

# Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente



**ASAGAI**  
ASOCIACIÓN ARGENTINA  
DE GEOLOGÍA APLICADA  
A LA INGENIERÍA

Córdoba - Argentina



## Cartografía de susceptibilidad hídrica en el delta del río Paraná

### Flooding susceptibility mapping/cartography for Parana river delta

Sepulcri, M.G.<sup>1</sup> ✉ - Flamenco, E.A.<sup>2</sup> - Pizarro, M.J.<sup>3</sup> - Herrera, M.G.<sup>2</sup> - Borus, J.<sup>4</sup> - Giordano L.<sup>4</sup>

Recibido: 18 de marzo de 2015 • Aceptado: 26 de abril de 2015

#### Resumen

*El delta del río Paraná es un ecosistema de alta fragilidad ambiental y susceptible a las inundaciones. La cartografía de susceptibilidad hídrica constituye una herramienta útil para la toma de decisiones en los sectores agropecuario y forestal. Es importante contar con una estimación de la distribución espacial de los derrames, dependiendo esta del pronóstico de caudales en el mediano plazo. De esta manera se permitirá definir el escenario hídrico que puede fluctuar entre muy seco y muy húmedo. Mediante el procesamiento y clasificación de imágenes satelitales del período 1980-2010 se generaron mapas de susceptibilidad hídrica en un tramo del delta Paranaense. Esta metodología fue aplicada para dos períodos pronosticados: abril-septiembre de 2011 y abril-septiembre de 2013 comparando la cartografía hídrica seleccionada de acuerdo al pronóstico con las imágenes de agua observadas. Se muestra la concordancia entre las imágenes seleccionadas y las observadas. El número de píxeles con agua observado estuvo dentro del rango de número de píxeles con agua de la cartografía seleccionada. El empleo de esta información superpuesta con imágenes de Google Earth permitirá al productor agropecuario, de acuerdo a la ubicación geográfica de su área productiva, tener conocimiento del grado de afectación espacial del agua de acuerdo al pronóstico estacional.*

**Palabras clave:** imágenes satelitales, escenarios hídricos, distribución espacial, pronóstico.

#### Abstract

*Paraná River delta is a high environmental fragility and very susceptible to flooding ecosystem. Water susceptibility cartography is a very useful tool for decision making in the agriculture and forestry fields. It's important to have estimations of the spatial distribution of flooding areas, which is strongly dependent on the midterm seasonal flow forecast. Thus, a hydrological scenario that ranges between very low water and very high water could be defined. High resolution satellite images from 1980-2010 period were processed and classified to obtain water susceptibility maps for one portion of*

1. AE Luján, EEA AMBA (Área Metropolitana de Buenos Aires)-INTA. Dr Negri s/n (6700) Luján, Argentina  
✉ sepulcri.maria@inta.gob.ar
2. Instituto de Clima y Agua, CIRN-INTA. Los Reseros y Las Cabañas s/n (1712) Castelar, Argentina
3. Instituto de Suelos, CIRN-INTA. Los Reseros y Las Cabañas s/n (1712) Castelar, Argentina
4. Instituto Nacional del Agua. AU Ezeiza-Cañuelas, Tramo J. Newbery Km 1,620 (1804) Ezeiza, Argentina

*Parana River delta. This methodology was applied for two forecasted periods April-September 2011 and April-September 2013 comparing the selected hydrological cartographies according to flow forecast with observed water masks. Good concordance in pixel number was found between selected and observed water maps. This type of information overlapped with Google Earth images and depending on the geographical location of productive areas would allow field producers knowing the degree of damage by water that a certain area could suffer according to seasonal flow forecast.*

**Keywords: satellite images, hydrological scenario, spatial distribution, forecast.**

## INTRODUCCIÓN

La cuenca del Plata juega un rol relevante en la economía, recursos hídricos y agricultura de la región (Su et al., 2008). El valle aluvial del río Paraná, en sus tramos medio e inferior, con frecuencia es afectado por inundaciones con daños considerables tanto a nivel social como económico y productivo (Anderson et al., 1993; Camilloni, 2005). Para realizar un manejo eficiente de las cuencas hidrológicas es necesario conocer primero la dinámica hídrica de estos sistemas. La descarga, o caudal del río, ha sido siempre la variable más discutida (Berbery y Barros, 2002) y depende de varios factores como la variabilidad climática (precipitación, evapotranspiración), la topografía, el tipo de suelo, el uso del suelo y las actividades del hombre.

