

## XXV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA SANTIAGO, CHILE, AGOSTO 2014

### Extensión del Estudio de Sequías Hidrológicas a Región NOA y Cuyo De La República Argentina

Díaz, E<sup>1</sup>.; Heredia, A<sup>2</sup>.; García, M<sup>2</sup>.; Rodríguez, A<sup>1</sup>.; Dölling, O<sup>3</sup>.; Moya, G<sup>1</sup>.; Bertoni, J.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratorio de Hidráulica, FCEFyN, UNC.

<sup>2</sup>CETA, FCEFyN, UNC

<sup>3</sup>Depto. de Ing. Civil, UNSJ

Av Filloy S/N, Argentina 0351-4334446, erica.b.diaz@gmail.com

**RESUMEN:** Las sequías son fenómenos complejos que afectan el desarrollo y aprovechamiento de los recursos hídricos en una misma región. En virtud de ello en este trabajo se abordó la identificación y caracterización de sequías desde el punto de vista hidrológico, con el fin de obtener el máximo aprovechamiento de las informaciones referidas a caudales anuales. Este estudio comprende un área de 13 cuencas hidrográficas argentinas (Río Colorado, Río Mendoza, Río San Juan, Río Ctlamochita, Río Anisacate, Río Xanaes, Río Suquía, Río Dulce, Río Juramento, Río Salado, Río Paraná, Río Bermejo y Río Pilcomayo). El objetivo del presente trabajo ha sido identificar y caracterizar temporal y espacialmente sequías hidrológicas para evaluar la disponibilidad hídrica regional, que es una componente esencial en la planificación del agua. El período de análisis seleccionado está comprendido entre los años 1906 y 2013. La metodología empleada responde a la definición de Yevjevich (1967), según la cual, dada una serie cronológica que representa la oferta de agua y otra la demanda, una sucesión de períodos en que la oferta no satisface la demanda puede considerarse como una sequía. Las sequías detectadas en cada zona han sido caracterizadas en cuanto a sus propiedades de duración, magnitud, intensidad media y máxima. Se observó un marcado agrupamiento espacial y temporal de los periodos de excesos y déficit hídricos en la región de estudio.

**ABSTRACT:** The droughts are complex phenomena that affect the development and use of the hydrological resources in one region. Under it in this paper the identification and characterization of droughts was study from the point of view hydrological in order to obtain the greatest use of the records of annual contributions. This study includes an area of 13 hydrographic river basins (Río Colorado, Río Mendoza, Río San Juan, Río Ctlamochita, Río Anisacate, Río Xanaes, Río Suquía, Río Dulce, Río Juramento, Río Salado, Río Paraná, Río Bermejo y Río Pilcomayo). The aim of this study is to identify and characterize temporally and spatially hydrological droughts to assess the regional water availability; an essential component of water management. The data analyzed belongs to the time period 1906-2013. The methodology chosen is based on the definition proposed by Yevjevich (1967), according to which, given a time series representing water supply and another representing demand, a succession of periods where supply does not meet demand can be considered a drought. Droughts detected in each basin are characterized in terms of their properties of duration, magnitude and average and maximum intensity. A spatial and temporal clustering of the periods of excess and water deficit has been observed in the region.

**PALABRAS CLAVES:** Sequias - Aportes Anuales – Planificación – Recursos Hídricos

## INTRODUCCIÓN

Las sequías son fenómenos de relativa complejidad que afectan de manera importante el desarrollo y aprovechamiento de los recursos hídricos en una región (Fernández, 1997). Existen varios motivos por los cuales el conocimiento que existe sobre estos fenómenos es aún limitado. Uno de ellos es la escasez de suficientes datos hidrológicos y meteorológicos. En virtud de ello en este trabajo se aborda la identificación y caracterización de sequías desde el punto de vista hidrológico, con el fin de obtener el máximo aprovechamiento de las informaciones referidas a aportes anuales, que generalmente poseen una mayor ventana de tiempo y espacio. Este estudio amplia y actualiza la identificación y caracterización de sequías en el Centro y Norte de Argentina (Díaz, 2013), agregando al estudio anterior la región de Cuyo y Noroeste (NOA) de Argentina. Así, el estudio comprende un área de 13 cuencas hidrográficas argentinas. Las cuencas seleccionadas fueron: Río Colorado, Río Mendoza, Río San Juan, Río Ctlamochita, Río Anisacate, Río Xanaes, Río Suquía, Río Dulce, Río Juramento, Río Salado, Río Paraná, Río Bermejo y Río Pilcomayo. Para evaluar el impacto de los fenómenos de clima global en los escurrimientos de las cuencas se realizó un análisis de correlación cruzada a nivel mensual con los índices ONI (Ocean Niño Index) y AMM (Atlantic Meridional Mode). Con esto se pretende evaluar en que regiones se espera un mayor o menor impacto de los fenómenos climáticos globales como los son los fenómenos niño y niña en cada una de las cuencas.

## METODOLOGÍA Y RESULTADOS

Se consideran sequías hidrológicas aquellas referidas a déficits de caudales o volúmenes de aporte. Las series de aportes analizadas corresponden a cuencas de la región centro, norte, Noa y Cuyo de la República Argentina que se indican en la Figura 1. Los ríos presentan características diferentes en cuanto a localización de la cuenca, módulo, área de aporte, y volumen de aporte anual. Estas se resumen en la Tabla 1.

