



RESPUESTA LACUSTRE A LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA EN LOS VALLES TRANSVERSALES (LA PAMPA, ARGENTINA)

Félix Ignacio Contreras¹

Valeria Soledad Duval²

(Manuscrito recibido el 21 de octubre de 2020, en versión final 26 de mayo de 2021)

Para citar este documento

Contreras, F.I. & V. S. Duval. (2021). Dinámica morfométrica de las lagunas de los valles transversales de la provincia de La Pampa como respuesta a eventos extremos de inundación y sequía *Boletín geográfico*, 43 (1), 13-31.

Resumen

Las lagunas del valle transversal de la provincia de La Pampa se caracterizan por ser cuerpos de agua someros y de carácter permanente o temporario, que presentan diferentes respuestas frente a eventos de inundación y sequía. El objetivo del trabajo es conocer la respuesta de este sistema lagunar frente a estos eventos extremos para lograr su alerta temprana. Es por ello que se realizó un análisis de la variabilidad pluviométrica en el cual se utilizó el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI, en inglés) aplicado en varias localidades del área de estudio con datos pluviométricos del período 1960-2017. Se hizo además un estudio de las variaciones morfométricas de las lagunas y charcas temporales. Para ello, se procesaron y analizaron imágenes satelitales Landsat 5 TM path/row 228/086 que también fueron utilizadas para calcular los parámetros morfométricos definidos por Hutchinson (1957). Como resultado, se pueden mencionar que este sistema lagunar se caracteriza por la heterogeneidad en las respuestas morfométricas de sus superficies ocupadas con agua durante los eventos extremos de inundación y sequía. Por otra parte, al norte y este del área de los valles transversales existen períodos más húmedos y más extremos mientras que hacia el sur

¹ Centro de Ecología Aplicada del Litoral (CONICET – UNNE). Fac. de Cs Exactas y Nat. y Agrimensura (UNNE). R. Prov.5 km 2,5 (3400) Corrientes. e-mail: figcontreras@hotmail.com

² Departamento de Geografía y Turismo, Universidad Nacional del Sur. 12 de octubre 1098 (8000), Bahía Blanca, Argentina. CONICET. E-mail: valeria.duval@uns.edu.ar

se presentan mayores períodos de sequía. La superficie cubierta con agua en eventos extremos de inundación cuadruplica la misma respecto en eventos extremos de sequía. Las respuestas morfométricas poseen una dirección SO-NE en sequía, mientras que en eventos de inundación es a la inversa NE a SO. Por lo tanto, el seguimiento de las variaciones morfométricas de las charcas temporales constituiría una herramienta fundamental en la gestión de alerta temprana contra las inundaciones y sequías regionales.

Palabras clave: Morfométrica de lagunas, Eventos climáticos extremos, Valles transversales, La Pampa.

SHALLOW LAKES RESPONSE TO CLIMATE VARIABILITY IN TRANSVERSAL VALLEYS (LA PAMPA, ARGENTINA)

Abstract

Shallow lakes present different responses to flooding and drought events. This paper presents an analysis of rainfall variability was carried out using the Standardized Precipitation Index (SPI) applied to several locations in the study area with rainfall data from 1960-2017 to understand the response of this lagoon system to extreme events to enhance early warning. The morphometric variations of the shallow lakes and temporary ponds were also analyzed using, Landsat 5 TM path / row 228/086 satellite images following by Hutchinson (1957). The results indicates that the shallow lake system is characterized by the heterogeneity in the morphometric responses of water surfaces during extreme events of flooding and drought. On the other hand, in the northern and eastern areas of transversal valleys there were wetter and more extreme periods, but southern zones presented longer periods of drought. The total surface covered with water in extreme flood events was four times the extreme drought events area. The morphometric responses have a SW-NE direction in drought, while in flood events reverses to NE - SW. Therefore, monitoring morphometric variations of temporary pools would constitute a fundamental tool in the management of early warning advice in regional floods and droughts situations.

Keywords: Lagoons morphometric, Extreme climatic events, Transversal valleys, La Pampa

Introducción

Los conocimientos acerca de la distribución y la fluctuación en los niveles del agua son relevantes para la planificación de las actividades económicas y el desarrollo urbano. Por otra parte, el uso del suelo, las actividades económicas, el crecimiento espacial de las ciudades, entre otros factores, generan cambios en la morfometría e hidrología de las lagunas. En este sentido, cuanto más se conoce acerca de los aspectos físicos – naturales del proceso que desencadena un determinado riesgo, mejor se lo

podrá interpretar y obrar en consecuencia para evitar sus impactos negativos y de esa manera reducir la potencialidad del fenómeno natural (Natenzon, 2007).

Ante escenarios de cambio global que muestran una variabilidad en el número y en los niveles de agua de lagos y lagunas, ha crecido el interés en conocer los patrones de dicha variabilidad a corto, mediano y largo plazo. Existen numerosos trabajos en los que se intenta determinar, mediante casos locales y regionales, la influencia de los parámetros climáticos sobre la dinámica de los cuerpos de agua superficiales (Coops et al., 2003; Torremorel et al., 2007; Rosenzweig et al., 2007; Wantzen et al., 2008; Hofmann et al., 2008; Satya Panigrahi et al., 2009). Éstos abordan el problema desde diversos puntos de vista tales como la variabilidad de nutrientes y composición de la biomasa algal, turbidez y transparencia de las aguas, los efectos ecológicos de las fluctuaciones del nivel del agua en los lagos, así como también la variabilidad en la composición del zooplancton.

Teniendo en cuenta que a nivel mundial existen más de 170 millones de lagos mayores de una hectárea, se ha establecido que los mismos funcionan como centinelas del cambio y la variabilidad climática debido a su rápida reacción ante cualquier evento atmosférico (Adrian et al., 2009; Williamson et al., 2009). La gran extensión de la República Argentina y su variación latitudinal y altitudinal determinan la existencia de una gran diversidad y riqueza de ambientes acuáticos. Sin embargo, la distribución no es regular en todas las regiones. En el noreste del país hay una gran abundancia de cuerpos de agua mientras que, en zonas áridas y semiáridas como la Puna, el agua suele ser un factor limitante para el desarrollo de la vida y las actividades humanas (Canevari et al., 1999). Según Contreras y Paira (2016), sólo en la región de lomadas arenosas de la provincia de Corrientes, existe un total de 38.926 lagunas. En el caso de la provincia de Buenos Aires, según Dangavs (2005) se pueden contabilizar más de 300.000 cuerpos de agua, aunque estudios más recientes (Geraldí et al., 2011) presentan esos valores entre 200.000 y 300.000 dependiendo de las condiciones de sequía y humedad. Las más numerosas son aquellas cuya superficie oscila entre 0,05 y 10 ha, en un número aproximado de 146.000. Las más trascendentes y conocidas son las lagunas mayores a 10 ha, cuyo número alcanza a 10.500. La lista se completa con unas 200.000 microcubetas, cuya superficie se encuentra entre 0,01 y 0,05 ha y un número indeterminable de charcas con superficies menores a 0,01 ha. Se diferencia de las de la provincia de Corrientes donde solo 3.664 superan las 10 ha, lo que implica que el restante 91% de las lagunas se encuentran por debajo de ese valor. Al igual que en la provincia de Buenos Aires, existe un predominio absoluto de microcubetas con un total de 31.958 que representarían el 82% de las lagunas de la región (Contreras y Contreras, 2017).

