

CAMBIOS INTERDECADEALES EN LA CONDICION HIDRICA DE ARGENTINA ASOCIADAS CON LA TEMPERATURA INVERNAL DEL CONTINENTE Y EL OCEANO

Juan L. Minetti

Dpto. de Geografía de la UNT. Laboratorio Climatológico Sudamericano (LCS).
minettil@arnet.com.ar.

Arnobio G. Poblete

Instituto de Geografía Aplicada – Departamento de Geografía de la UNSJ
agpoblete@gmail.com

Walter M. Vargas

ONICET, LCS.Ovejero, D. P., Dpto. de Geografía, UNT, LCS.
vargas@at.fcen.uba.ar

[FECHA ENTREGA. 28/05/2014 - FECHA APROBADO 04/06/2014]

1. RESUMEN

A partir de índices hídricos propuestos para el estudio de las sequías en escala anual del Sur de Sudamérica, se analiza el comportamiento de largo plazo de los mismos, poniendo énfasis en las variaciones interdecadales. Estas variaciones parecen corresponderse con las oscilaciones de baja frecuencia del índice PDO y SOI, y simultáneamente con la de la temperatura mínima media de Agosto (invierno) en San Miguel de Tucumán-Argentina (TIS-

MT08). Otra fluctuación de este índice de temperatura continental de primavera se muestra útil para explicar las variaciones interanuales de los índices de sequías en Argentina con un desplazamiento de hasta dos años, que pueden usarse en la previsión climática

Palabras claves: Variaciones interdecadales, PDO-SOI, índice sequía anual Argentina.

2. ABSTRACT

From water indices proposed for droughts study in annual scale in the South of South America, their long term behavior is analyzed, emphasizing the interdecadal variations. These variations seem to correspond with low frequency oscillations of PDO and SOI indices, and simultaneously with August minimum average temperature (winter) in San Miguel of Tucumán-Argentina (TISMT08). Another fluctuation of this spring continen-

tal temperature index proves to be useful to explain the year-on-year variations of the indexes of droughts in Argentina with a displacement of up to two years, which can be used in the climatic forecast.

Key words: interdecadal Variations, PDO-SOI, Index annual drought Argentina.

3. INTRODUCCIÓN

A partir de índices anuales regionales de la condición hídrica seca o de exceso de agua en el Sur de Sudamérica mostradas por Minetti et. al (2007, 2010 a), y un inventario de sequías mensuales, estacionales y anuales (Minetti et. al, 2004 a), se avanzó en a) el conocimiento

sistemático de las mismas, analizando las propiedades estadísticas de los extremos, y b) tendencias con cambios interdecadales como así también las causas físicas que intervienen en tales procesos (Minetti et. al, 2010 b). Los cambios interdecadales de la precipitación sobre la

región han sido mostrados para la longitud de 16-25 años en Cuyo por Compagnucci y Vargas (1983), y del orden de 50 años en Argentina por Minetti et. al (2008), mientras que cambios no lineales de largo plazo o saltos climáticos han sido analizados en El pasado por Minetti et. al (1998, 2004 b) entre otros.

Todos ellos han tenido extensiones espaciales considerables dentro del Hemisferio Sur (HS) involucrando a la región subtropical, donde la actividad humana ha crecido sustancialmente en las últimas décadas bajo las formas de agricultura, ganadería y otras (Minetti y Sierra, 1984; Sierra et. al, 1995). Mientras que en la primera mitad del siglo XX, los cambios tecnológicos eran pequeños respecto a los actuales, la condición climática variaba lentamente y a lo sumo se había observado un salto en la condición promedio de las variables alrededor de 1916. En este período el crecimiento poblacional argentino se producía principalmente sobre la Pampa Húmeda y áreas lluviosas del Noroeste Argentino (NOA), mientras que en el resto del territorio de clima más árido permanecía con escasa o ninguna perturbación en sus ecosistemas. Durante la segunda mitad del siglo XX (1958) se registró el más importante salto climático del período instrumental (secular) (Minetti y Vargas, 1998) y la aparición de tecnologías para desarrollar su agricultura y ganadería en zonas semiáridas primero, y árida después. Estos cambios en el clima se han comportado como fluctuaciones anuales interdecadales con longitud de onda aún mayor que las propuestas por Compagnucci y Vargas (1983) de 16-25 años, tal como la mostrada por Minetti et. al (2008). Las fases de ascenso y descenso de esta fluctuación dieron lugar a la necesidad de mejorar el desarrollo de la Vigilancia Climática Regional, y con esto poder advertir de la ocurrencia de un cambio de fase lluvioso/seca alrededor del año 2003. Este cambio reciente no se pareció al de un salto climático, aunque las variaciones en los promedios eran muy importantes y torcieron el rumbo de todas las tendencias de los índices hídricos, mostrando un cambio en gran escala. También se observaron evidencias recientes de erosión eólica de magnitud sobre el continente, particularmente sobre el Sudoeste de la provincia de Bs.As. y provincia de La Pampa (La Nación, 2009; Perfil, 2009). Otras pérdidas aparecieron también, tales como el costo de producción, mantenimiento de un parque de maquinaria y tecnologías ociosas en situaciones de sequías, y la potenciación de conflictos económicos-sociales (Barsky y Dávila, 2008), agudizando los impactos. Sí quedó en claro que

el cambio operado alrededor del 2003 en la condición hídrica del Sur de Sudamérica, no se trataba de un salto climático (Minetti et. al, 2008), sino el cambio de fase de una larga onda del orden de 50-60 años de duración, que se podía observar en las series seculares de los índices hídricos regionales. Los datos Proxy generados por la dendrocronología hasta 1985 (Villalba et. al, 1985) no advertían de la existencia de una fluctuación semejante en Argentina con series reconstruidas para el Noroeste Argentino (NOA) desde el año 1688. Posiblemente esto ha tenido que ver con las técnicas de filtrado de ondas largas que se someten a los índices de crecimiento de anillos de árboles, para transformar las series en estacionarias. Posteriores investigaciones de estos autores muestran cambios interdecadales importantes en la precipitación y temperatura en la región (NOA) (Villalba et. al, 1998 a; Villalba et. al, 1998 b). Como producto de la investigación del evento 2003, donde la naturaleza brindaba un excepcional oportunidad para el análisis de un contraste lluvioso-seco, Minetti et. al (2008) mostraron que las fluctuaciones de las temperaturas mínimas medias del invierno (Julio, Agosto del año "t-1") en la zona continental subtropical (S.M. de Tucumán) eran buenos predictores de la condición hídrica a venir en Argentina entre Julio y Junio de los años "t" y datos de la misma variable en Octubre el año "t-1" para la condición hídrica del año "t+1". El predictor de Agosto designado como TISMT08 del año "t" mostró una fluctuación de baja frecuencia desfasado en 180° con los índices hídricos de cinco regiones de Argentina. Tanto la variable TISMT08, como su fluctuación de baja frecuencia terminaron siendo buenos predictores de la condición hídrica de la campaña agrícola entrante y del comportamiento de más lejano plazo. Otro hallazgo importante tenía que ver con la conexión entre la TISMT08 de la condición térmica invernal en el casi-trópico continental y el SOI08 como indicador de gran escala invernal de la variabilidad interanual. En este caso también es destacable el hecho de que en un corto período, dos eventos El Niño, ocurridos durante los años 2002-03 y 2006-07 hayan producido respuestas diferentes en diversas subregiones de Sudamérica. Muchas cuestiones acerca de este predictor (TISMT08) y sus conexiones con otros índices interanuales se desconocen, entre ello su naturaleza y cómo actúa en la región. En este trabajo se estudia el comportamiento del TISMT08, SOI, PDO y temperatura superficial del mar (SST) y sus interrelaciones.