Debido a la compleja génesis de esta llanura podemos encontrar, además de los cauces principales, cauces secundarios, temporarios, diferentes tipos de lagunas y albardones que permiten generar ambientes lóticos, lénticos y terrestres que le confieren al valle una gran heterogeneidad ambiental (Iriando, 1972; Francheschi et al., 1979) y edáfica (Passeggi, 2000). El régimen hídrico de estas islas está condicionado por el régimen del río y por el de las precipitaciones locales. El patrón pulsátil de inundación (Neiff, 1996; Aceñolaza et al., 2003) produce impacto sobre las características geomorfológicas y biológicas de las islas, sumándole temporalidad ecológica a la heterogeneidad geomorfológica, lo cual se refleja en la vegetación.

Existen pronósticos estacionales de caudales en el corto y mediano plazo (5-10 días y 6 meses, respectivamente) que ayudan a la toma de decisiones por parte de los productores y funcionarios públicos, como así también a los habitantes de la zona. Es importante tener pronósticos confiables y asimismo es menester brindar información sobre la distribución espacial de las aguas bajo distintos escenarios hidrológicos, los que conforme al pronóstico hidrológico estacional (Flamenco, 1998) pueden clasificarse como de aguas muy altas, altas, normal, bajas y muy bajas. Para llegar a obtener mapas de áreas afectadas por agua se requiere, indefectiblemente, disponer de pronósticos estacionales de caudales en la zona de estudio, a modo de poder evaluar la susceptibilidad hidrológica del área. El concepto de susceptibilidad está referido a la mayor o menor predisposición a que un evento suceda u ocurra sobre determinado espacio geográfico. Las áreas que más rápidamente quedan bajo agua ante la ocurrencia de un evento son las de mayor susceptibilidad hídrica. La susceptibilidad a inundaciones es la probabilidad que una inundación ocurra en un área en base a las condiciones locales del terreno (Soldano, 2009). Por lo tanto, el objetivo de este trabajo fue producir una cartografía de susceptibilidad hídrica para un sector del delta Paranaense utilizando imágenes satelitales de alta resolución y contribuir con información de utilidad para el sector agropecuario y forestal, debido a la importancia de estos sectores en la región. Esta cartografía

constituirá una herramienta para el productor agropecuario, que será de fácil acceso. Asimismo contribuirá en la toma de decisiones ante la ocurrencia de eventos importantes como sequía o inundación.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área y periodo de estudio

En la porción inferior de la cuenca del Río Paraná se extiende la Región del Delta, situada entre las latitudes 32° 5' S, al sur de la ciudad de Diamante (Entre Ríos) y 34° 29' S, próxima a la ciudad de Buenos Aires (Figura 1). Con una longitud de aproximadamente 320 km, la superficie cubre una cifra cercana a los 17.500 km<sup>2</sup> (Bonfils, 1962; Canevari et al., 1999). Dentro de la misma se hallan zonas situadas al sur de la provincia de Entre Ríos (Malvárez, 1999) actualmente sujetas a procesos fluviales y áreas anegables sin influencia fluvial.

Varios autores han subdividido a esta región basándose en distintos criterios, como es el caso de Iriando (2004) quien bajo la denominación de "Complejo Litoral" subdividió al área en 10 unidades geomorfológicas. Otro ejemplo es el de Malvárez (1999) quien se basó en el análisis conjunto de patrones de paisaje, régimen hidrológico y tipo de vegetación. Considerando que esta última zonificación es más acorde a los fines de este estudio, en la Figura 1 se encuentran demarcadas las 11 unidades de paisaje resultantes del trabajo mencionado.

El área de estudio definida para este trabajo (Figura 1), abarca la totalidad de algunas unidades de paisaje (B, C1, D, E, G) y fracciones en el caso de otras (A, C2, C3, F, H e I). En general, la mayoría de estas áreas comprenden distintos tipos de bosques, praderas, sabanas de litoral, arbustales, isletas de bosques y lagunas de llanura. Para mayor detalle sobre estas áreas se recomienda la lectura del trabajo mencionado.