La fluctuación en los niveles de un lago o laguna está en función de su balance hidrológico para establecer algunos cambios abruptos en grandes lagos (Gronewold et al., 2016). Algunas de ellas son más frecuentes en reservorios y lagos localizados en regiones donde los eventos de precipitaciones son estacionales y cuyo régimen es irregular (Geraldí y Boavida, 2005). Los eventos extremos y su influencia sobre el nivel de agua de los lagos se estudiaron nivel mundial (Hofmann et al., 2008). A la vez que son considerados consecuencias significativas del cambio climático (Lehner

et al., 2006; Adrian et al., 2009). Por tratarse de cuerpos de agua muy someros, las lagunas del área de estudio responden rápidamente a fenómenos meteorológicos locales, variaciones interanuales, etc. como se propone en Contreras y Paira (2016). Sin embargo, en la actualidad no se conocen los tiempos de respuestas, tanto morfométricas como hidrológicas de estas lagunas.

En reservorios localizados en regiones donde los eventos de precipitación son estacionales y presentan un régimen irregular las fluctuaciones son más frecuentes. Las variaciones en los niveles del agua a distintas escalas temporales y en relación a sus impactos ecológicos fueron estudiadas en el lago Constance (Alemania) por Hofmann et al. (2008). Teniendo en cuenta las rápidas respuestas de las lagunas, el estudio y dinámicas naturales de estos cuerpos de agua son fundamentales para reducir al mínimo los posibles riesgos de anegamientos que deja expuesta a la población. Esto se debe analizar especialmente en la ocupación de nuevos espacios en los crecimientos urbanos de la región, así como en los potenciales usos sustentables del recurso, principalmente durante eventos de sequía.

Para Contreras (2015), un mal uso del recurso hídrico o bien el desconocimiento de sus variaciones extremas contribuye a la pérdida del paisaje natural. Los conflictos relacionados con el agua indudablemente son conflictos socio-ambientales que exigen, según López Mera et al. (2015), la comprensión de la caracterización de los recursos hídricos, de las condiciones que impone la dinámica del ciclo hidrológico sobre la organización social en torno al agua, a sus formas de extracción (organización y tecnología), así como las escalas de tiempo (ciclos anuales o siglos) y espacio (cuencas o regiones hidrológicas, subterráneas o superficiales) y demás recursos y grupos sociales vinculados por el agua en movimiento. A su vez, en Contreras et al. (2014) se concluye que esas variaciones, tanto morfológicas como morfométricas, son las transiciones propias de la dinámica geomorfológica de la región, principalmente si se trata de un área con procesos activos y susceptible a cambios en cortos períodos de tiempo.

Este trabajo pretende conocer cómo responde el sistema de lagunas de los valles transversales de la provincia de La Pampa ante la variabilidad en las precipitaciones, con el fin de establecerlas como un elemento del paisaje clave en la gestión de la alerta temprana contra los riesgos de inundación y sequía.

Metodología

Área de estudio

Los valles transversales de La Pampa se localizan en el centro este de la provincia de La Pampa. Su clima es templado de transición con una temperatura media anual de 15 °C y sus precipitaciones disminuyen de noreste a suroeste. En el noreste de los valles, el clima es más bien subhúmedo seco, mientras que en el sudoeste es semiárido. La precipitación media anual en la región varía de 450 a 600 mm (Berón et al., 2015). Los suelos son evolucionados con diferenciación de horizontes y fitogeográficamente (Cabrera, 1976) el área constituye un ecotono entre el pastizal pampeano (Distrito Pampeano Occidental en la provincia fitogeográfica de la Pampa)

y el bosque de caldén (Distrito del caldén en la provincia fitogeográfica del Espinal). Para el estudio de la variación pluviométrica de esta región se consideraron las localidades de Guatraché, Alpachiri, Doblas y Colonia Santa María (Figura 1).

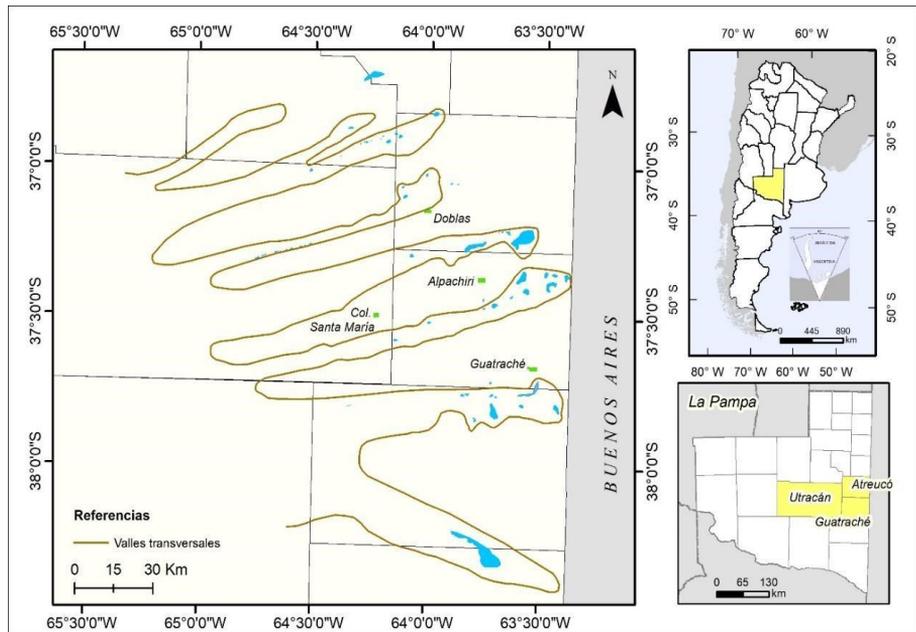


Figura 1. Localización de los valles transversales en La Pampa, ubicación en la provincia y en Argentina.