4. DATOS Y METODOS

Se han utilizado en este trabajo:

a) Temperaturas mínimas medias mensuales de San Miguel de Tucumán (TISMTxx) (Vargas y Minetti, 1997) cuyo período 1889-2009 ha sido observada por investigadores primero hasta 1911, y luego por la Estación Experimental Agrícola al presente (hoy Agroindustrial

Obispo Colombes). Esto le da a la serie de temperatura un rol importante en el estudio del cuasi-trópico continental argentino, sobre los cambios interdecadales y tendencias seculares;

b) Índices anuales de sequías anuales para Argentina en el período agrícola Julio-Junio construidas según la

metodología de Minetti et. al (2004a). Esta metodología estima para cada mes el porcentaje de localidades secas (con precipitación debajo de la mediana) en una región geográfica, como:

$$IMS = \text{cantidad localidades secas} / \text{total localidades} \quad (1)$$

Este índice es independiente de la cantidad de localidades usadas y oscila entre $0 \leq IMS \leq 1$. Luego por adición de cada uno de estos meses se construye el índice anual:

$$IAS = \sum IMS \quad \text{para los doce meses del año} \quad (2)$$

Este índice oscila entre $0 \leq IAS \leq 12$ y está centrado en $IAS=6$

Estos valores han sido validados con información de precipitación del Reanálisis I (Minetti et. al, 2010 a); **c)** Datos del Reanálisis I han permitido ver en términos climáticos promediados de cinco años antes y después del año 2003 las condiciones de circulación atmosférica, temperaturas superficiales del mar y otras variables, algunas de ellas sin importar la significación estadística de tales cambios y al solo efecto de tener una visión geográfica hemisférica y regional. La validación de estos datos para estudios climáticos mensuales o anuales ha sido tratado por Dufek et. al (2008);

d) Datos mensuales del SOI y PDO publicados por el Servicio Meteorológico de Australia (SOI-Troup), <http://www.bom.gov.au/climate/current/soihtm1.shtml> y los

del PDO de la Joint Institute for the Study of the Atmosphere and Ocean (JISAO), <http://jisao.washington.edu/pdo/PDO.latest>.

También se han utilizado para el estudio de series temporales las tendencias obtenidas por mínimos cuadrados en polinomios de primer grado y órdenes superiores. En los análisis espectrales cruzados con datos de series originales, se calcularon el co-espectro, espectro de cuadratura, y el ángulo de fase según lo prescripto por Otnes y Enochson, 1972. En este caso, la densidad espectral rústica fue calculada por la siguiente ecuación:

$$S_{xy} = 2 \Delta T / NX^* (k) Y (k) = C_{xy} (k) - j Q_{xy} (k) \quad (3)$$

$$\text{con } k = 0, 1, 2, 3, \dots, N/2$$

$$|S_{xy} (k)|^2 = C^2_{xy} (k) + Q^2_{xy} (k) \quad (4)$$

$$\Phi_{xy} (k) = 360/2\pi \tan^{-1} [Q_{xy} (k)/C_{xy} (k)] \quad (5)$$

La función coherencia relacionada con el co-espectro está dada por:

$$R_{xy} = |S_{xy} (k)|^2 / |S_x (k) S_y (k)| \quad (6)$$

$$\text{con } k = 0, 1, 2, 3, \dots, N/2$$

con N = Número de datos (años).

El cambio observado en la condición hídrica de Argentina y otras variables ha sido detectado por la Vigilancia Climática Operativa mensual que lleva a cabo el Laboratorio Climatológico Sudamericano (www.labclisud.com.ar) (Minetti 2009-10).

5. RESULTADOS

A partir del año 2003 se han observados profundos cambios en el clima Sudamericano. Esto se ha evidenciado por una desestabilización de los promedios de las variables de gran escala (Minetti et. al, 2008). Los cambios mostrados han surgido de la Vigilancia Climática Operativa al contrastar un período anterior (lluvioso), con el actual (seco). El primer período (lluvioso) incluyó algunos eventos de inundaciones en cuencas extendidas de la llanura Argentina como el de la ciudad de Santa Fé en Abril 2003. Allí las pérdidas humanas, en la producción agrícola-ganadera e infraestructura fue cuantiosa (Minetti et. al, 2005). Con la sequía posterior (La Nación, 2009), se perdió una gran parte de las cosechas de granos y disminución de stock ganadero, particularmente durante la campaña 2008-09.

La figura 1 muestra a cuatro variables útiles para entender el cambio de situación climática en la década 2010. Las figuras 1 A, B indican la tendencia decreciente de los procesos de advección húmeda sobre el Norte de Argentina y la baroclinicidad tropical. La primera fue estimada como la componente Norte del viento representado por el gradiente horizontal de presión atmosférica entre R. de Janeiro-Brasil y Córdoba-Argentina. La segunda, la

baroclinicidad Norte-Sur, entre el Trópico y latitudes medias de Sudamérica estimada como diferencias de temperaturas entre R. de Janeiro-Brasil y Bs.As.-Argentina. En esta figura se identifica al período 2006-08 como de escaso aporte húmedo del Norte y frontolisis (débil gradiente térmico Norte-Sur). Ambos procesos supresores de la precipitación hicieron caer a los promedios de las lluvias anuales entre los períodos 2004-07 y 2000-03 en unos -400mm, para el Norte de Santa Fe-Entre Ríos, Sur de Corrientes y Sur de Bs.As. (Minetti et. al, 2008). Las temperaturas mínimas medias mensuales de Lima-Perú y R. de Janeiro-Brasil (Figuras 1 C y D) como indicadores del estado térmico del mar adyacente se ven con sus tendencias (Aceituno, 1987; Minetti et. al, 2003). Se advierte un enfriamiento gradual simultáneo (tendencia) para los dos océanos (Pacífico y Atlántico) entre los años 2003-08. Un aparente corte de este frío proceso oceánico lo presenta el año 2009-10 con la ocurrencia de un intenso El Niño sobre el O.Pacífico y simultáneo calentamiento de las aguas en el Atlántico tropical. Dentro de este proceso frío se ha registrado un importante evento La Niña durante el año 2008-09, que por si solo no justifica a todo el enfriamiento oceánico observado