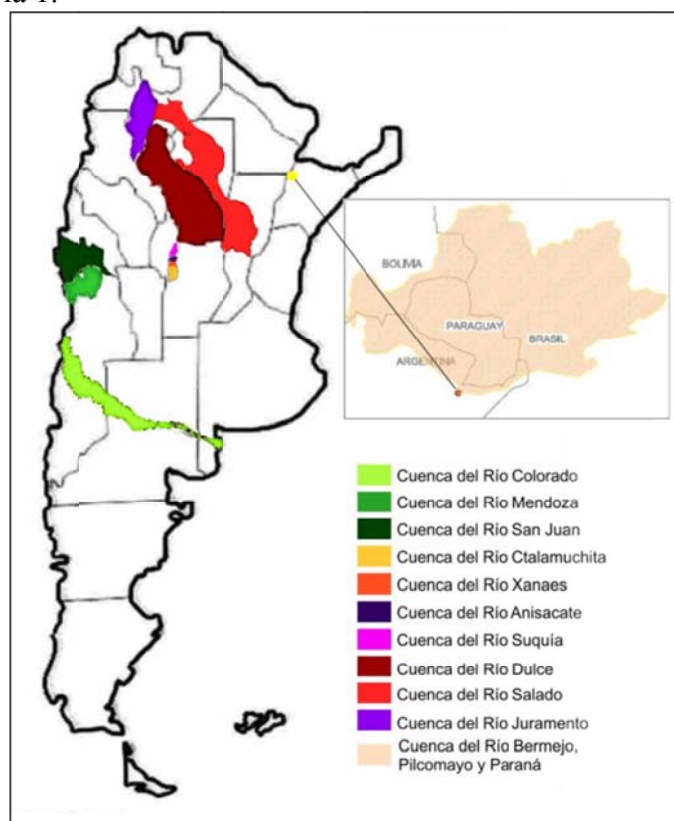
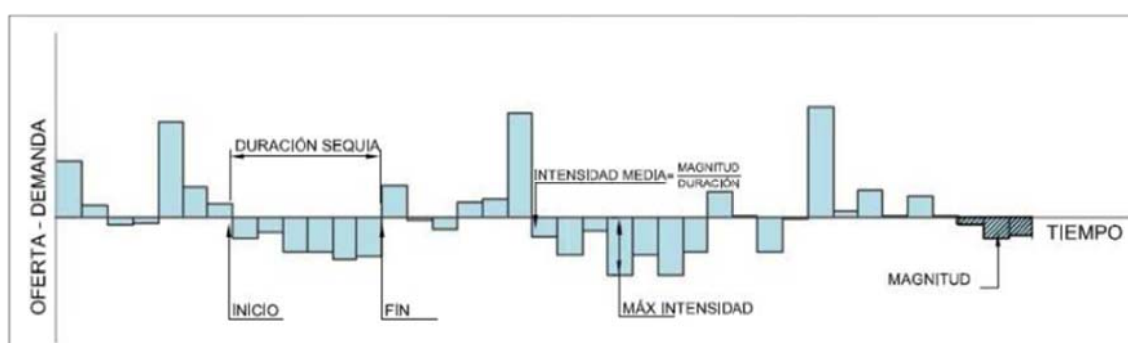


Figura 1.- Ubicación de las cuencas analizadas en el trabajo

**Tabla 1.-** Resumen de características hidrológicas y geográficas de las cuencas analizadas.

Cuenca del Río	Estación			Altitud [msnm]	Área de Aporte [Km <sup>2</sup> ]	Módulo [m <sup>3</sup> /s]	Periodo
	Denominación	Latitud	Longitud				
Colorado	Buta Banquil	37°04'34,4"	69°44'48,1"	850	15300	150	1940-2013
Mendoza	Guido	32°54'55,0"	69°14'16"	1408	8180	46,2	1956-2013
San Juan	San Juan - Km 47,3	31°30'59,7"	68°56'24,6"	934	25660	65,2	1909-2013
Ctalamochita	Embalse	32°10'00,0"	64°23'00"	650	3300	27,1	1913-1984
Xanaes	Los Molinos	31°05'00,0"	64°30'00"	770	980	9,5	1936-2009
Anisacate	Santa Ana	31°40'00,0"	64°34'00"	900	465	4,83	1925-1980
Suquía	San Roque	31°22'00,0"	64°27'00"	650	1350	10	1950-2011
Dulce	Ruta Provincial 81	30°51'17,4"	60°16'55,9"	265	19700	82,2	1950-2009
Salado	Ruta Provincial 70	31°29'28,4"	60°46'50,0"	17	29700	137	1954-2012
Juramento	Cabra Corral	25°16'19,0"	65°19'47,0"	945	32885	29,5	1934-2013
Bermejo	Pozo Sarmiento	23°13'00,0"	64°12'00"	296	25000	446	1952-2013
Pilcomayo	La Paz	22°22'41,0"	62°31'21"	230	96000	237	1941-2013
Paraná	Corrientes	27°28'30"	58°49'60"	52	1950000	17189	1905-2013

En el presente trabajo la caracterización de sequías hidrológicas se realiza en términos de déficit de aportes anuales, siguiendo una metodología de análisis de series de tiempo denominado análisis de sucesiones. El uso del análisis de sucesiones ha sido propuesto como un método objetivo para identificar los períodos de sequía y para la evaluación de las propiedades estadísticas de la misma. Esta metodología ha sido usada para el análisis y caracterización estocástica de las sequías desde que Yevjevich (1967) propusiera la definición de eventos de sequía, Según esta "un evento de sequía es definido como el período durante el cual la variable indicadora de la disponibilidad de agua  $X_t$  (aportaciones, lluvia, humedad del suelo, etc.) se encuentra por debajo de un determinado umbral  $X_o$ ". Dicho umbral puede ser un valor fijo en el caso de series de tiempo anuales o un valor periódico para el caso de series de tiempo periódicas (Salas y otros, 1980).