El centro-este de la Pampa está inserto en el Bloque central, área que fue deformada y ascendida durante la orogenia andina en el Mioceno (Lorenzo, 2012). En esta zona se desarrolla la Formación Cerro Azul, de gran extensión en toda la provincia, conformada por sedimentitas continentales del Plioceno que afloran en forma discontinua (Visconti et al., 2010). Esta unidad está compuesta por limos arenosos y areniscas limosas. Parte de este material proviene de las cuencas de Quehué, Macachín y Cuenca del Colorado que fue depositado sobre el basamento cristalino. En algunos sectores de la formación, los sedimentos antes mencionados fueron reemplazados por la presencia de tosca que tiene una profundidad de hasta dos metros (Visconti et al., 2010).

Sobre la Formación Cerro Azul se desarrolla la unidad geomorfológica de los valles transversales o sistemas de depresiones transversales. Estos poseen una forma de abanico con orientación OSO-ENE en el este de la provincia y tienen una longitud de alrededor de 100 a 150 km y un ancho de entre 5 y 15 km (Lorenzo et al., 2013). El origen de estos valles tiene diversas hipótesis, entre ellas el erosivo y el tectónico

(Visconti et al., 2010). En el interior de los valles es frecuente la presencia de cadenas de médanos que son depósitos eólicos de arena fina y costra calcárea o tosca. Además, se presentan lagunas y lagos permanentes o temporarios. En los sectores más deprimidos de los valles transversales se forman lagunas, salinas o salitrales, que son temporales o permanentes. Estos presentan características similares que se diferencian de otros cuerpos de agua que no forman parte de esta unidad geomorfológica ubicados a pocos kilómetros. Las lagunas localizadas en el oeste bonaerense forman parte de la extensa llanura pampeana caracterizada por una escasa pendiente. Estas son producto de la acción fluvial en un área de suelos drenados. Son paleocanales que se caracterizan por márgenes uniformes y bien definidos. En su mayoría son salinas que se activan durante los períodos húmedos (Geraldí et al., 2011).

Análisis de la variabilidad pluviométrica

Para conocer la dinámica hidrográfica de las lagunas pertenecientes a los valles transversales se realizó una búsqueda de datos históricos de precipitación de lugares cercanos a estas lagunas. Se seleccionaron las estaciones meteorológicas de Guatraché, Colonia Santa María, Doblas y Alpachiri. Los datos de estos sitios pertenecen al período 1960 – 2011 y fueron extraídos de la Administración Provincial del Agua de la provincia de La Pampa. A su vez, fueron complementados hasta el año 2017 con los registros pluviales de la Policía de la provincia de La Pampa.

Se aplicó el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) creado por McKee et al. (1993). Este índice permitió identificar los períodos húmedos y secos de las ciudades analizadas sobre la base de datos de las precipitaciones. Los valores normales del índice poseen un rango de $-0,99$ a $0,99$ siendo los valores positivos los que indican eventos de exceso mientras que los valores negativos muestran eventos de sequía.

Estos valores pueden ser utilizados con distintas escalas temporales, siendo el SPI 1 el que muestra un análisis mensual y el SPI-12 para análisis anuales. Para el cálculo de este índice se utilizó el programa *SPI Generator del National Drought Mitigation Center* (NDMC, 2020) de la Universidad de Nebraska.

Índice	Categoría
2,0 o más	Extremadamente húmedo
1,5 a 1,99	Muy húmedo
1,0 a 1,49	Moderadamente húmedo
-0,99 a 0,99	Normal o aproximadamente normal
-1,0 a -1,49	Moderadamente seco
-1,5 a -1,99	Severamente seco
-2 y menos	Extremadamente seco

Tabla 1. Valores posibles de SPI - SPEI y categorías de la severidad del evento extremos de inundación y/o sequía.

Esta aplicación permite integrar los datos pluviométricos de las estaciones meteorológicas en diferentes escalas de tiempo (semanal, mensual). Como resultado se obtiene el valor de IPE, su frecuencia y duración de los períodos de sequía. Los resultados obtenidos serán clasificados según su severidad teniendo en cuenta la Tabla 1. El gráfico del IPE-12 se realizó para el período 1960-2017.

Análisis del estado morfométrico de las lagunas

Una vez que se establecieron los períodos húmedos, normales y secos, se realizó un estudio de las variaciones morfométricas de las lagunas y charcas temporales para analizar significativa variabilidad morfométrica del sistema lagunar del área de estudio. Para ello, se analizaron imágenes satelitales Landsat 5 TM path/row 228/086 (Tabla 2). Las mismas se descargaron del sitio del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, www.glovis.usgs.gov).

Satélite	Fecha	Tipo de evento
Landsat 5 TM	09/2004	Lluvioso
	12/2004	Lluvioso
	05/2005	Seco
	11/2005	Normal
	12/2006	Normal
	03/2007	Lluvioso
	11/2009	Seco
	04/2010	Normal
	10/2010	Seco

Tabla 2. Imágenes satelitales LANDSAT 5 TM utilizadas para realizar el análisis morfométrico de las lagunas periurbanas (Período 2003-2010).

Inicialmente, las imágenes fueron procesadas digitalmente. Esto se realizó aplicando una clasificación no supervisada del tipo *Interactive Self-Organizing Data Analysis Technique (Algorithm)* (ISODATA). Este método diferenció a los cuerpos de agua de la superficie terrestre según su característica radiativa. Para la delimitación de la laguna, se empleó la metodología empleada en Contreras et al. (2020) donde se presentaron terrenos húmedos y agua, ambos con baja reflectividad, utilizando la técnica de Masking de ENVI 4.3. La misma se realizó indicando el rango de valores de los píxeles que correspondieron a la clase agua, dejando fuera los de terrenos húmedos. Esto permitió discriminar la cobertura del agua de los terrenos húmedos. Una vez elaborada la máscara se aplicó sobre la imagen. Las imágenes corresponden al período 2003 – 2010, ya que en el mismo se pudieron evidenciar situaciones extremas. Posteriormente, los resultados de las clasificaciones fueron exportados en

formato vectorial para ser analizados en el Sistema de Información Geográfica ArcGIS 10.1. Una vez que se procesaron las imágenes satelitales, se realizó el cálculo de los parámetros morfométricos definidos por Hutchinson (1957). Los parámetros utilizados fueron los siguientes:

a. Área (A). Extensión en has del cuerpo de agua en los distintos eventos pluviométricos.

b. Perímetro (P). Su cálculo fue necesario para obtener el índice de desarrollo de costa.

c. Desarrollo de línea de costa (D_L). El mismo permite definir las formas de las lagunas según Hutchinson (1957), el cual fue readaptado para el paisaje estudiado por Contreras y Contreras (2017) n: Circular (1,00 - 1,14), Subcircular (1,15 - 1,29), Triangular (1,3 - 1,99), Irregulares simples (2,00 - 2,99), Dendrítica (3,00 - 3,99) e Irregulares complejas superiores a 4. Esta nueva clasificación se realizó con base en la cantidad y grado de conexión entre lagunas.

d. Densidad Lacustre. Se define como el área ocupada por lagunas de una región, en relación a la superficie del paisaje o unidad de análisis total y expresada como un porcentaje (Contreras et al., 2021).