La información de caudales mensuales y alturas hidrométricas del río Paraná fue provista por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación. En la etapa inicial de esta investigación se definieron los escenarios hídricos y posteriormente para cada uno de ellos se seleccionaron las fechas posibles a analizar. Para tal fin, se trabajó con la serie histórica de caudales medios mensuales del río Paraná en Corrientes, período 1904/05 - 2008/09, información hidrológica amplia y confiable (serie de caudales medios mensuales de más de 100 años). La estación hidrométrica ubicada en la localidad de Corrientes presenta la mayor historia de aforos líquidos en el río Paraná desde Posadas hasta su desembocadura. Asimismo, uno de los coautores afirma sobre la confiabilidad de estos datos debido a que se ha revisado la curva de descarga de dicha sección en el marco del Proyecto Paraná Medio de Agua y Energía Eléctrica, Sociedad del Estado (AyEE, SE). Por otra parte, dentro del mismo Proyecto se ha evaluado la curva de doble masa o acumulación de volúmenes anuales (período 1905-2002) pertenecientes

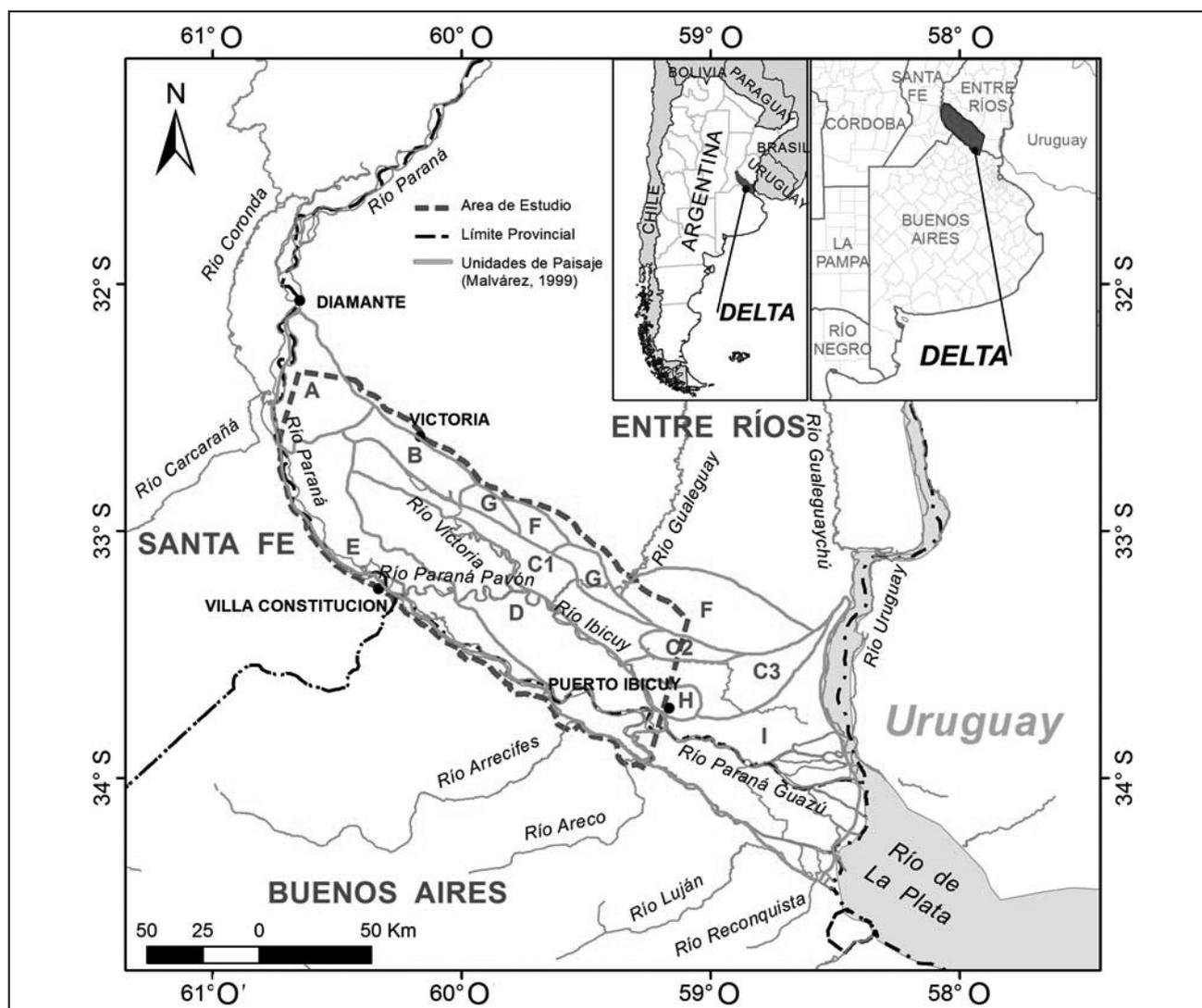


Figura 1. Delta del Río Paraná (Argentina). Delimitación del área de estudio. Unidades de paisaje modificadas a partir de Malvárez, 1999.

a la estación Timbúes, ubicada aguas arriba de Rosario. En este caso se demostró una diferencia negativa de aproximadamente un 10 % con respecto a los datos de Corrientes, lo que convierte a esta serie de datos como poco consistente. Por lo tanto, para la caracterización del régimen hídrico fue conveniente entonces utilizar los datos de caudales anuales provenientes de la estación Corrientes, que asimismo es la única sección donde se han desarrollado los dos modelos estacionales (semestrales) de pronóstico que son el insumo principal para luego proceder a la elección de la cartografía de susceptibilidad hídrica. Del mismo modo, en función del análisis en Corrientes, se identificaron en el puerto de San Pedro (situado en el delta del río Paraná) períodos correspondientes a cada año hidrológico más acotados, considerando en este caso alturas hidrométricas, con el objetivo de ajustar los períodos o fechas para la búsqueda de imágenes satelitales.