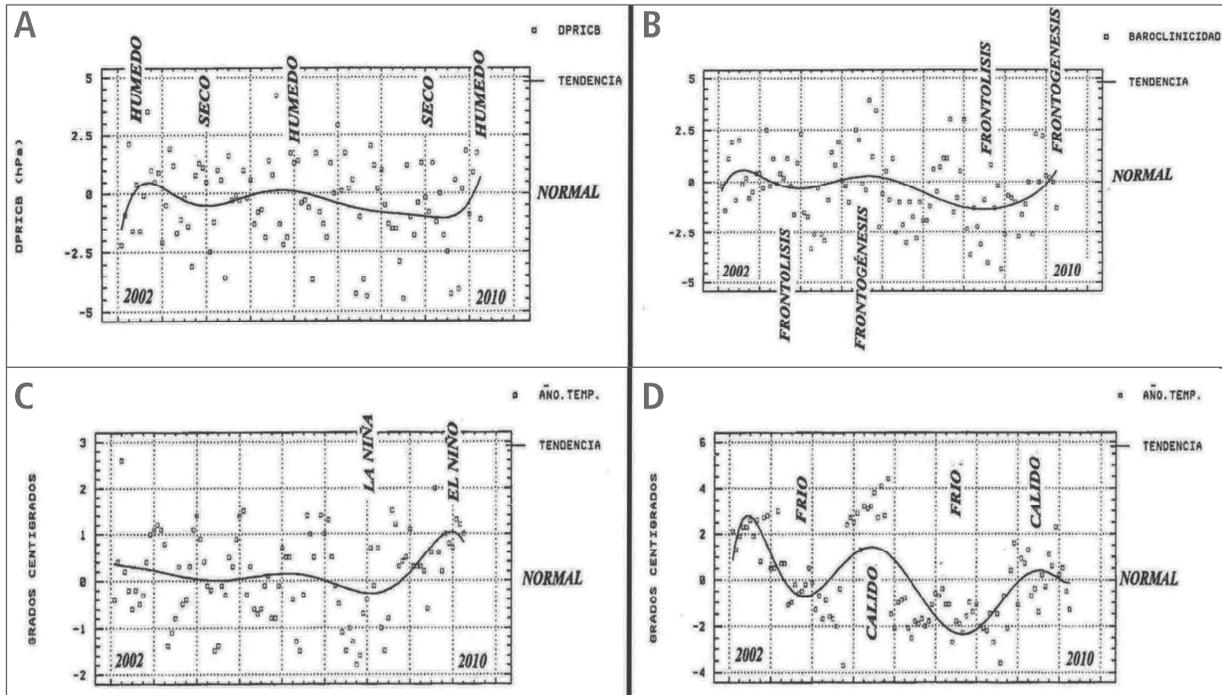


Figura 1: A- Anomalías de diferencia de presión atmosférica entre Rio de Janeiro-Córdoba y tendencia; B- Anomalías de deferencia de temperatura media entre Rio de Janeiro-Buenos Aires y tendencia; C-Anomalia de temperatura minima media de Lima y tendencia; D- Anomalia de temperatura minima media de Rio de Janeiro y tendencia. Todos ello es en el periodo Enero 2002-Abril 2010.

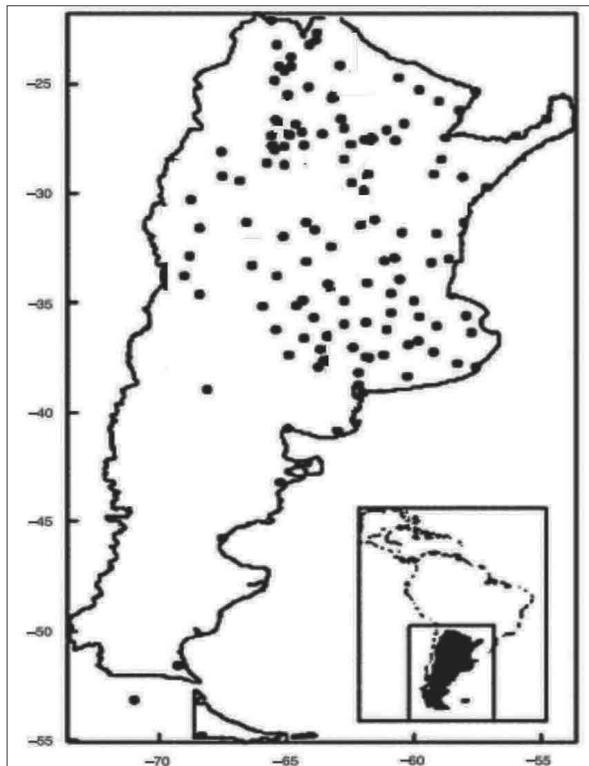


Figura 2A. Red estaciones pluviométricas empleadas en los índices de sequía de Argentina.



Figura 2B. Macro región de estudio con localidades utilizadas en los análisis.

con anterioridad. Estas dos fases opuestas del ENSO han sido observadas en un proceso de cambio de mayor escala. Con la sequía de la campaña agrícola 2008-09,

muy extendida en el espacio desde la década de 1960, se ha producido la pérdida de un tercio de la producción de granos de Argentina, unos 30 millones de toneladas

en un año, por citar un impacto.

En la *figura 2 a* se muestra a las regiones donde se han estimado los índices de sequías mensuales-anales en Argentina. La *figura 2b* muestra a las localidades mencionadas en el trabajo. La *figura 3* representa a los índices mensuales de sequía en Argentina con su tendencia en el período enero 1999-Noviembre 2011. La tendencia indica un cambio de lluvioso a seco alrededor



Figura 3. Tendencia (polinomio de 7.gr.) de los índices de sequías mensuales en la República Argentina.

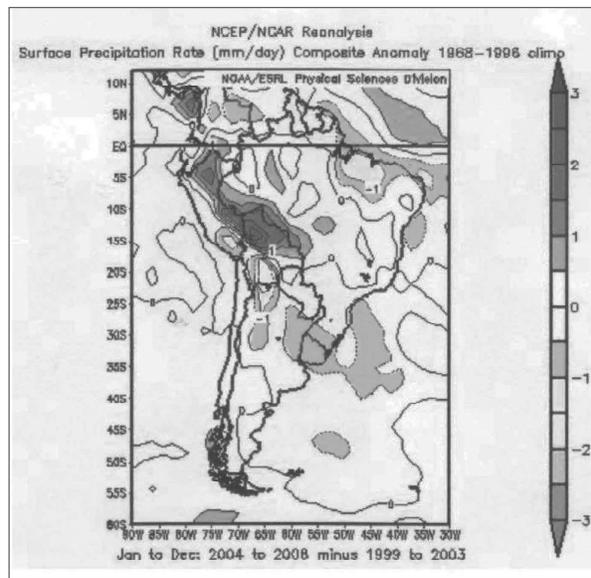


Figura 4. : Diferencia de precipitaciones promedio anuales entre los periodos 2004-2008/1999-2003. Los valores están expresados en mm/día-año. Los valores superiores a +/- 365 mm/año.

de los años 2003-04. La *figura 4* ha sido obtenida con la información del Reanálisis 1 como diferencia de precipitación en Sudamérica entre los periodos quinquenales 2004-08/1999-03. Está mostrando a una condición seca extendida en el Centro-Norte de Argentina, y Sur de Bolivia, con pérdidas del orden de -365mm/año o más en el proceso de secado. También pueden verse una anomalía de signo opuesto más al Norte sobre la zona septentrional de Bolivia, Sud de Brasil y Cordillera Peruana como un dipolo seco al Sur-lluvioso al Norte. Si bien este proceso pareciera indicar una semejanza con la de un evento frío La Niña en el Sudeste de Sudamérica, la presencia de otro sector seco simultáneo en el extremo

Noreste de Brasil y Oeste de Venezuela-Colombia, no se parecen al modelo conceptual de distribución espacial de anomalías con el ENSO (Caviedes, 1973, Ropelewsky and Halpert, 1996; Grimm, 2011, entre otros).