Resultados y discusión

Recurrencia de eventos extremos y variabilidad pluviométrica

La localidad de Guatraché posee una precipitación media anual de 646 mm. Durante el período de análisis existieron varias fluctuaciones, siendo los años 1976, 1984, 1985, 1991 y 2001 con precipitaciones que superaban los 1000 mm anuales. Por otra parte, en los años 1962, 2005 y 2009 los valores fueron inferiores a 400 mm. Con valores muy cercanos a los 400 mm se reconocen los años 1961, 1971, 2006 y 2008. La localidad de Colonia Santa María posee una precipitación media anual de 645,5 mm. Durante el período de análisis las precipitaciones superiores a 1000 mm se registraron en los años 1985, 1992, 1999, 2001 y 2004. Otros años significativos por su cantidad de precipitación son 1968 y 1976. Por otra parte, los años con precipitaciones inferiores a 400 mm se registraron en los años 1962, 1965, 1971, 1981, 2009, 2015 y 2019. En el caso de Alpachiri, su precipitación media es de 694 mm. Los años con precipitaciones superiores a 1000 mm fueron 1976, 1984, 1985, 1991, 1992, 1999 y 2001. Los años con precipitación menor a 400 mm son 1962, 1971, 1980, 2009, 2013 y 2018. La localidad de Doblás presenta un valor medio de 735,8 mm para el período seleccionado. En los años 1984, 1985, 1992 y 1996, 1999 y 2001 las precipitaciones superaron los 1000 mm mientras que, en los años 1962, 1971, 2009 y 2019, los valores fueron inferiores a 400 mm.

Considerando los resultados del SPI-12 de Guatraché (Figura 2 a) durante período 1960-2017 existen ciclos húmedos y períodos. Entre los primeros se destacan 1980 como extremadamente húmedo, 1977 y 1991 como años muy húmedo y 1977, 1985, 1991, 2001 y 2002 como moderadamente húmedos. En cuanto al período seco, se observan que los años 1962, 1971 y 2009 presentan valores de sequía extrema. Con

valores de sequía severa se reconocen 1961, 1971, 2006 y 2009. Los años con una sequía moderada son 1961, 1971, 2005, 2006 y 2008. Para el caso de Colonia Santa María (Figura 2 b), el año que muestra un período muy húmedo es el 2000 y los años moderadamente húmedos son 1968, 1976, 1985, 1993, 1999, 2001 y 2002. No posee períodos extremadamente húmedos. En cuanto al período de sequía se identifica como extremadamente seco el año 2009, como severamente seco 1970 y moderadamente seco 1962, 1964, 2008, 2015 y 2019.

Alpachiri posee dos años extremadamente húmedos dentro del período, ellos son 1997 y 1998 (Figura 2 c). Luego otros años muy húmedos como 1986, 1996 y 1999. Los años moderadamente húmedos son 1984 y 1985. No se observaron años con sequía extremas o severas. Los años con valores de sequía moderada son 1962, 1971, 1980 y 2018. Doblas cuenta con años extremadamente húmedos como 1997, 2000 y 2007 (Figura 2 d) y moderadamente húmedos como 1993, 1999 y 2006. En algunos casos el registro se presenta en el año posterior al año húmedo o seco. No se registraron años valores de extrema o severa sequía, los años con moderada sequía son 1962 y 1971.

En general, los períodos de sequía y de humedad coinciden en las localidades seleccionadas, con la diferencia que en algunas de ellas los valores son más extremos. Esto se debe a su localización, las que están ubicadas más hacia el norte y este de la provincia como Alpachiri y Doblas poseen períodos más húmedos, y si bien las sequías no son tan extremas, sí poseen mayor duración en el tiempo. Mientras hacia el sur, Guatraché y Colonia Santa María presentan mayores períodos de sequía, pero los eventos de inundación no son tan extremos.

La frecuencia de las categorías de intensidad del SPI-12 se muestra en la Tabla 3. Para ello se utilizaron los valores mensuales del período. Se observa que la mayor cantidad se encuentra en la situación normal o aproximadamente normal. En el caso de Guatraché, tiende a tener mayor frecuencia en la situación de sequía, principalmente moderada. Sin embargo, la frecuencia de los periodos secos y húmedos en Santa María son similares, pero las sequías son más extremas que en Guatraché. Esto se debe a se localiza más al suroeste que Guatraché. Las localidades de Alpachiri y Doblas presentan una mayor frecuencia en las situaciones de humedad, principalmente moderada mientras que no poseen valores en las categorías de extremadamente seco. Esto se debe a que se ubican más al norte de las localidades previamente analizadas.

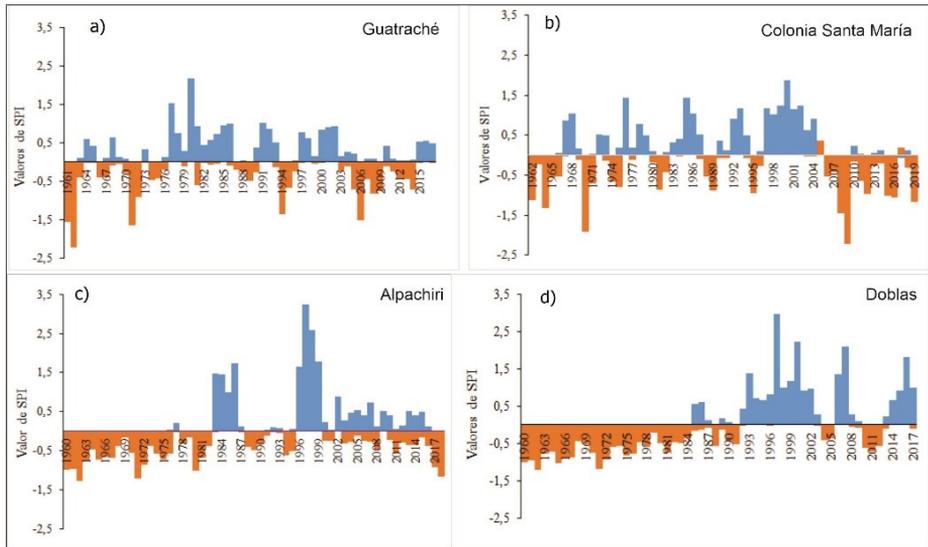


Figura 2. Valores de SPI-12 de las localidades seleccionadas (1960-2017). a) Guatraché, b) Colonia Santa María, c) Alpachiri y d) Doblas.