Para cada año se calculó el caudal medio del año hidrológico (Setiembre-Agosto) y se aplicaron sobre dicha serie temporal funciones de distribución (Pearson, Log-Pearson y Gumbel). La función de mejor ajuste fue la de Gumbel. Sobre la base de estos resultados, se establecieron los umbrales para la clasificación del régimen hídrico del río Paraná cuyos valores y

categorías se detallan en la Tabla 1. A partir de la caracterización del régimen hídrico se seleccionaron años hidrológicos para cada categoría desde el año 1980, donde se comienza a disponer de imágenes satelitales.

Por otra parte, el año hidrológico se dividió en dos períodos (abril-septiembre y octubre-marzo) en base al régimen de lluvias y la probabilidad de ocurrencia de un evento inundación. En términos generales, durante la temporada de primavera-verano el régimen de lluvias es más importante y en consecuencia las crecidas ocurren frecuentemente durante este período. Durante la temporada otoño-invierno el estado de aguas suele ser de estiaje. No obstante, existe la probabilidad que ocurran situaciones atípicas donde las lluvias se produzcan durante el invierno y como consecuencia ocurran inundaciones, tal como sucedió en los años 1983 y 1992. Otro aspecto importante a mencionar es que debido a que la serie de datos de caudales seleccionada corresponde al puerto de Corrientes y que éste no se halla dentro del área de estudio, se debe tener en cuenta la existencia de un retraso de entre 30 y 60 días entre la ocurrencia de una onda de crecida registrada en dicho puerto y el puerto de Rosario.

**Tabla 1. Régimen hídrico del caudal medio anual [m<sup>3</sup>/s] del río Paraná en Corrientes.**

Probabilidad excedencia (%)	Caudal medio anual (año hidrológico) 1904/05-2008/9	Régimen hídrico
20	20100	Muy húmedo
40	17400	Húmedo
60	15500	Normal
80	13600	Seco
Mediana	16400	
Media	17000	