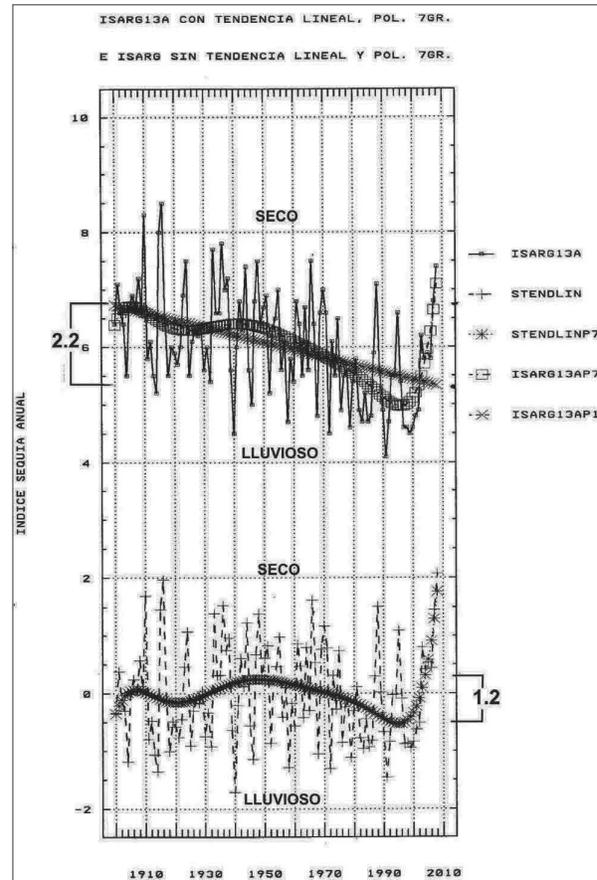


Figura 5A: Índice de sequía anual en Argentina con tendencia lineal y polinomio de 7mo. Grado (arriba). Ídem anterior sin tendencia lineal (abajo).

La *figura 5A* muestra al índice de sequía anual de Argentina identificando a su tendencia secular y una fluctuación larga que se muestra en ascenso en la década pasada. La parte superior de la figura muestra al efecto del cambio secular durante el siglo XX y comienzos del XXI con una tasa de cambio del 0.02/ año. Este cambio se debería posiblemente a efectos de largo plazo en los sistemas de medición (Hoffmann, 1970), Cambio Climático (CC), o a factores desconocidos. Un análisis de validación de los datos ya fue realizada por Minetti et. al (1998) al analizar la consistencia del salto climático, y más recientemente al relacionar los índices de sequías con los datos del Reanálisis I (Minetti et. al 2010 a). Un ajuste con polinomio de 7mo. Grado muestra a una fluctuación interdecadal una vez filtrada la tendencia secular (figura de abajo), que también arroja un cambio de 0.03/año entre máximo y mínimo de la onda. La fuente de esta variación interdecadal obedecería a otros motivos pero de igual o mayor importancia que el cambio secular (CC). Si los efectos de ambas componentes se suman, como los mostrados por el polinomio

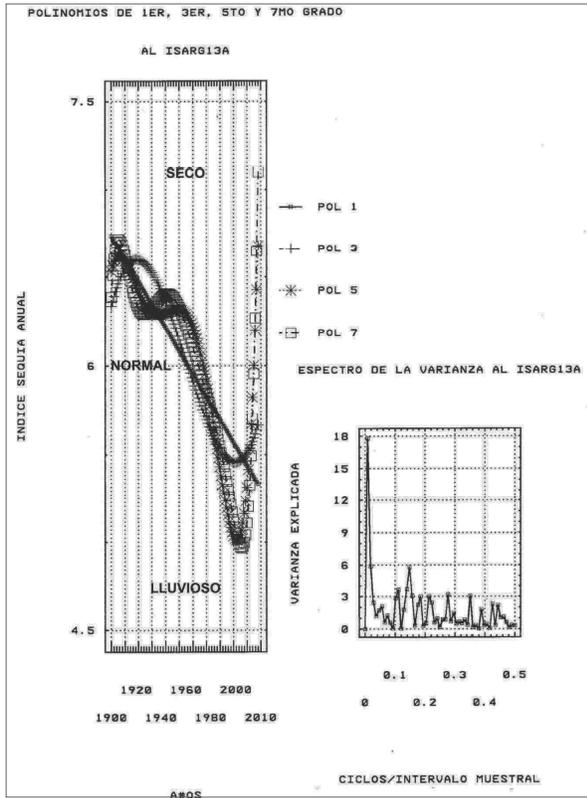


Figura 5B: Polinomios de 1er, 3ro, 5to y 7mo Grado al índice de sequía anual en Argentina. A la derecha se ubica al espectro de la varianza del índice de sequía con un importante aporte en las longitudes de 50-60 años.

de 7mo. grado arriba, las pendientes de los cambios interdecadales se elevan al 0.05/año. La pendiente final, en la fase de ascenso ocurrido desde 1995 al 2008 en gran medida, es debida al crecimiento del índice en el período 2003-09, exagerado seguramente por el método polinomial de ajuste. La figura 5B muestra cómo son los ajustes de 1, 3, 5 y 7mo orden al índice de sequía anual en Argentina. A la derecha del mismo se detalla en el espectro de la varianza (Tukey, 1950) que la máxima varianza es debida a una oscilación de 50-60 años. Como los métodos espectrales tienen escasa resolución en estas bandas por la longitud de las series de datos (110 años) se crea la necesidad de extender o reconstruir series Proxy en la región. En este caso una tendencia larga del clima (secular), puede ser representada por un polinomio de 1er. Grado (recta), pero también por un polinomio de 2do. y 3er. grado. Estos últimos son semejantes a una porción de una onda trigonométrica (función seno) que arrojaría un falso ciclo climático de 100 años (Sierra y Pérez, 2006). Si no se conocen las causas generadoras de este cambio largo del clima, una extrapolación a futuro se incluiría en los errores metodológicos del diagnóstico (Burroughs, 1992). Se ha explorado en los últimos años sobre la génesis de una oscilación interdecadal del orden de 50-60 años (Minetti et. al, 2008), juntamente con la posibilidad de prever esta variable, que es de gran interés en el sector

agropecuario, ecológico y otros. Se ha encontrado una conexión entre el índice de sequía anual estableciendo entre Julio del año "t" y Junio del "t+1" (ISARG13a) con tres variables que relatan a la circulación en gran escala: a) la temperatura mínima media de Agosto en S.M. de Tucumán-Argentina-TISMT08, b) los índices climáticos del mismo mes SOI08 y c) el índice PDO08. Estas conexiones se pueden ver en la matriz de correlaciones del cuadro 1.

Variables	ISARG13 a	TISMT08	SOI08	PDO08
ISARG13 a	1	-0.44	0.38	-0.28
TISMT08	-0.44	1	-0.22	0.11
SOI08	0.38	-0.22	1	-0.45
PDO08	-0.28	0.11	-0.45	1

Cuadro 1: Correlaciones entre el índice de sequía anual en Argentina para los períodos agrícolas (Jl-Jn) ISARG13a, temperatura mínima mensual de Agosto en San Miguel de Tucumán TISMT08, el Índice de Oscilación del Sur, SOI08 y la Pacific Interdecadal Oscillation PDO08, todas estos predictores en el mes de Agosto para el período 1900-2007. En negrita se ven las correlaciones estadísticamente significativas al 5% ($R_c = 0.19$).