Categorías	Guatraché	Colonia Santa María	Alpachiri	Doblas
Extremadamente húmedo	12	12	38	36
Muy húmedo	21	36	26	25
Moderadamente húmedo	44	70	55	68
Normal o aproximadamente normal	504	459	516	524
Moderadamente seco	47	74	72	67
Severamente seco	32	29	1	0
Extremadamente seco	25	16	0	0

Tabla 3. Frecuencia de la intensidad del SPI-12 para las cuatro localidades.

Seguimiento de las variaciones morfométricas de las lagunas de los valles transversales

El análisis morfométrico permitió detectar cambios significativos durante los eventos extremos de inundación y de sequía en las lagunas de los valles transversales (Tabla 4). En este sentido, durante el mes 12/2004 donde se registran eventos extremos de inundaciones, se han contabilizado un total de 3.926 cubetas las cuales suman una superficie total de 36.671 ha y una densidad lacustre del 4%. En contraparte, durante el mes de noviembre de 2009 se han registro un total de 306 cubetas, con una superficie total de 9.880 ha y una densidad lacustre del 1% (Figura 3). En síntesis, el paisaje cuadruplica la superficie cubierta con agua entre ambos eventos extremos, no obstante, los valores de densidad lacustre son muy bajos a comparación, por ejemplo, con las lagunas de lomadas arenosas de la provincia de Corrientes cuyos valores están entre el 20 y 22% (Contreras y Contreras, 2017). También estos valores son bajos en relación con los ambientes lenticos próximos como las lagunas del centro occidental de la provincia de Buenos Aires, donde en el extremo oeste la densidad lacustre es del 4% durante eventos extremos de sequía, mientras que en inundaciones extremas llegan al 11% (Contreras et al., 2021).

Mes/año	Cantidad Cubierta (N)	Superficie (ha)				Cantidad <1 ha (N)	Densidad Lacustre (%)
		Total	Max	Media	Min		
9/2004	1832	30505	3668	17	<1	1196	3
12/2004	3926	36671	3733	8	<1	2552	4
05/2005	861	22912	3532	27	<1	522	2
11/2005	1103	18162	3349	16	<1	680	2
12/2006	1123	19325	3553	17	<1	773	2
03/2007	1569	26946	3549	17	<1	919	3
11/2009	306	9880	3109	32	<1	183	1
04/2010	1001	18098	3535	18	<1	605	2
10/2010	712	14312	3541	20	<1	443	2

Tabla 4. Variación de la cantidad y superficie de lagunas y charcas temporales de los valles transversales de la provincia de La Pampa. Período 2004 – 2010.

Otro resultado de interés es la rápida respuesta del sistema a las condiciones de variabilidad pluviométrica, incluso interanual. En este sentido, se pueden observar los cambios significativos en cuanto al número de cubetas y a la superficie total con pocos meses de diferencia. Esta situación se encuentra relacionada con el gran número de charcas temporales que existen en el área de estudio, ya que, en todos los años, sin importar el evento extremo que esté presente, las cubetas inferiores a 1 ha representan

entre el 59 y 65%. Que exista una relación directa entre los eventos extremos y la cantidad de cubetas permite determinar que las grandes lagunas poseen una única cubeta. Un ejemplo opuesto lo constituyen las lagunas ubicadas en las lomadas arenosas en la provincia de Corrientes, ya que, en eventos extremos de sequía, si bien en el paisaje existe una reducción de la superficie cubierta con agua, el número de cubetas se incrementa. Esto es debido a que las grandes lagunas de formas complejas lo constituyen un conjunto de 3 y hasta 11 cubetas, que al disminuir el nivel del agua se segmentan, dejando expuestas las lagunas y charcas temporales originales (Contreras y Paira, 2016).

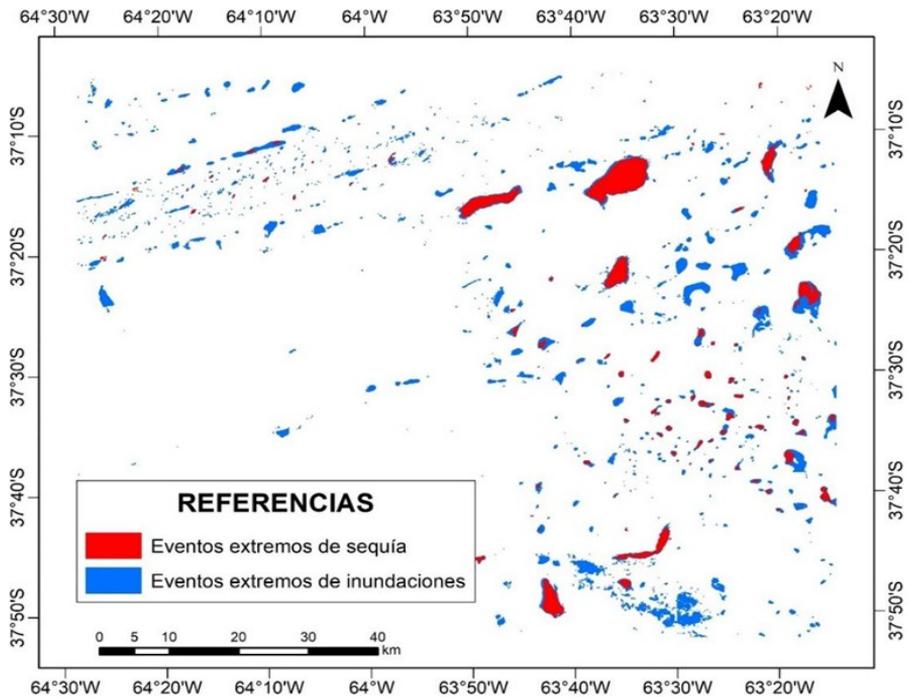


Figura 3. Comparación entre las superficies cubiertas con agua durante los eventos extremos en los valles transversales de La Pampa. Años 2004 (húmedo) y 2009 (seco).

En cuanto a la superficie por cubetas, la totalidad de valores mínimos no logra alcanzar una hectárea, fenómeno que se vincula por la significativa presencia de pequeñas charcas. Sin embargo, la laguna de mayor dimensión posee una elasticidad hídrica del 1,2%, es decir que en períodos de sequía extrema la cobertura con agua se reduce en un 83% comparado con su mayor expansión en eventos extremos de inundación.

Los valores medios poseen una relación indirecta con la superficie total con cobertura de agua. Cuanto mayor es la superficie total, menor es el valor medio del tamaño de las cubetas. Una vez más se observa la importancia de las charcas temporales en el paisaje, ya que lo mencionado anteriormente se vincula con la aparición significativa de las mismas durante eventos de inundación. Al secarse por completo durante eventos de sequía, son las cubetas de mayor envergadura las que regulan la disponibilidad de agua, motivo por el cual los tamaños medios se cuadruplican, en coincidencia con la densidad lacustre.