**Figura 2 .-** Serie cronológica de oferta menos demanda en un lugar para la identificación y caracterización de sequías según el método de sucesiones. Fuente: Fernández (1997) Modificada.

Este valor umbral o nivel de truncamiento puede ser la media o mediana de la serie de datos hidrológicos utilizados; una fracción de la media (Clausen y Pearson, 1995); un nivel definido (como la desviación estándar menos la media) o un valor equivalente a una probabilidad de excedencia dada (Fernández, 1997). En cualquier caso, el umbral debe ser elegido de tal manera que sea representativo de la demanda de agua (Tsakiris y otros, 2007). Este análisis permite obtener parámetros útiles en la cuantificación de las sequías como son: la duración ( $L$ ); severidad o magnitud ( $M$ ) (suma acumulada de las diferencias entre el umbral y los valores de la variable), ubicación en tiempo absoluto (inicio y fin), la intensidad máxima ( $I_{max}$  definida como la máxima de las diferencias entre el umbral y las realizaciones que componen el evento) y la intensidad media ( $I_{media}$ , la relación entre la magnitud y la duración). Estos parámetros se observan en la Figura 2.

A continuación se exponen los resultados obtenidos en la identificación y caracterización de las sequías para cada una de las cuencas. Ver las siguientes figuras.

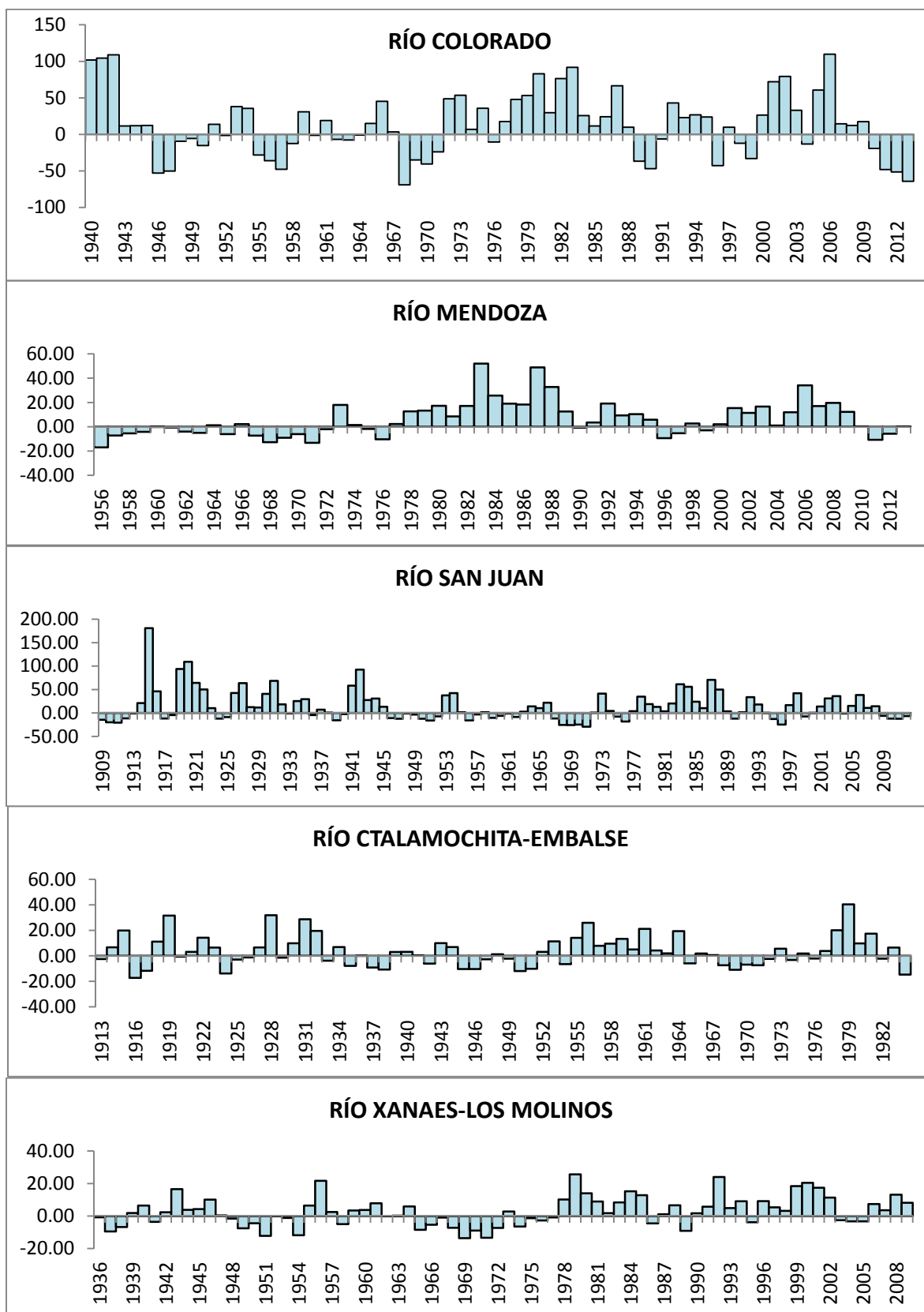


Figura 3.- Series cronológicas de oferta menos demanda. Demanda con probabilidad  $(X_{jt} > X_{jt}) = 0,6$ .