La mayor parte de estas variables se encuentran conectadas con significación estadística, menos la asociación entre TISMT08 vs. PDO08. La variable más conectada con todas las variables resulta el SOI08. Sin embargo más adelante se mostrará que existe una correlación en las bajas frecuencias de TISMT08 y PDO08.

La figura 6 arriba representa a las oscilaciones de baja frecuencia de las tres principales variables predictores del ISARG13a. Todas parecen representar al mismo proceso de larga escala. Por este motivo se ha explorado la posibilidad de que el generador de este proceso sea el SOI. Anderson (1992) ha mostrado espectros de reconstrucciones del pasado para los eventos modernos (1800-1984), eventos extremos (1525-1800) y reconstrucción del SOI con datos del escurrimiento del río Nilo (AD 622-1525). En un rango de 1362 años, se ven que

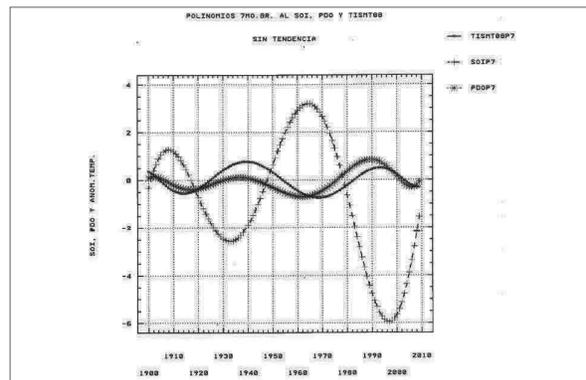


Figura 6 (arriba): Polinomios de 7mo. Grado de la variable TISMT08, SOI08 y PDO08

oscilaciones de 50-60 años y 80 años están en el espectro explicando gran porción de la varianza. Precisamente en los dos primeros periodos de largo plazo la oscilación de alrededor de 50-60 años está presente explicando el máximo de la varianza, y la de 80 años está mejor explicada en los escurrimientos del río Nilo, siguiendo una larga variación de la actividad solar (Burroughs, 1992). Al presente la ciencia paleoclimática ya tiene la certeza de que la ocurrencia de eventos similares al ENSO se ha reproducido durante los últimos 4.500 años tal como se conocen en la actualidad (Macharé y Ortlieb, 1993). Por otra parte MacDonald y Case (2005) confirmaron la oscilación de 50-60 años en un análisis wavelet sobre los anillos de crecimiento de árboles en el milenio pasado para California y Oeste de Canadá. Sobre esta base, los resultados de la figura 6 arriba serían extrapolables y así tener una idea del futuro, donde la oscilación de baja

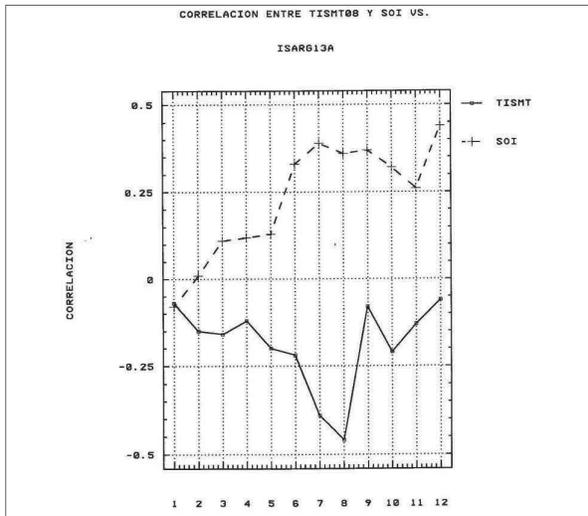


Figura 6 (abajo): Correlación mensual entre el SOIxx y TISM08xx con el Índice de sequía anual de Argentina en el periodo Julio/Junio de los años "t" y "t+1"

frecuencia del SOI08, TISM08 y PDO08, indicarían el mismo proceso largo del clima.

La figura 6 arriba da cuenta de la correlación existente entre el SOIxx y la TISM08xx mensuales (xx) del año "t" con el ISARG13a. Mientras que las variables predictoras SOI y TISM08 se evalúan en el año "t", el predictando ISARG13 se computa entre Julio del año "t" y Junio del año "t+1". Las mayores correlaciones se sitúan sobre los meses de Julio y Agosto en el inicio del nuevo ciclo hidrológico. En el pasado Elliot y Angell (1988) y Aceituno y Montecinos (1992) mostraron falta de estabilidad en las asociaciones del ENSO con la temperatura superficial del mar SST en el O.Pacífico y la precipitación en Sudamérica, con series de datos individuales. Para sortear estos aspectos se ha explorado con tablas de contingencias (Brooks and Carruthers, 1953) para datos alternados (análisis exploratorio-confirmatorio) y matriz total, la estabilidad de las asociaciones. Trabajando con N=108 datos entre los años 1900/2007 las contingencias arrojaron en los periodos para el SOI08/ISARG 13a

los porcentajes del 61-70-64% de los datos en la diagonal matricial principal, mientras que para el TISM08/ISARG13A los porcentajes fueron del 63-67-69%. De ambos se ha seleccionado entonces a la última variable (TISM08) como predictora más efectiva de la condición hídrica en Argentina. El cuadro 2 muestra a las correlaciones existentes entre la temperatura media del mar en Pto. Chicama (Perú) y las temperaturas media del aire tomadas como representativas del mar en Antofagasta y la isla de Juan Fernandez (Chile) con TISM08. La ubicación geográfica de las localidades se muestran en la figura 2b.

VARIABLES	TISM08	TJFE08	TANT08	TCHI08
TISM08	1	.38	.51	.16
TJFE08	.38	1	.29	.02
TANT08	.51	.29	1	.67
TCHI08	.16	.88	.67	1

Cuadro 2: Correlaciones entre la temperatura mínima media de San Miguel de Tucumán-Argentina (TISM08) vs. la temperatura media del agua superficial en Puerto Chicama-Perú (TCHI08), la temperatura media de Antofagasta-Chile (TANT08) y la temperatura media de la Isla Juan Fernández -Chile (TJFE08), todas en el mes de Agosto durante el periodo 1930-90. Los valores con significación estadística se resaltan en negrita. $rc = 0.25$ (sig. 5%).

Como se indica en el cuadro anterior la única localidad conectada en su variabilidad térmica interanual con las otras variables, es la de Antofagasta en la costa Norte de Chile. La variabilidad interanual de la temperatura del mar de este sector oceánico está conectada con las variaciones de la temperatura costera del Norte de Perú en Pto. Chicama y en el área de El Niño 1+2 (NOAA), como así también mar adentro al Oeste del centro de Chile en la isla de Juan Fernández. Esta conexión sugiere la necesidad de monitorear activamente a esta región oceánica, como se realiza en los sectores de El Niño 1+2, 3,4 y 3+4. Si se explora a las variaciones de la TISM08 mensual con las variaciones de las SST del Reanálisis 1 se encuentra una mayor asociación espacial con la temperatura del mar en el mes de Agosto sobre el Océano

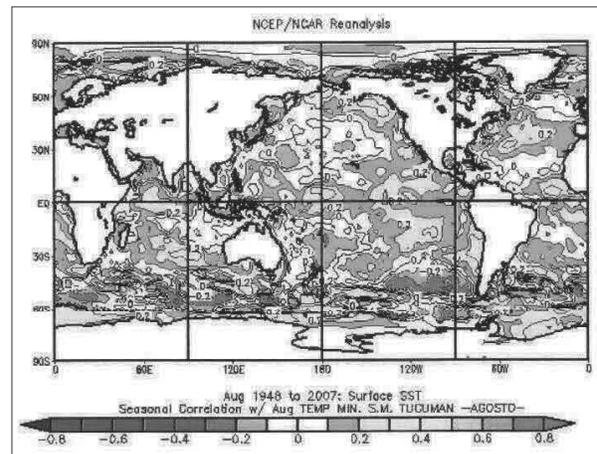


Figura 7: Isocorrelaciones entre la temperatura mínima media de S.M. de Tucumán (TISM08) con las SST 08 del Reanálisis 1, ambas en el mes de Agosto. Periodo 1948-2007. Correlación superior a 0.25, estadísticamente significativo.