Mediante la observación de imágenes satelitales se ha detectado que los procesos de desaparición o reducción de la superficie de las lagunas avanza de oeste a este, siendo las ubicadas más hacia el oeste las que comienzan dicho cambio, el cual hasta incluso puede manifestarse con varios meses de anterioridad con respecto al este. Esta dinámica natural se asocia con los desplazamientos hacia el oriente de la isohieta de 650 mm durante eventos extremos de sequía y viceversa (Contreras et al., 2021). Es importante destacar que dicha pluviosidad divide la pampa húmeda de la semiárida (Aliaga et al., 2016), la cual se desplaza hacia el suroeste. Mientras que, por el contrario, los eventos extremos de sequía actúan de modo inverso. En síntesis, las respuestas morfométricas poseen una dirección SO-NE en sequía, mientras que en eventos de inundación es a la inversa NE a SO. Esta información constituye un indicador regional muy significativo como complemento de análisis de procesos climáticos e hidrológicos claves para el ordenamiento territorial y políticas de gestión ambiental, ya que la aparición de charcas temporales en el oriente anticiparía eventos de inundación, mientras que la desaparición de las mismas al occidente permitiría predecir eventos de inundación.

La Figura 4 muestra cómo luego de un período húmedo registrado para finales del año 2004, cinco meses después las lagunas ubicadas más al oeste comienzan a presentar cambios morfométricos en sus respectivas cubetas. Por el contrario, las lagunas en tres meses vuelven lentamente a recuperar los niveles de agua con inundaciones moderadas, desde diciembre del 2006 a marzo de 2007.

Al igual que la morfometría, la morfología de las lagunas presenta cambios durante los distintos eventos extremos, sin embargo, no llegan a ser tan significativos como los anteriores. Es decir, que si bien paisajísticamente hablando, los cambios de las superficies cubiertas con agua pueden cuadruplicarse en situaciones extremas, el predominio de formas entre subcirculares y triangulares siguen siendo las más representativas (Tabla 5).

Sin embargo, si bien es claro el predominio de estas formas simples, es necesario remarcar dos situaciones importantes a la hora de interpretar los resultados. En primer lugar, si bien para distinguir entre formas circulares, triangulares o incluso irregulares simples no se precisan cálculos matemáticos, la dificultad se presenta a la hora de establecer un corte en los puntos de transición entre las distintas formas. Es decir, establecer un límite cuantitativo para discriminar las distintas formas podrá ser práctico a la hora de clasificar, aunque resultaría imposible separar ambas formas en una imagen satelital cuando la diferencia cuantitativa entre ambas es mínima.

Mes/año	Superficie (%)				D _L (%)		
	circular	subcircular	triangular	irregular	Máx	Media	Min
9/2004	7	46	45	2	3,58	1,34	1,02
12/2004	9	48	42	1	4,03	1,32	1,03
05/2005	13	45	40	2	3,24	1,34	1,02
11/2005	9	46	44	2	2,91	1,34	1,03
12/2006	8	53	38	1	2,76	1,32	1,02
03/2007	13	47	38	2	3,12	1,32	1,02
11/2009	14	47	37	2	2,97	1,33	1,04
04/2010	16	47	37	1	2,44	1,30	1,03
10/2010	14	43	41	1	3,44	1,32	1,02

Tabla 5. Seguimiento de los cambios morfológicos y del desarrollo de línea de costa (D_L) de las lagunas de valles transversales de la provincia de La Pampa. Período 2004 – 2010.

En este caso, el límite de D_L entre lagunas subcirculares y triangulares es 1,30, pero, por ejemplo, para el 12/2004, el 27% de 3927 cubetas se encontraban en el rango de 1,29 y 1,30 (24% y 3% respectivamente). Por lo tanto, si bien hay un predominio absoluto de lagunas subcirculares, sus formas se asemejan mucho más a las formas triangulares.

La segunda situación a tener en cuenta es la metodología empleada para detectar los cuerpos de agua. En Contreras y Odriozola (2016), se ha demostrado que delimitar cuerpos de agua con clasificación no supervisadas genera un error a la hora de emplear la fórmula de D_L. Esto es por el hecho de tener de base un ráster, ya que genera formas rectilíneas, lo que incrementa parcialmente estos valores y con lo cual muchas veces determina un predominio de una determinada forma, cuando en realidad debería ser otra. Cuando Contreras y Odriozola (2016) compararon los resultados de la clasificación no supervisada de la obtenida de una digitalización manual, las lagunas de la Lomada Norte en Corrientes presentaron un dominio del 40% para lagunas subcirculares y también triangulares, cuando la realidad demostraba que las lagunas circulares eran las dominantes con un 70%, mientras que las formas mencionadas no superaban el 13 y 12% respectivamente.