### Información satelital

Sobre la base de los períodos hidrológicos correspondientes al puerto de San Pedro se seleccionaron las imágenes satelitales para el área de estudio, que en total fueron 56. Las imágenes empleadas para este análisis fueron adquiridas por el sensor Thematic Mapper (TM 5) del satélite Landsat 5 y posterior al año 2013 por el sensor Operational Land Imager (OLI) del satélite Landsat 8. Las mismas fueron provistas por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), la Comisión Nacional de Investigaciones Espaciales (CONAE), el Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) y el U. S. Geological Survey (USGS). La elección de la fuente de imágenes estuvo basada en la resolución espacial y espectral de las mismas, siendo la primera de 30 metros, lo cual permite tener una visualización a nivel de lote. Con respecto a la resolución espectral, estas imágenes están compuestas por 6 bandas que dentro del espectro electromagnético se hallan en el rango del visible (3 bandas), infrarrojo cercano (una banda) e infrarrojo medio (dos bandas). La resolución temporal de estas imágenes es de 16 días. De las pasadas del satélite Landsat se tomó la correspondiente al path/row 226-083, que captura principalmente el tramo medio del delta (desde Villa Constitución hasta el puerto de Ibicuy). Cada path/row cubre una superficie de 185 x 185 km. Del registro total de imágenes disponibles se seleccionaron aquellas que no presentaran nubes o su porcentaje fuera mínimo. Asimismo, hubo fechas para las cuales no se dispuso de imágenes. Las fechas de las imágenes disponibles se detallan en la Tabla 2.

**Tabla 2. Cantidad y fechas de imágenes disponibles para cada subperíodo (Abril-Septiembre); (Octubre-Marzo) y para cada escenario hidrológico.**

Escenario	Fechas de imágenes	
	Abril-Septiembre	Octubre-Marzo
Húmedo	17/04/1992	12/01/2010
	23/08/1992	
	02/04/1998	
	05/06/1998	
	09/09/1998	
Normal	29/05/2007	
	26/05/2003	27/03/1996
	05/04/2005	23/02/2003
Seco		04/03/2005
	02/05/2009	26/01/2000
		10/01/2009

A cada una de las imágenes satelitales se le realizó una corrección geométrica para darles proyección geográfica. En este caso se utilizó Transversal Mercator Faja 5 con Datum WGS84. Por otra parte, se realizó una calibración radiométrica y corrección atmosférica. En cuanto a ésta última, se utilizó la técnica "Dark Object Subtraction" (DOS), la cual asigna al valor mínimo de cada banda la propiedad de cuerpo negro igualando su reflectividad a cero. Posteriormente, este valor se resta a cada píxel de cada banda. Para realizar este procedimiento se utilizó el software ENVI® y de éste la función Dark Subtract. A continuación, para cada una de las imágenes coincidentes con las fechas seleccionadas se calcularon índices normalizados de vegetación (NSVI), suelo (NDSI) y agua (NDWI) utilizando información espectral en las longitudes de onda del visible (VIS): rojo (R) y verde (V), infrarrojo cercano (IR) e infrarrojo medio (SWIR) (Tabla 3). A partir del cálculo de estos índices se realizó un compuesto de tres bandas en falso color compuesto, filtrando por el rojo al NDSI, por el verde al NDVI y finalmente por el azul al NDWI, según lo propuesto por Takeuchi y Yasuoka (2005). Estos autores denominaron al compuesto como NDXI, obteniéndose como resultado un mapa temático donde las superficies con agua aparecen con predominio de color azul, la vegetación con predominio de color verde, mientras que el suelo desnudo, la vegetación seca y las áreas urbanas oscilan entre el rojo y amarillo generando tonalidades anaranjadas. Esta misma metodología fue aplicada por Rodríguez *et al.*, 2009 para evaluar coberturas de suelo, por Rodríguez *et al.*, 2010 para evaluar zonas inundadas en la Pampa húmeda y por Edrosa *et al.*, 2009 para generar una cartografía de susceptibilidad a inundaciones en las islas del delta superior y medio del río Paraná. Cada imagen resultante se obtuvo bajo dos formatos: byte y punto flotante. La primera para ser posteriormente clasificada y la segunda para ayudar en la separación de clases a partir de la interpretación de los histogramas. Cada imagen en formato byte fue clasificada según la metodología ISODATA estableciendo un criterio de 30 clases como máximo. Los algoritmos de clasificación permiten agrupar píxeles en base a sus similitudes espectrales, las cuales permiten encontrar un correlato entre las características de la región y alguno de los elementos de paisaje a identificar.

