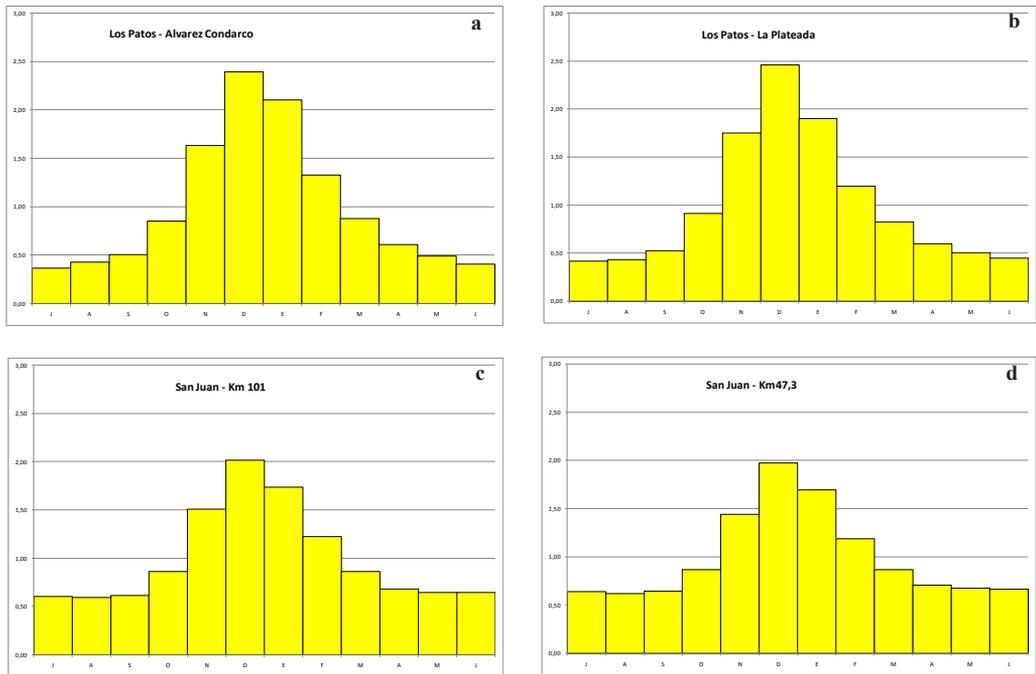


Figura 3. Marcha anual adimensional de los caudales mensuales en el año hidrológico, para las distintas secciones de aforo. a) Río Los Patos, estación Alvarez Condarco. b) Río Los Patos, estación La Plateada. c) Río San Juan, estación Km 101. d) Río San Juan, estación Km 47,3.A)

Figure 3. Dimensionless annual run of monthly flows over the hydrologic year for different gauging sections. a) Los Patos river, Alvarez Condarco station, b) Los Patos river, La Plateada station, c) San Juan river, Km 101 station, d) San Juan river, Km 47.3 station