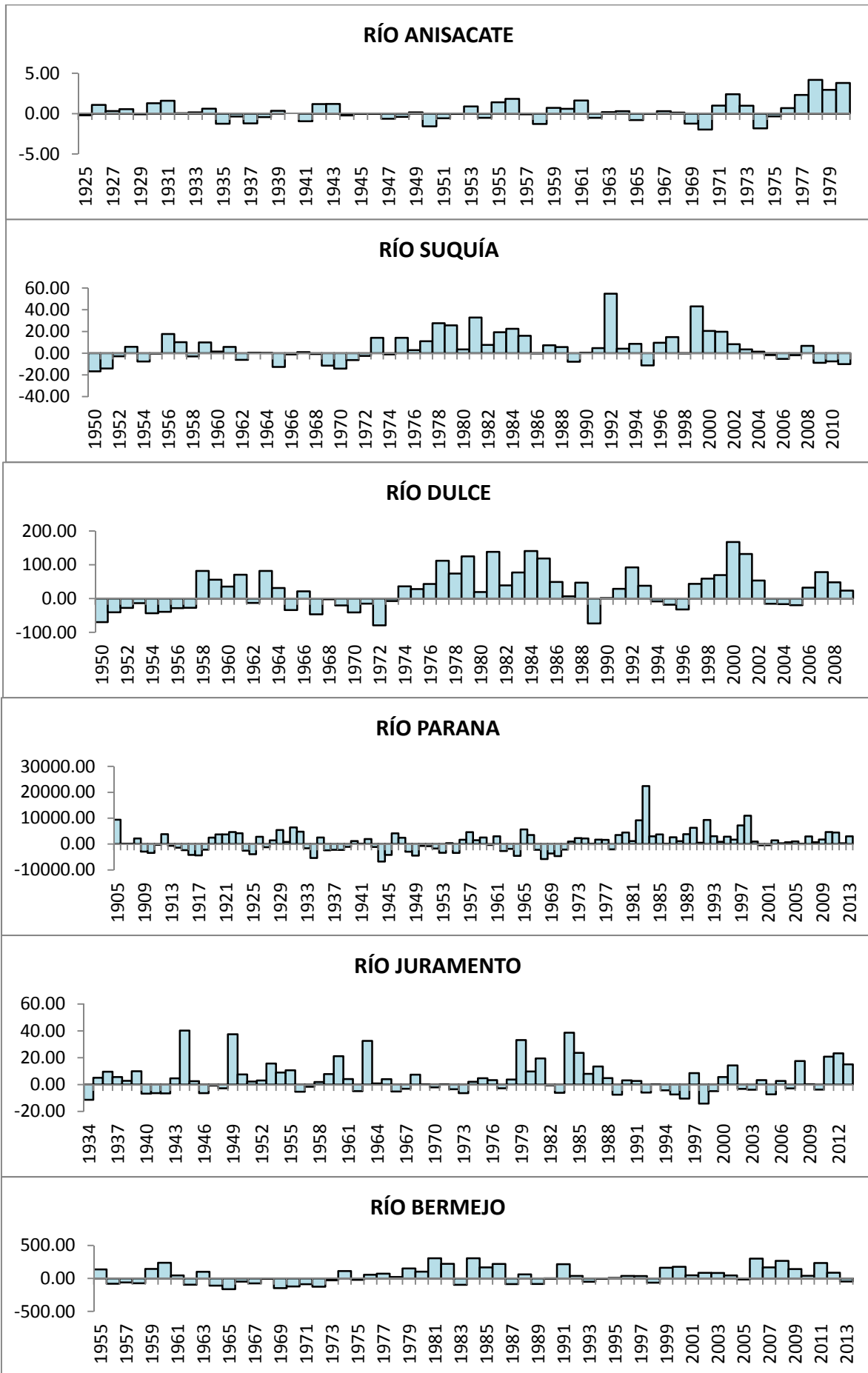
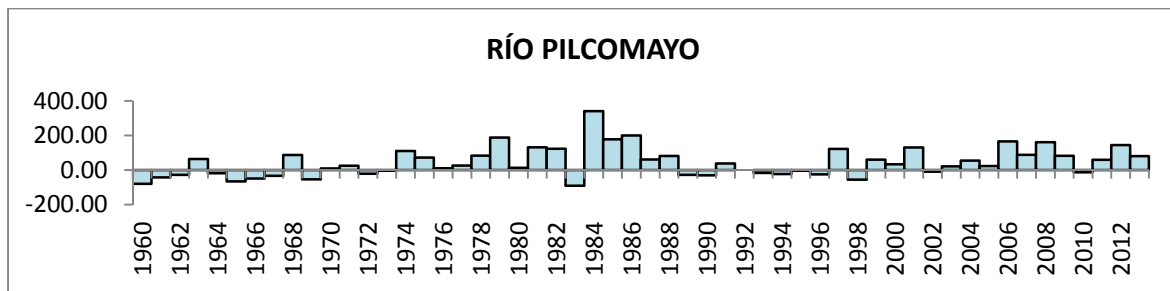


Figura 4.- Series cronológicas de oferta menos demanda. Demanda con probabilidad  $(X_{jt} > X_{jt}) = 0,6$ .