**Tabla 3. Fórmulas y bandas espectrales correspondientes a las imágenes Landsat 5 y 8 utilizadas para el cálculo de los índices de vegetación (NDVI), suelo (NDSI) y agua (NDWI).**

Índice	Fórmula	Bandas Landsat 5	Bandas Landsat 8
NDVI	$(IR-R)/(IR+R)$	3 (VIS,R); 4 (IR)	4 (VIS,R); 5 (IR)
NDSI	$(SWIR-IR)/(SWIR+IR)$	5 (SWIR); 4 (IR)	6 (SWIR); 5 (IR)
NDWI	$(VIS-SWIR)/(VIS+SWIR)$	2 (VIS,V); 7 (SWIR)	3 (VIS,V); 7 (SWIR)

Los algoritmos no supervisados permiten encontrar clases sin conocimiento previo de su existencia. Una vez corrida la clasificación no supervisada, se procedió a clasificar cada píxel de cada imagen en dos posibles categorías: agua y no agua, asignando valores de 1 y 0 respectivamente, basándose en los valores de los índices (NDVI, NDSI y NDWI) y en sus distribuciones de frecuencias.

Posteriormente, cada una de las imágenes se transformó a máscara de agua con el objetivo de visualizar independientemente cada escenario hídrico en un sistema de información geográfico (SIG). Por otra parte, con el conjunto de imágenes procesadas se estableció la frecuencia con que cada píxel estuvo ocupado por agua en todos los períodos evaluados (seco,

normal y húmedo). Para ello se agruparon las imágenes según el escenario hídrico, siendo un total de 7 imágenes para el período húmedo, 5 para el normal y 3 para el seco. A continuación, se sumaron las tres imágenes obteniendo la frecuencia (de 0 a 1) con que cada píxel estuvo ocupado por agua. Los píxeles con una frecuencia cercana a 1 indican que esas zonas, independientemente del escenario, estuvieron ocupadas por agua. Por lo tanto corresponden a cursos de agua permanentes. A continuación, se establecieron rangos para clasificar las frecuencias con que cada píxel estuvo ocupado por agua en muy seco, seco, normal, húmedo y muy húmedo.

## RESULTADOS

A partir de la clasificación no supervisada de las imágenes se determinaron las clases agua y no agua y se asignaron valores de 1 y 0, respectivamente, en base a los criterios citados a continuación. En general, para la clase agua el valor medio de NDWI es de 0,22. Sin embargo, los cursos de agua permanentes presentan valores de este índice que oscilan entre 0,6 y 0,8 (Rodríguez *et al.*, 2009). En general, los valores de NDSI

aportan muy poco a la diferenciación de clases ya que son generalmente negativos y próximos a cero. El índice de vegetación (NDVI) presenta un valor medio de 0,4 para la vegetación, mientras que para la clase agua suelen ser negativos o muy bajos próximos a cero. En este caso suelen presentar un correlato negativo con el NDWI. Por lo tanto se puede considerar que aquellas clases cuyas distribuciones de frecuencia de NDWI caracterizadas por valores en su mayoría positivos y distribuciones de NDVI fuertemente negativas son agua. Sin embargo, en el caso de las zonas ribereñas los valores de NDVI aumentan como consecuencia de la vegetación presente. En este caso, si la distribución de valores de NDWI muestra valores positivos en un 60% ó más sumado a valores de NDVI positivos y bajos esta clase es considerada como agua.

Como resultado se obtuvieron máscaras de agua para cada una de las escenas analizadas. De esta manera fue posible visualizar la superficie ocupada por agua en las distintas fechas. A modo de ejemplo, la Figura 2 muestra dos escenarios hídricos opuestos: muy húmedo y muy seco y la distribución espacial de las áreas con agua en cada uno.