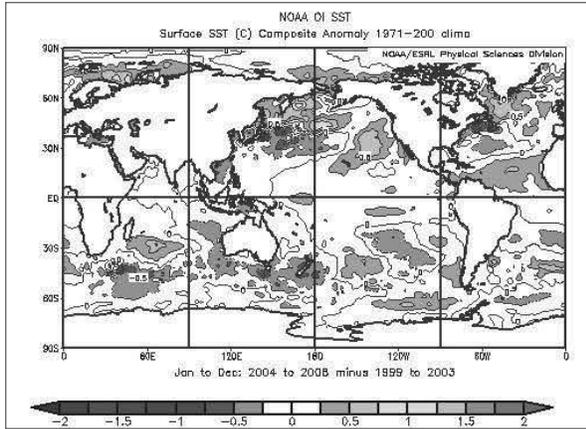


Figura 8: Diferencias de temperaturas quinquenales de las SST en los períodos Enero/Diciembre 2004-08/1999-2003. Con datos de Reanálisis I.

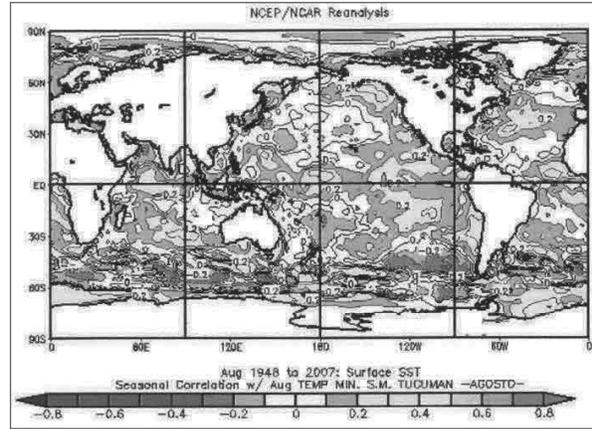


Figura 9: Cambios quinquenales del contenido de agua precipitable en los períodos Enero/Diciembre 2004-08/1999-2003.

Pacífico Sud Oriental, coincidente con el momento de máxima correlación con TISM08. **La figura 7** muestra a las isocorrelaciones de TISM08 con las SST de agosto en escala hemisférica. En ella se ve que la expansión areal de las asociaciones (correlación) entre las variables que alcanza al trimestre JJA, no mostradas en su totali-

dad aquí, alcanza la máxima asociación en Agosto. Las correlaciones significativas se extienden en gran parte del O. Pacífico sudoriental. **La figura 8** explora geográficamente la diferencias térmicas superficial del mar entre el período seco 2004-08 con el lluvioso anterior 1999-2003. Las aguas superficiales del Océano Pacífico

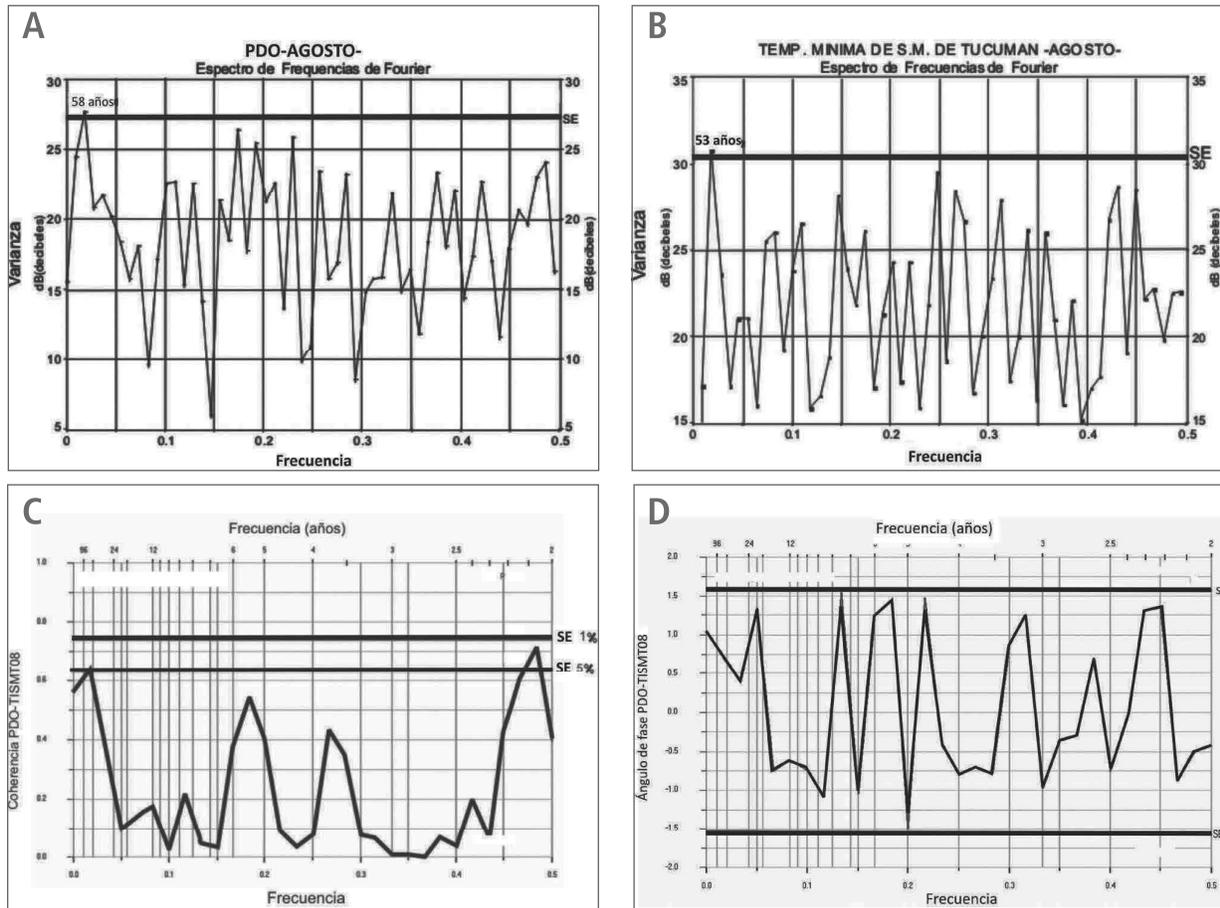


Figura 10: Espectro de frecuencias de Fourier a las PDO de Agosto. B: Espectro de frecuencias de Fourier de la TISM de Agosto. C: Función coherencia. D: Fase entre las series PDO y TISM de Agosto. Se grafican en las cuatro figuras los niveles de significación estadística (SE).