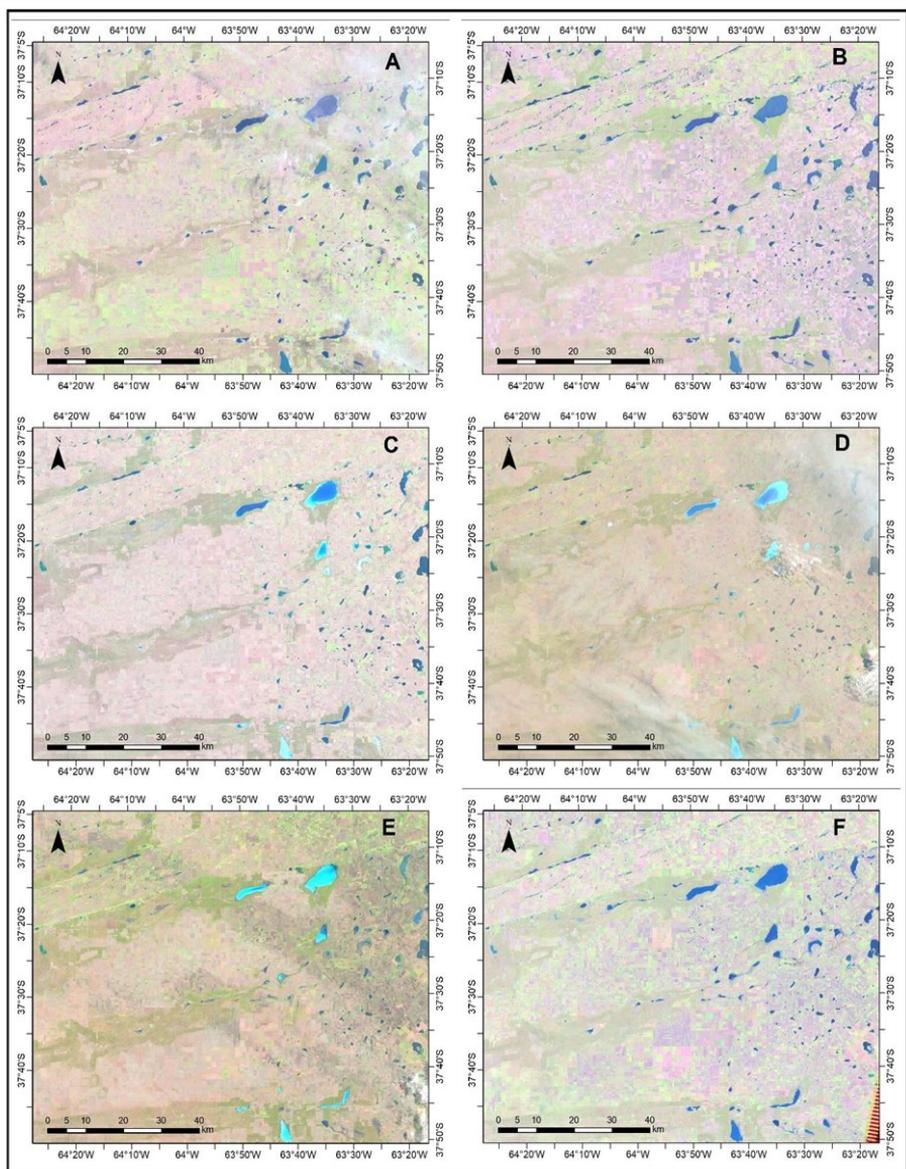


Figura 4. Seguimiento de la distribución de lagunas y charcas temporales de los Valles Transversales (La Pampa). A) 09/2004; B) 12/2004; C) 05/2005; D) 11/2005; E) 12/2006 y F) 03/2007.

No obstante, los resultados han demostrado que este sistema de lagunas posee un mismo dinamismo en cuanto a sus formas como respuesta a la variabilidad climática. Con ello se puede afirmar que es una característica particular de las lagunas y charcas temporales aumentar sus valores de D_L durante eventos de inundación, ya que hay un mayor desarrollo del perímetro por el aumento del nivel de agua y reducirlos durante la sequía como resultado de los procesos de redondeamiento o terrenalización (Paira y Drago, 2006; Contreras y Paira, 2015; Contreras y Paira, 2016; Contreras et. al, 2021).

Conclusiones

El sistema lagunar de los valles transversales de la provincia de La Pampa se caracterizan por su heterogeneidad en las respuestas morfométricas de sus superficies ocupadas con agua durante los eventos extremos de inundación y sequía. Los resultados del SPEI 1 han demostrado que es la estación de invierno quien presenta ambas condiciones extremas, siendo que anualmente, es en esta estación donde se registran las menores precipitaciones. Esta situación permite inferir que durante las sequías las lluvias pueden llegar a ser de ínfimas a nulas mientras que, por el contrario, no precisa que los montos pluviométricos sean extremos para que dichos valores repercutan significativamente en valores extremos de inundación.

El análisis particular mediante el SPI 1 demostró que al norte y este del área de estudio existen períodos húmedos más extremos y si bien las sequías no son tan extremas, sí poseen mayor duración en el tiempo. Mientras que hacia el sur se presentan mayores períodos de sequía, pero los eventos de inundación no son tan extremos.

En cuanto a las respuestas morfométricas de las lagunas y charcas temporales, las diferentes variables analizadas han demostrado que la superficie cubierta con agua en eventos extremos de inundación cuadruplica la misma en eventos extremos de sequía. En este sentido, serían las charcas temporales las que establecen una diferencia significativa entre ambas situaciones.

Las respuestas morfométricas poseen una dirección SO-NE en sequía, mientras que en eventos de inundación es a la inversa NE a SO. Esta información constituye una herramienta muy significativa para el ordenamiento territorial y políticas de gestión ambiental, ya que la aparición de charcas temporales en el oriente anticiparía eventos de inundación, mientras que la desaparición de las mismas al occidente permitiría predecir eventos de sequía. Es decir que realizar un seguimiento del dinamismo natural de las charcas temporales de la región contribuirá con la gestión de alerta temprana de riesgos de inundaciones y sequía, pensando en futuros escenarios vinculados a eventos de cambio climático.

Agradecimientos

Esta investigación fue parcialmente financiada por los proyectos PI 19Q002 de la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional del Nordeste y el

PICT- 2018 – 00636 – DT. También se realizó en el proyecto de investigación Geografía física aplicada al estudio de la interacción sociedad-naturaleza. Problemáticas a diversas escalas témporo-espaciales (24/G067). Es mismo está subsidiado por la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional del Sur.

Bibliografía

- Adrian, R., O'Reilly, C. M., Zagarese, H., Baines, S., Hessen, D., Keller, W., Livingstone, D., Sommaruga, R., Straile, D., Van Donk, E., Weyhenmeyer, G. y Winder, M. (2009). Lakes as sentinels of climate change. *Limnology Oceanography*, 54(6, part 2), 2283-2297.
- Aliaga, V. S., Ferrelli, F., Alberdi Algañaraz, E. D. y Piccolo, M.C. (2016). Distribución y variabilidad de la precipitación en la región Pampeana, Argentina. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 42(1), 261-280.
- Berón, M., Carrera Aizpitarte, M. y Páez, F. (2015). Arqueología en el área de valles transversales (provincia de La Pampa, Argentina). Caracterización y tendencias de los conjuntos arqueológicos. Implicancias sociales en la construcción del paisaje. *Relaciones de la Sociedad Argentina de Antropología*, XL (2), 549-587.
- Cabrera, A. L. (1976). Regiones fitogeográficas argentinas en Kugler WF (Ed.), *Enciclopedia Argentina de agricultura y jardinería*. 2º Ed. Acme. S.A.C.I. Buenos Aires, Tomo II, Fascículo 1, 85 pp.
- Canevari, P., Blanco, D. E., Bucher, E., Castro, G. y Davidson, I. (Eds.). (1999). Los humedales de la Argentina. Clasificación, situación actual, conservación y legislación. *Wetlands International*, 46, 1-208.
- Contreras, F. I. (2015). El impacto ambiental del crecimiento espacial de la ciudad de corrientes sobre lagunas periurbanas. *Boletín Geográfico*, 37, 29- 42.
- Contreras F. I., Ojeda E. A. y Contreras, S. A. (2014). Aplicación de la Línea de Costa en el estudio morfométrico de las lagunas de las lomadas arenosas de Corrientes, Argentina. *Contribuciones Científicas GAEA*, 26, 65-78.
- Contreras, F. I. y Contreras, S. A. (2017). La Incidencia de la Pendiente en la Distribución de las Morfologías de las Lagunas sobre Lomadas Arenosas (Corrientes, Argentina). *Anuario do Instituto de Geociencias*, 40(1),15-25.
- Contreras, F. I. y Paira, A. R. (2015). Comparación morfométrica entre lagunas de la planicie aluvial del río Paraná Medio y la Lomada Norte (Corrientes, Argentina). *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 24 (1), 61-71.
- Contreras, F. I. y Paira, A. R. (2016). Aplicación del “índice de cambio” a las variaciones morfométricas de las lagunas de lomadas arenosas. El caso de Bella Vista (Corrientes, Argentina). *Revista de Geografía*, 21, 31-38.
- Contreras, F. I., Ferrelli, F. y Piccolo, M. C. (2020). Impactos de eventos secos y lluviosos sobre cuerpos de agua periurbanos subtropicales: Aporte al ordenamiento del espacio urbano de Corrientes (Argentina). *Finisterra*, 55(114), 3-22.
- Contreras, F. I., Mavo Mastretta, G. M., Piccolo, M. C. y Perillo, G. M. (2021). Spatio-temporal variability monitoring of the floods in the center-west of the Buenos Aires