**Figura 5.-** Series cronológicas de oferta menos demanda. Demanda con probabilidad  $(X_{jt} > X_{jt}) = 0,6$ .

En la Figura 3, se puede ver que las épocas de sequías para el Río Colorado tienen una duración máxima de 5 años, ocurridas en los periodos 1946-1950, 1955-1958, 1968-1971, 1988-1991, 2010-2013. En la mayoría de los casos este defecto supera el valor del aporte medio. Para el Río Mendoza los periodos de sequía son de una duración superior a dos años se dan entre 1956-1963, 1967-1972, correspondiendo la mayor duración al primer periodo: 8 años. En cuanto intensidad los defectos son de menor valor que los excesos. Comparando con el río Colorado ambas tienen un comportamiento parecido, con sequías importantes a partir de mediados de la década del '50, que alcanzan un mayor valor alrededor de 1970. El caso del Río San Juan los periodos de defecto de duración mayor a dos años son: 1909-1913, 1936-1940, 1946-1952, 1959-1962, 1967-1971, 1994-1996, 2009-2012. Al igual que en la cuenca anterior, en la figura 3 se ve un comportamiento similar al caso del río Colorado, en donde se dan importantes sequías alrededor de 1955 y finales de la década del '60.

En el Río Ctlamochita las sequías no tienen una duración superior a 5 años. Las de mayor duración se dan en la década del '30, entre 1945 y 1951, y fines del 1968 hasta 1972, ésta última se da también en las cuencas anteriores. En el Río Xanaes se distingue una época de defecto de prolongada duración, superior a 5 años, comprendida en los años 1965 y 1972. También se dan otros periodos más cortos: 1936-1938, 1948-1951, 1974-1977, 2003-2005. La de mayor intensidad y magnitud es la de fines de la década del '60. En el Río Anisacate la sequía de mayor duración es de cinco años, que se puede ver en la figura 4. Se dio entre 1944 y 1948. En el año 1935 también se supera la demanda, hasta el año 1938. En el Suquía las épocas de defecto de caudales se da entre 1950 y 1952, 1968-1972, 2005-2007, 2009-2011. En 1989 y 1995 se registran sequías de importante intensidad, que superan el módulo de la cuenca. A partir del año 1972 las sequías son de menor magnitud. En el Río Dulce los periodos de sequía son de duración prolongada, alcanzando los 8 años. Se dan en los siguientes años: 1950-1957, 1967-1973, 1994-1996 y 2003-2005; El máximo defecto es aproximadamente 4 veces menos el módulo del río, y es 6 veces menor que el valor de la media de los aportes. Se da en el año 1972.

Para el Paraná hasta el año 1978 se dan los defectos de aportes de mayor valor, que superan a la media. La máxima duración de estos periodos es de 6 años, de 1913 a 1919 y 1948 a 1953; Fines de la década del '60 se da un periodo de sequía en común con los ríos mencionados anteriormente. En el Río Salado los periodos de sequía hasta el año 1973 son prolongados, se dan entre 1956 y 1958, 1967 a 1972. A partir de 1973 hasta 2003 sólo en tres años (1976, 1980 y 1996) hay un defecto en los aportes, cuyos valores son mucho menores que los excesos registrados. Para el Río Juramento los años en donde hay defecto de caudales son: 1934, 1940-1942, 1946-1948, 1956-1960, 1966-1968, 1969-1974, 1983-1984, 1990, 1992-1996, 1999-2000, 2003-2003, 2005, 2007. La máxima duración de la época de sequía es de 5 años, según la figura 5. En el Río Bermejo desde 1964 a 1973 se dan periodos de sequías, en donde el defecto supera ampliamente la media, similar a lo que sucede en los ríos Juramento, Salado y Bermejo; En los años posteriores la duración de estos periodos es mucho menor, no superando los dos años. En el Río Pilcomayo los periodos de defecto: 1960-1962, 1966-1967, 1972-1973, 1983, 1989-1990, 1992-1996, 1998, 2002 y 2010; La máxima duración alcanzada es de 4 años. Similar al comportamiento de los ríos Juramento, Bermejo, Salado y Dulce, se producen sequías importantes entre la década del 60 y 62.

## **Análisis espacial y temporal de las sequías hidrológicas**

El análisis espacial y temporal de las sequías se apoya en un ordenamiento matricial con filas correspondientes a la ubicación geográfica (de sur a norte) de las cuencas, y columnas ordenadas cronológicamente; y se identifica con una escala de colores correspondiente a los distintos umbrales de sequía. Los valores de cada unidad de la matriz se obtienen calculando en cada año la serie cronológica de la oferta disponible, la probabilidad de excedencia del aporte medio anual registrado.

$$\text{Probabilidad } (X_{jt} > x_{jt}) = \alpha \quad [1]$$

Siendo:

$X_{jt}$ : las series de aportes disponibles.

$x_{jt}$ : valor numérico del aporte anual observado en el año t en la cuenca j.

$\alpha$ : umbrales de probabilidad.