MES	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
COR.	.27		.34					.21		.22	1.0	.22	.34	.29	.23

Cuadro 3: Correlaciones significativas y positivas entre las series de temperaturas mínimas medias mensuales con idéntica variable del mes de Agosto, hacia atrás y delante de Agosto del año "t" en San Miguel de Tucumán-Argentina durante período 1901-2000. Correlaciones críticas al 5% 0.19, al 1% 0.25, y 1‰.

Subtropical estuvieron más frías en el período seco reciente que las del período 1999-03 particularmente en el subtrópico. Esto también aunque no se muestra, ha sido correspondido por un campo de mayor presión atmosférica en el O.Pacífico Sur Subtropical y menor sobre el litoral Atlántico de América del Sur. Este dipolo ha favorecido a los flujos del Sudoeste con advección de aire más seco sobre la llanura argentina (Minetti et. al, 2010 a) y disminución del contenido del agua precipitable. Esta disminución ha sido extendida sobre Sudamérica, Australia y Sudáfrica mostradas en la *figura 9*, e indicaría en alguna medida la acción subsidente generalizada de la zona anticiclónica subtropical del HS.

La *figura 10* muestra a los espectros de la varianza de la PDO08 y la TISMTO8, todos ellos indicando que el mayor porcentaje de la varianza está explicado en la longitud del orden de 58.8 y 55.5 años. También se observa una elevada coherencia y un defasaje sin significación estadística. Esto confirma que el cambio largo observado entre las variables, incluido al SOI08 que no se presenta por redundante, se trataría de un mismo fenómeno. No es extraño encontrar esta conexión entre la oscilación de largo período de la SST en el O.Pacífico Sur y Norte con la temperatura mínima en el epicentro continental de Sudamérica, debido al nivel de oceanidad del HS.

El *cuadro 3* muestra a la capacidad de memoria que posee la temperatura mínima media mensual de Tucumán, como una contribución al análisis de la predecibilidad intranual-interanual.

6. CONCLUSIONES

Se ha encontrado un importante predictor climático de la condición hídrica de Argentina (TISMTO8) representativo de las relaciones entre condiciones térmicas invernales continentales con las oceánicas en el O.Pacífico oriental-central. También las variables más conectadas, el SOI08 y PDO08 impactan sobre Argentina, representando a procesos climáticos de mayor escala que la regional.

Las oscilaciones de baja frecuencia de estas variables detectan una conexión importante en la banda espectral en el orden de 50-60 años. Esta oscilación cuasi-periódica ha tenido continuidad en los pasados 1362 años (27 repeticiones), lo que hace crecer su importancia como

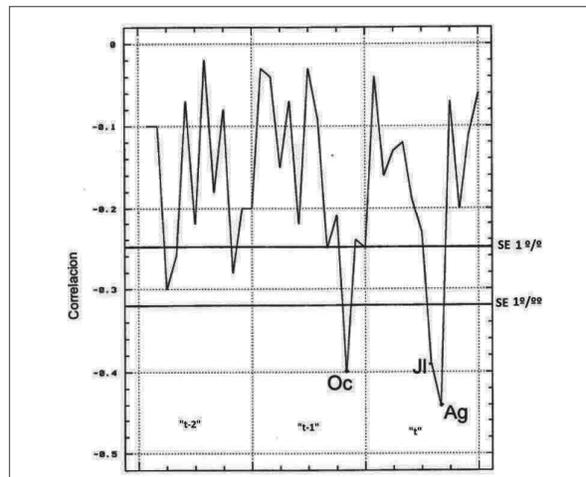


Figura 11: Correlaciones entre las temperaturas mínimas medias mensuales de S.M. de Tucumán con el índice de sequía anual en Argentina hasta 30 meses antes de su inicio. Se identifican los límites de significación estadística al 1% y 1‰ respectivamente.

Se advierte también en el mismo que los mayores niveles de memoria (persistencia) se concentran entre los meses de Julio-Diciembre del año "t" lo que haría válida el concepto de perturbación invierno-primaveral. Nótese una importante pausa sin conexión interna entre las temperaturas mensuales (correlaciones no significativas de Enero-Abril, y esto podría deberse a que en este período se definen estadísticamente la ocurrencia de los eventos El Niño-La Niña (Minetti et. al, 2003). En tanto que la conexión de Diciembre (año "t-1") con el mes de Agosto (año t) siguiente tiende a consolidar el signo de la asociación anterior dando persistencia a los sistemas de larga escala. La asociación entre las anomalías térmicas de Octubre-Diciembre del año "t-1" con Agosto del año "t" permitiría extender el pronóstico de largo plazo de la condición hídrica en Argentina a dos años. Una exploración de esto se analiza en la *figura 11* donde se ve la correlación atrasada de las temperaturas mínimas de S.M. de Tucumán con el índice de sequía de Argentina entre los años "t-1" al "t+1", constituyéndose en un importante predictor de largo plazo.

un predictor anual y de largo plazo para las precipitaciones de Argentina.

En el más largo plazo de los índices de sequías (secular o CC), el efecto PDO estaría superpuesto sobre él.

El inicio de un período frío en el mar (O.Pacífico) más extendido en el tiempo alrededor del año 2003, no parece ser un proceso de salto climático como el de la década de 1950 ya que éste último sería de tipo aleatorio e impredecible.

Las conexiones a distancia entre la variabilidad interanual de la temperatura mínima de Tucumán entre los meses de Diciembre del año "t-1" con agosto del año "t" y a su vez entre agosto del año "t" con la condición

hídrica de Argentina del período Julio del año "t" hasta junio del año "t+1" facilita la posibilidad de la elaboración de un pronóstico extendido. Idéntico resultado se

encontró con las temperaturas mínimas medias de S.M. de Tucumán durante el mes de Octubre del año "t-1".

7. AGRADECIMIENTOS

Al Laboratorio Climatológico Sudamericano por la información y equipamiento necesarios para este trabajo. A la Agencia Nacional de Ciencia y Técnica de la Nación (ANCYT) y la Universidad Nacional de San Juan (UNSJ)

por los recursos económicos PICTO- UNSJ-2009-0150-BID, por sus aportes económicos en el desarrollo de este trabajo. A los revisores por sus valiosos aportes y sugerencias