- province (Argentina) using remote sensing techniques. The role of sand dunes. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 47 (pre-print).
- Contreras, F. I. y Odriozola, M. P. (2016). Aplicación de Modelos de Elevación Digital para la delimitación de áreas de riesgo por inundaciones. San Luis del Palmar, Corrientes, Rca. Argentina. *Contribuciones Científicas GAEA*, 28, 83-94.
- Coops, H., Beklioglu, M. y Crisman, T. (2003). The role of water-level fluctuations in shallow lake ecosystems – workshop conclusions. *Hydrobiologia*, 506, 23-27.
- Dangavs, N. (2005). Los ambientes acuáticos de la provincia de Buenos Aires en Barrio, R. E., Etcheverry, R. O., Caballé, M. F. y Llambías, E. (Eds.), *Geología y recursos minerales de la provincia de Buenos Aires* (Cap. XIII, 219-235).
- Geraldes, A. M. y Boavida, M. J. L. (2005). Seasonal water level fluctuations: implications for reservoir limnology and management. *Lakes & Reservoirs: Research and Management*, 10(1), 59-69.
- Geraldi, A., Piccolo, C. y Perillo, G. (2011). Lagunas bonaerenses en el paisaje pampeano. *Ciencia hoy*, 21(123), 9-14.
- Gronewold, A. D., Bruxer, J., Durnford, D., Smith, J. P., Clites, A. H., Seglenieks, F., Gian, S., Hunter, T. S. y Fortin, F. (2016). Hydrological drivers of record-setting water level rise on Earth's largest lake system. *Water Resources Research*, 52(5), 4026-4042.
- Hofmann, H., Lorke, A. y Peeters, F. (2008). Temporal scales of water level fluctuations in lakes and their ecological implications. *Hydrobiologia*, 613, 85-96.
- Hutchinson, G. E. (1957). *A Treatise on Limnology. I. Geography, Physics and Chemistry*. John Wiley y Sons.
- Lehner, B., Döll, P., Alcamo, J., Henrichs, T. y Kaspar, F. (2006). Estimating the impact of global change on flood and drought risks in Europe: a continental, integrated analysis. *Climatic Change*, 75, 273-299.
- López Mera, R., López Ramírez, E. y Millán Malo, G. C. (2015). Proyecto "observatorio de conflictos por el agua en México". Secretaría de Ambiente y Recursos Naturales.
- Lorenzo, F. R. (2012). *Estratigrafía y sedimentología de los depósitos pelíticos de la formación cerro azul (mioceno tardío) aflorantes en los valles transversales de La Pampa*. Tesis de grado. Universidad Nacional de La Pampa, Santa Rosa.
- Lorenzo, F., Mehl, A. y Zárate, M. (2013). Sedimentología y estratigrafía de depósitos del Mioceno tardío de los valles transversales de la Pampa. *Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis*, 20, 67-84.
- McKee, T. B., Doesken, N. J. y Kliest, J. (17-22 enero de 1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: *Proceedings of the 8th Conference of Applied Climatology*. American Meteorological Society, Boston.
- NDCM (2020). SPI Program. Disponible en: <https://drought.unl.edu/droughtmonitoring/SPI/SPIProgram.aspx>
- Paira, A. y Drago, E. (2006). Genetical, Morphological and Evolutional Relationships of the Floodplain Lakes in the Middle Parana River Hydrosystem. *Zeitschriftfur Geomorphologie* 145, 207-228.

- Natenzon, C. E. (2007). Riesgo, prevención, mitigación y adaptación. Aportes al eje temático sobre Seguridad Humana. En: E. Tancredi y N. Da Costa Pereira (Coord). *Dimensiones Humanas del Cambio Ambiental en Argentina. Hacia la construcción de una Agenda Científica Ambiental Interinstitucional*. Univ. Nacional de Luján.
- Rosenzweig, C., Major, D. C., Demong, K., Stanton, C., Horton, R. y Stults, M. (2007). Managing climate change risks in New York City's water system: Assessment and adaptation planning. *Mitigation and Adaptation Strategies Global Change*, 12(8), 1391-1409.
- Satya Panigrahi, J., Wikner, R. C., Panigrahy, K., Satapathy, K. y Acharya, B. C. (2009). Variability of nutrients and phytoplankton biomass in a shallow brackish water ecosystem Chilika Lagoon, (India). *Limnology*, 10(2), 73-85.
- Torremorel, A., Bustigorry, J., Escaray, R. y Zagarese, H. (2007). Seasonal dynamics of a large, shallow lake, laguna Chascomús: The role of light limitation and other physical variables. *Limnologica. Ecology and Management of Inland Waters*, 37(1), 100-108.
- Visconti, G., Melchor, R., Montalvo, C. y Umazano, A. y De Elorriaga, E. (2010). Análisis litoestratigráfico de la formación Cerro Azul, (Mioceno Superior en la prov. de La Pampa). *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 67(2), 257-265.
- Wantzen, K. M., Rothaupt, K. O., Mortl, M., Cantonati, M., Toth, L. y Fischer, P. (2008). Ecological effects of water-level fluctuations in lakes: an urgent issue. *Hydrobiologia*, 613, 1-4.
- Williamson, C., Saros, J., Warwick, V. y Smold, J. (2009). Lakes and reservoirs as sentinels, integrators, and regulators of climate change. *Limnology and Oceanography*, 54 (6, part 2), 2273-2282.