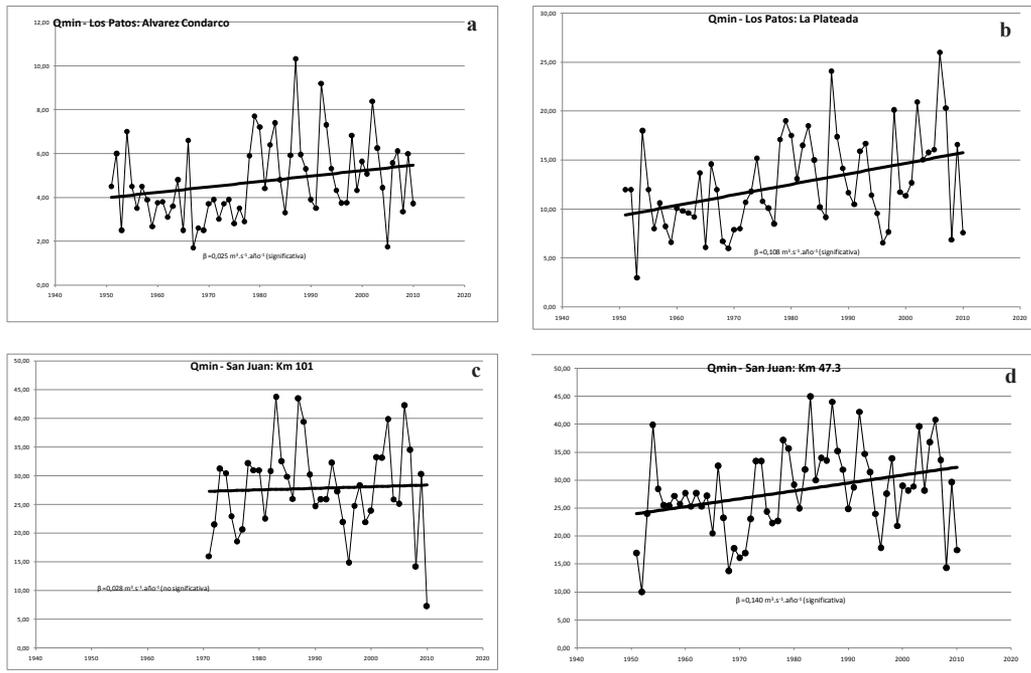


Figura 4. Fluviograma y recta de tendencia no paramétrica para el caudal diario mínimo medio Q_{min} . a) Río Los Patos, estación AlvarezCondarco. b) Río Los Patos, estación La Plateada. c) Río San Juan, estación Km 101. d) Río San Juan, estación Km 47,3

Figure 4. River flow diagram and non parametric trend line for mean minimum daily flow Q_{min} . a) Los Patos river, Km 101 station, d) San Juan river, Km 47.3 station

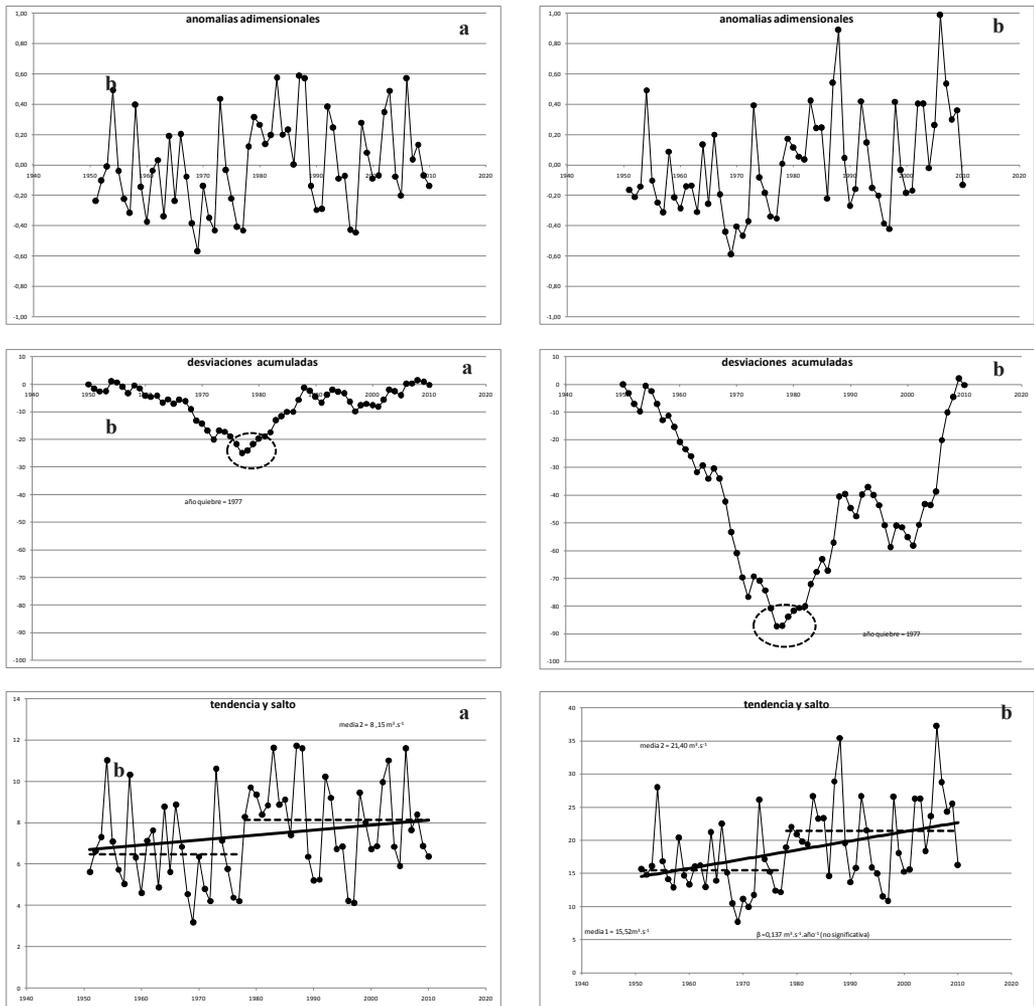


Figura 5. Diagrama de anomalías, desviaciones acumuladas con respecto al valor medio y fluviógrama y recta de tendencia no paramétrica y cambios abruptos en el valor medio para el caudal mensual de julio_{QJUL}. a) Río Los Patos, estación Alvarez Condarco. b) Río Los Patos, estación La Plateada