La matriz se armó con los siguientes umbrales:

$0,00 < \alpha < 0,20$	muy húmedo;
$0,20 < \alpha < 0,40$	húmedo;
$0,40 < \alpha < 0,60$	normal;
$0,60 < \alpha < 0,80$	seco;
$0,80 < \alpha < 1,00$	muy seco;

Observando la matriz de caracterización obtenida (Ver Figura 7), y los gráficos de las series cronológicas se pueden identificar ciertas regiones que tienen comportamientos similares. Éstas son:

- Ríos Colorado, Mendoza y San Juan: presentan un período prolongado de sequía, entre el año 1955 hasta 1963; Entre 1978 y 1988 un período muy húmedo, y a partir de 2010 uno seco.
- Ctlamochita, Xanaes, Anisacate y Suquía: las sequías de esta región se dan entre 1909 y 1938, 1947 y 1956 que coincide con la región del sur.
- Juramento, Bermejo y Pilcomayo: las sequías ocurren entre 1940 y 1942, 1956-1958, 1962 (año de sequía en casi todas las regiones), 1964-1967, 1969-1973, 1983 (es la única región con sequía), 1993-1996.
- Paraná, Salado y Dulce: las sequías se dan entre 1950-1956, 1967-1972.

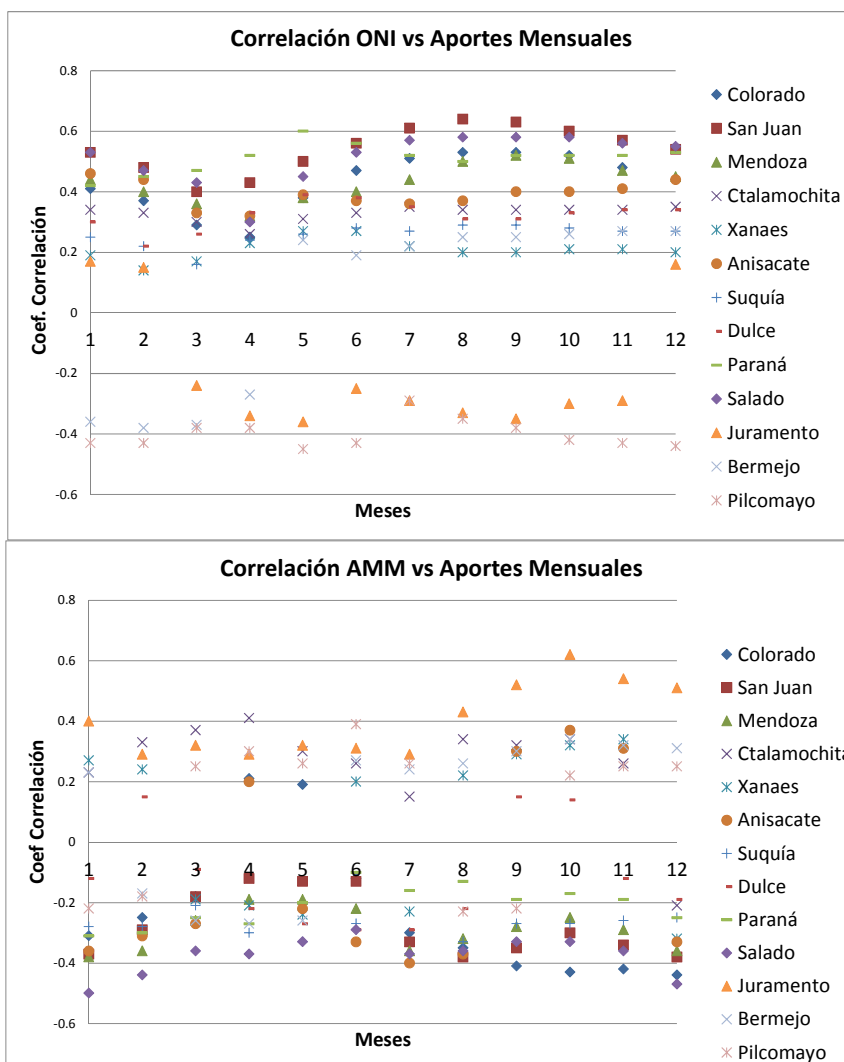
### **Análisis con indicadores Macro climáticos**

Para evaluar la influencia del impacto de los fenómenos de clima global en los escurrimientos de las cuencas se realizó un análisis de correlación cruzada entre los caudales medios mensuales de cada cuenca y los índices ONI (Oceanic Niño Index) y AMM. (Atlantic Meridional Mode). Para ello se calcularon los coeficientes de correlación cruzada entre el caudal medio mensual y el valor del correspondiente índice con distintos tiempos de retardo (0 a 12 meses). Se buscó la mayor correlación con los distintos desfases para cada mes (Ver Figura 6). Luego se contabilizaron cuantos sucesos Niña o Niño se correspondían con un aporte seco o muy seco calculado a nivel mensual.

Los índices son el resultado de fórmulas matemáticas y estadísticas, que combinan los parámetros climáticos (como temperatura y precipitaciones) con datos como la altitud o la latitud, y manifiestan la relación entre ellos. Pueden ser función de una o más variables y no están asociados con el valor de una demanda. Estas variables pueden ser del tipo hidroclimáticas (precipitación, temperatura, caudales, humedad del suelo, etc.) o sobre la base de la teledetección.