7. BIBLIOGRAFÍA

- ANDERSON, R.Y.: **Long-term changes in the frequency of occurrence of El Niño events. 193-200.** En *El Niño: Historical and paleoclimatic aspects of the Southern Oscillation*, Ed. por H.Díaz and V.Markgraft, 476 p, 1992.
- ACEITUNO, P.A. **On the interannual variability of South American climate and Southern Oscillation. 1987.** Ph.D. Thesis. University of Wisconsin. Madison, USA, 299p.
- ACEITUNO, P.A.; MONTECINOS, A. **Análisis de la estabilidad de la relación entre la Oscilación Sur y la precipitación en América del Sur.** *Paleo ENSO Records. Int. Symp. Lima*, 1992.
- BARSKY, O.; DAVILA M. **La rebelión del campo.** Historia del conflicto agrario argentino. Ed. Sudamericana, 346p. Bs.As. 2008.
- BROOKS, C.E.P.; CARRUTHERS, B. **Handbook of Statistical Methods in Meteorology.** London: Her Majesty's Stationery Office, 412p, 1953.
- BURROUGHS, W.J. **Weather cycles real or imaginary?** Cambridge University Press, 201p, 1992.
- COMPAGNUCCI, R.H.; VARGAS W.M. **Análisis espectral de las series de precipitación estival.** *Meteorológica* v.34, p213-224. CAM. Bs.As. 1983.
- CAVEDES, C.N. **Secas and El Niño: Two simultaneous climatically hazards in South America.** *Proceeding Association of American Geographers*, v. 5, p19-73, 1973.
- DUFEK, A.S.; AMBRIZZI, T.; DA ROCHA, R.P. **Are Reanalysis Data Useful for Calculating Climate Indices over South America?** *Annals of the New York Academy of Sciences*, v.1146, p87-104, doi: 10.1196/annals, 1446.010, 2008.
- ELIOT, W.P.; ANGELL, J.K. **Evidences for changes in Southern Oscillation relationships during the last 100 years.** *Journal of Climate*, v.1, p729-737, 1988.
- GRIMM, A.M. **Interannual climate variability in South America: Impact on seasonal precipitations, extreme events and possible effects of climate change.** *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. V. 25, N. 4, 537-554, DOI: 10.1007/s00477-010-0420-1.
- HOFFMANN, J.A.J. **Características de las series de precipitaciones en la República Argentina.** *Meteorológica*, v.1, n.3, p166-190. CAM. Bs.As., 1970.
- FISHER, R.A. **Statistical Methods for Research Workers.** Oliver & Boyd Edimburg, 190p, 1932.
- LA NACION. **Sequía en Buenos Aires: "La situación es desesperante"**, Martes 10 de Noviembre, Bs.As., 2009.
- MACDONALD, G.M.; CASE, R.A. **Variations in the Pacific Decadal Oscillation over the past millennium.** *Geophysics Research Letters*, v.32, L08703, 2005.
- MACHARE, J.; ORTIEB, L. **Registros del fenómeno El Niño en el Perú.** *Bulletin Institute Francais Détudes Andines*, v.22, n.1, p35-52, 1993.
- MINETTI, J.L.; SIERRA, E.M. **La expansión de la frontera agrícola en Tucumán y el diagnóstico climático.** *Revista Industrial y Agrícola de Tucumán*, v.61, n.2, p109-116, 1984.
- MINETTI, J.L.; VARGAS, W.M. **Trends and jumps in the annual precipitation in South America, of the 15°S.** *Atmósfera* v.11, n.4, p205-222, 1998.
- MINETTI, J.L.; VARGAS, W.M.; POBLETE, A.G. **Eastern equatorial pacific SST variability related with the temperature of Lima (Perú).** *Recent Research Development Meteorology*, v.2, p1-19, Kerala, 2003.
- MINETTI, J.L.; VARGAS, W.M.; DE LA ZERDA, L.R.; POBLETE, A.G.; CASAGRANDE, G.A.; ACUÑA, L.R.; NIEVA, J.J.; FRASSETO, F.E.; OSTERTAC, G.E.; MINETTI, L.R.; MENDOZA E.A. **Inventario de las sequías regionales en Argentina y Chile.** Informe Técnico del Laboratorio Climatológico Sudamericano. Fundación Caldenius. 50p, S.M. de Tucumán, 2004 a.
- MINETTI, J.L.; VARGAS, W.M.; POBLETE, A.G.; ACUÑA, L.R.; CASAGRANDE, G.A. **Non-linear trends and low frequency oscillations in annual precipitation over Argentina and Chile, 1931-99.** *Atmósfera* v.16, p119-135, 2004 b.
- MINETTI, J.L.; PAEGLE, J.N.; VARGAS, W.M.; POBLETE, A.G.; FIGUEROA, F.M. **Inundación de Santa Fe en Abril del 2003-Procesos climáticos**

cos e hidrológicos coadyuvantes. IX Congreso Argentino de Meteorología, p3-7 de Octubre, 2005.

• MINETTI, J.L.; VARGAS, W.M.; VEGA, B.; COSTA, M.C. **Las sequías en la Pampa Húmeda: Impacto en la productividad del maíz.** Revista Brasileira de Meteorología, v.22, p218-232, 2007.

• MINETTI, J.L.; NAUMANN, G.; VARGAS, W.M.; POBLETE, A.G. **Las sequías en el largo plazo en Argentina y sus precursores invernales.** Revista de Geografía, v.12, p26-37. Instituto de Geografía Aplicada, UNSJ, 2008.

• MINETTI, J.L. **Boletines mensuales de la Vigilancia Climática Regional.** Laboratorio Climatológico Sudamericano, Fundación Carl C: zon Caldenius. S.M. de Tucumán, 2009-10.

• MINETTI, J.L.; VARGAS, W.M.; POBLETE, A.G.; DE LA ZERDA L.R.; ACUÑA, L.R. **Regional droughts in southern South America.** Theoretical and Applied Climatology, v.102, p403-415, 2010 a.

• MINETTI, J.L.; POBLETE, A.G.; BOBBA, M.E. **Regional droughts in the southern of South America-Physical aspects.** Revista Brasileira de Meteorología, v.25 n1, p88-102. 2010 b.

• OTNES, R.K.; ENOCHSON, L. Digital time series analysis. New York. Wiley-Interscience, 476 p, 1972.

PERFIL **Sequía en La Pampa: hay pérdidas por \$ 1.000 millones.** Viernes 30 de Enero. Santa Rosa-La Pampa, 2009.

• ROPELEWSKI, C.D.; HALPERT, M.S. **Quantifying Southern Oscillation-precipitation relationships.** Journal of Climate, v.9, p429-438, 1996.

• SIERRA, E.M.; CONDE PRATT, M.; PEREZ, S.P. **La migración del cultivo de granos como indicador del cambio climático 1941-93 en la Región Pampeana Argentina.** Revista de la Facultad de Agronomía, v.15, n2-3, p171-176, Bs.As., 1995.

• SIERRA, E.M.; PEREZ, S.P. **Tendencias del régimen de precipitación y el manejo sustentable de los agro ecosistemas: estudio de un caso en el noroeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina.** Revista de Climatología, v.6, p.1-12, 2006.

• TUKEY, J.W.: **The sampling theory of power spectrum estimates.** Symposium on Applications of autocorrelation Analysis to Physical Problems. U.S. Office of Naval Research. NAVEXOS-P-735, 47-67. Washington, D.C., 1950.

• VARGAS, W.M.; MINETTI, J.L.; **Inhomogeneidades en series de temperatura del Noroeste Argentino.** Meteorológica, v. 22, n1, p3-34, CAM, Bs.As., 1997.

• VILLALBA, R.; BONINSEGNA, J.A.; HOLMES, R.L.; **Desarrollo de cronologías en el Noroeste Argentino.** GEOACTA, v.13, n1, p131-138, 1985.

• VILLALBA, R.; GRAU, H.R.; BONINSEGNA, J.A.; RIPALTA, A. **Intensificación de la circulación atmosférica meridional en la región subtropical de América del Sur inferida a partir de registros dendroclimatológicos.**

Bulletin Institute Francais Détudes Andines, v.27, n3, p565-579, 1998 a.

• VILLALBA, R.; GRAU, H.R.; BONINSEGNA, J.A.; JACOBY, G.C.; RIPALTA, A. **Tree-ring evidence for long-term precipitation changes in subtropical South America.** International Journal of Climatology, v.18, p1463-1478, 1998 b.