Figure 5. Diagram of anomalies, accumulated deviations with respect to mean value, and river flow diagram and non-parametric trend line and abrupt changes in mean monthly flow value for July_{QJUL}. a) Los Patos river, Alvarez Condarco station, b) Los Patos river, La Plateada station

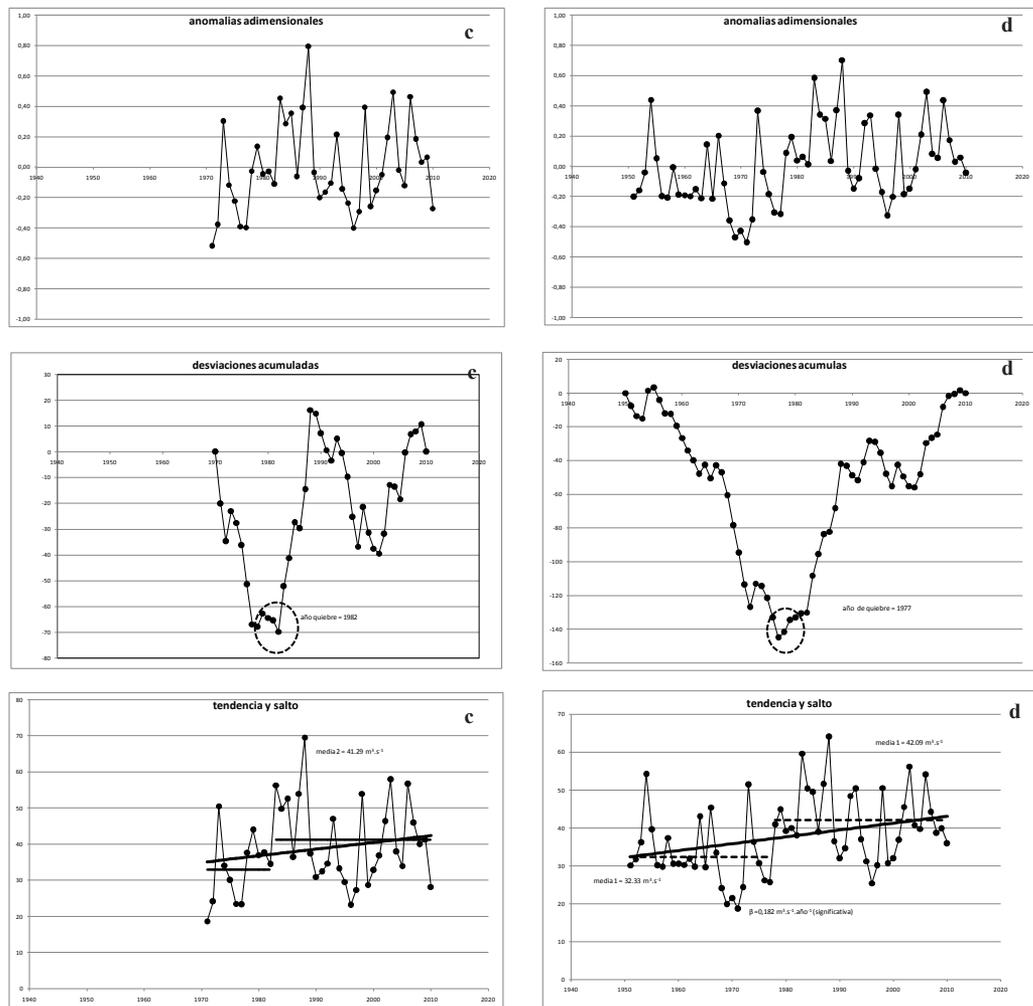


Figura 6. Diagrama de anomalías, desviaciones acumuladas con respecto al valor medio, fluvíograma y recta de tendencia no paramétrica y cambios abruptos en el valor medio para el caudal mensual de julio Q_{JUL} . c) Río San Juan, estación Km 101. d) Río San Juan, estación Km 47,3

Figure 6. Diagram of anomalies, accumulated deviations with respect to mean value, and river flow diagram and non-parametric trend line and abrupt changes in mean monthly flow value for July Q_{JUL} . c) San Juan river, Km 101 station, d) San Juan river, Km 47.3 station