Para el presente trabajo se utilizaron los índices ONI y AMM. El primero es calculado como la media móvil de tres puntos de la serie mensual de anomalías de la temperatura de la superficie

del mar en la Región Niño 3-4 (Compagnucci y otros, 2008). Valores positivos del ONI, mayores o iguales a 0,5 por 5 meses consecutivos o más indican la ocurrencia de un evento El NIÑO. Valores negativos del ONI, inferiores o iguales a -0,5 por 5 meses consecutivos o más indican la ocurrencia de un evento La NIÑA. El AMM se calcula como variaciones en la temperatura superficial del mar (SST) y la presión a nivel del mar (SLP) entre el Atlántico Norte Tropical y el sur de la zona de convergencia intertropical (ITCZ) (Grossmann y Klotzbach, 2009). AMM positivo representa un gradiente fuerte de SST norte a sur en el Atlántico Norte, y un gradiente SLP anormalmente débil. En escalas a corto plazo, condiciones positivas de AMM pueden estar asociadas con eventos El Niño y/o eventos NAO negativos.



**Figura 6.-** Máximos valores de correlación cruzada identificados para los aportes mensuales de las distintas cuencas y los índices AMM y ONI.

Como se observa en la Figura 6, no se encontraron correlaciones significativamente altas. Las únicas cuencas que poseen coeficientes de correlación superior a 0,5 son las cuencas de los Ríos San Juan, Paraná y Salado con el índice ONI. Para estas cuencas no se detectó una relación significativa entre los eventos secos y los fenómenos Niño-Niña. Las cuencas del centro (Ctalamochita, Xanaes, Anisacate, Suquía y Dulce) los coeficientes de correlación con ambos índices son menores a 0,4. Las cuencas de los Ríos Colorado y Mendoza presentan mayores correlaciones con el índice ONI que con el AMM. Y en las cuencas del Norte se observa que el Río Pilcomayo presenta mejor correlación con el ONI y el Juramento con el AMM. Debido a esta baja correlación no es posible establecer relaciones certeras entre los eventos de sequías y los fenómenos del Niño y Niña.



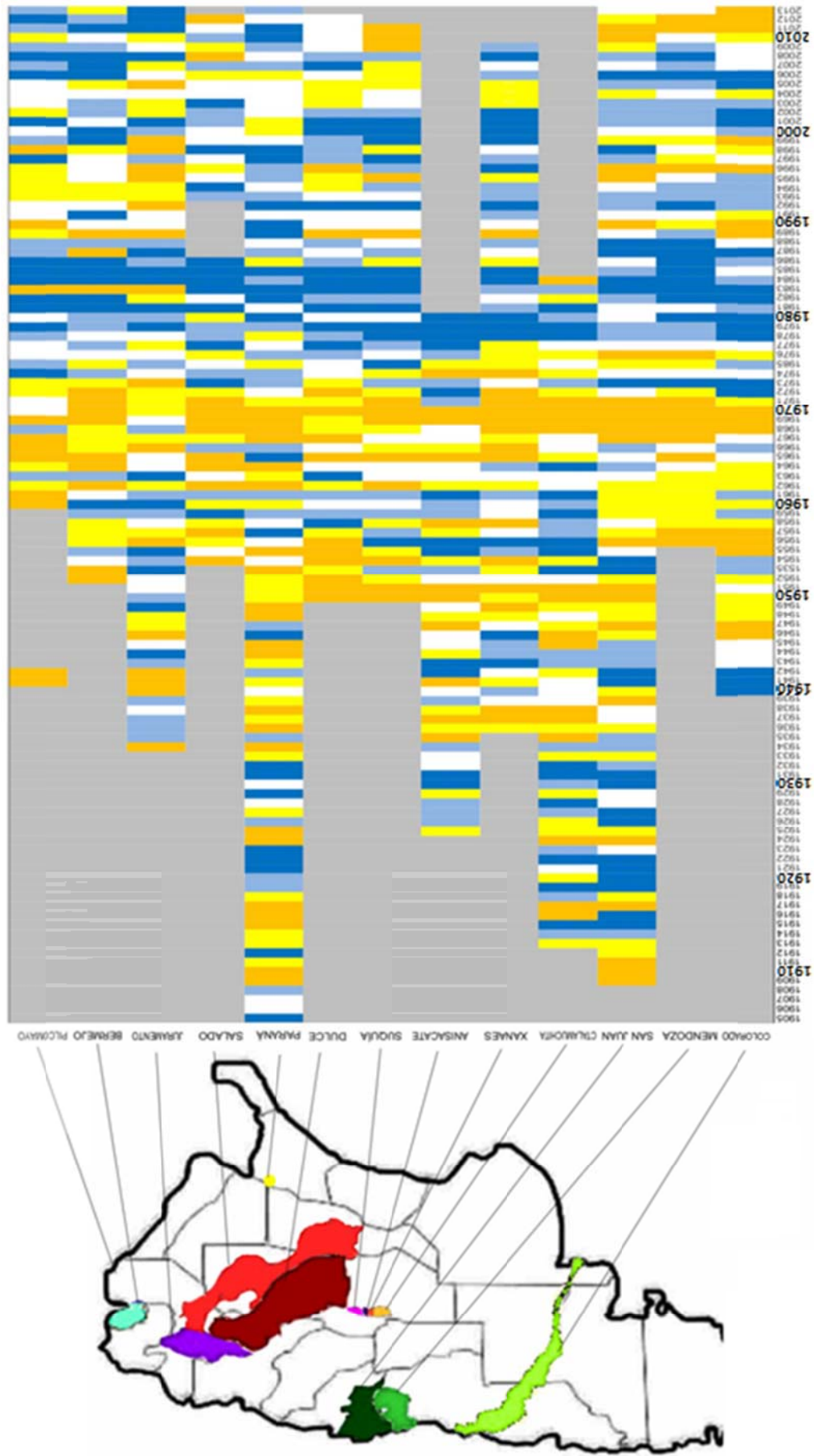


Figura 7.- Matriz de Caracterización de Sequías Hidrológicas en el Centro y Norte de la República Argentina

## CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en la identificación y caracterización de sequías hidrológicas, indicaron que en la región de estudio (13 cuencas de la región Centro y Norte de la Argentina) existe un agrupamiento temporal y espacial muy marcado de los periodos de excesos y déficits. Se observó la ocurrencia de periodos prolongados de déficit hídricos, que se verificaron de manera simultánea en áreas de gran extensión espacial. Se detectó que las sequías más persistentes que experimentaron las 13 cuencas analizadas se registraron en las décadas del 40' y 60' (para una demanda del 60% de probabilidad de excedencia). Mientras que los periodos húmedos comunes se observaron a mediados de la década del 70'. Se evidenció un quiebre en este periodo entre una época seca y húmeda. Lo cual coincide con estudios anteriores que analizan cuencas del centro y norte de Argentina (Díaz y otros 2013).

A nivel espacial se identificaron 4 subregiones. Una compuesta por las cuencas de los Ríos Colorado, Mendoza y San Juan que presentan un período prolongado de sequía (entre el año 1955-1963; 1978- 1988) un período muy húmedo, y a partir de 2010 uno seco). La segunda compuesta por las cuencas de los ríos Ctlamochita, Xanaes, Anisacate y Suquía. Las sequías de esta región se dieron entre 1909 y 1938, 1947 y 1956 (esta última coincidente con la región del sur). Una tercera compuesta por los ríos Juramento, Bermejo y Pilcomayo. Las sequías de esa subregión ocurrieron entre 1940 y 1942, 1956-1958, 1962 (año de sequía en casi todas las regiones), 1964-1967, 1969-1973, 1983 (es la única región con sequía), 1993-1996. La última conformada por las cuencas de los ríos Paraná, Salado y Dulce con las sequías entre 1950-1956, 1967-1972. En este aspecto se resalta la dimensión territorial que puede tomar una sequía hidrológica como las detectadas. Esta información es de relevancia para la gestión de los recursos hídricos ya que usos tales como el abastecimiento humano, el riego y la producción energética, entre otros, pueden ser seriamente afectados por la ocurrencia de manera simultánea de sequías severas en cuencas que aportan a una región y zonas vecinas. Por su parte, cabe indicar que el análisis de correlación realizado entre los indicadores ONI- AMM y los periodos de sequías no muestra una relación significativa (Heredia Ligorria, 2014). Por tal se seguirá estudiando la forma de plantear el modelo conceptual que permita encontrar una relación entre los indicadores macroclimáticos y las sequías. La metodología empleada en la identificación y caracterización de sequías permitió realizar el análisis sobre una región relativamente extensa de Argentina, empleando registros hidrológicos en una ventana de tiempo de casi 100 años. Un próximo paso será correlacionar los distintos parámetros que caracterizaron a las sequías en el tiempo con los daños socioeconómicos que sucedieron en esas épocas a los fines de diseñar medidas preventivas para mitigar los efectos de estos importantes fenómenos hidrológicos.

## BIBLIOGRAFIA

- Clausen, B. y Pearson, C. P.** (1995). "Regional frequency analysis of annual maximum streamflow drought" *Journal of Hydrology* N° 173 (111-130).
- Compagnucci, R. H. y Agosta, E. A.** (2008). "*La Precipitación de Verano en el Centro-Oeste De Argentina y los fenómenos interanual El Niño/Oscilación Sur (Enos) e Interdecádico "Tipo" Enos*". GEOACTA 2008 (97-103)
- Díaz, E.; Rodríguez, A. Dölling, O.; Moya, G. Bertoni, J. y Hillman, G** (2013) "Análisis de Simultaneidad de Extremos Hídricos en el centro y norte de la RA." *Revista CETA, N.2, FCEFYN*,
- Díaz, E.** (2013). *Identificación y Caracterización de Sequías hidrológicas en el Centro y Norte de Argentina*. Tesis de Maestría en Cs de la Ingeniería. FCEFyN-UNC. Córdoba, Argentina.
- Fernandez Larrañaga, B.** (1997) "Identificación y Caracterización de Sequías Hidrológicas en Chile Central." *Ingeniería del Agua*, 4- 37-46. España.
- Heredia Ligorria, A.** (2014) "Caracterización de Sequías Hidrológicas en Cuencas del Centro y Norte de la República Argentina". Informe Técnico Final, Práctica Supervisada. FCEFyN, UNC.
- Salas, J., Delleur, J., Yevjevich, V., y Lane, W.** (1980). *Applied Modeling of Hidrologic Time Series*. Water Resources Publications. Littleton, Colorado U.S.A.
- Tsakiris, G., Loukas, D., Pangalou, H., Vangelis, H., Tigkas, D., Rossi, G., y Cancelliere, A.** (2007). *Drought characterization*. Drought management guidelines technical. Capitulo 7, (85-102). Zaragoza.
- Yevjevich, V.** (1972) *Stochastic Processes in Hidrology*, Littleton, Colorado, WRP. USA