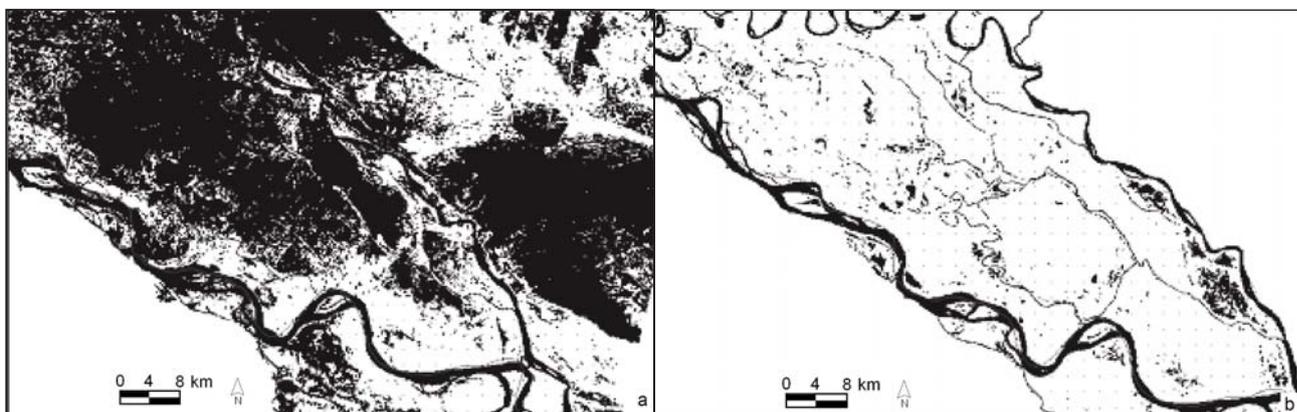


Figura 2. Máscaras de agua correspondientes a dos escenarios hídricos opuestos: a. 29 de mayo de 2007 (clasificado como muy húmedo) y b. 10 de enero de 2009 (clasificado como muy seco).

Por otra parte, se estableció la frecuencia con que cada píxel estuvo ocupado por agua durante todo el período de estudio. Como resultado se obtuvo una imagen cuyos valores por píxel fluctuaron entre 0 y 1. Para visualizarlo en un mapa con la distribución espacial del agua según cada escenario hidrológico, se clasificaron las frecuencias en rangos que variaron desde el estado muy seco hasta el muy húmedo en una escala colorimétrica, obteniendo el mapa de susceptibilidad hídrica (Figura 3). Para ello se empleó la metodología estadística conocida como "natural breaks" o algoritmo de Jenks, que calcula las diferencias entre los valores de los píxeles ordenados de forma creciente proponiendo un límite o punto de quiebre para separar en rangos de modo que las diferencias entre grupos se maximicen y se minimicen dentro de cada grupo (Jenks, 1967). Este algoritmo trabaja con cinco clases, de manera que coincide con la cantidad de rangos de frecuencias o escenarios que se definieron en este trabajo (muy seco, seco, normal, húmedo y muy húmedo). Los límites, en número de píxeles ocupados por agua dentro de cada rango, a partir de los cuales se definió cada escenario figuran en la Tabla 4.

Nótese que en la Figura 3 se aprecia el estado de aguas para cada uno de los escenarios hidrológicos, los cuales a medida que avanzan en el estado hacia mayor humedad se van

sumando a las superficies ocupadas por agua. En el caso del período muy seco, por ejemplo, se observa que solamente están ocupados por agua los píxeles correspondientes a los cursos de agua permanente (color rojo). De esta manera, cada color nuevo que aparece en la figura incluye la superficie ocupada por agua del estado anterior.

Tabla 4. Cantidad de píxeles con agua, superficie representada y porcentaje del total. Obtenidos de aplicar el algoritmo "Natural Breaks" para definir los escenarios hidrológicos posibles.

Escenario	Nº píxeles con agua	Superficie (km <sup>2</sup> )	%
Muy Seco	0 a 939803	< 845,82	< 7
Seco	939804 a 1848900	845,83 a 1664,01	7,1 a 14
Normal	1848901 a 3244315	1664,02 a 2919,88	14,1 a 24
Húmedo	3244316 a 7063083	2919,88 a 6356,77	24,1 a 53
Muy Húmedo	7063084 a 11564581	> 6356,77	> 53,1

Asimismo, este mapa de susceptibilidad se superpuso con imágenes satelitales de Google Earth en un sitio web de libre acceso conocido como GeoINTA (<http://geointa.inta.gov.ar/visor/>). Allí se pueden visualizar los escenarios individualmente

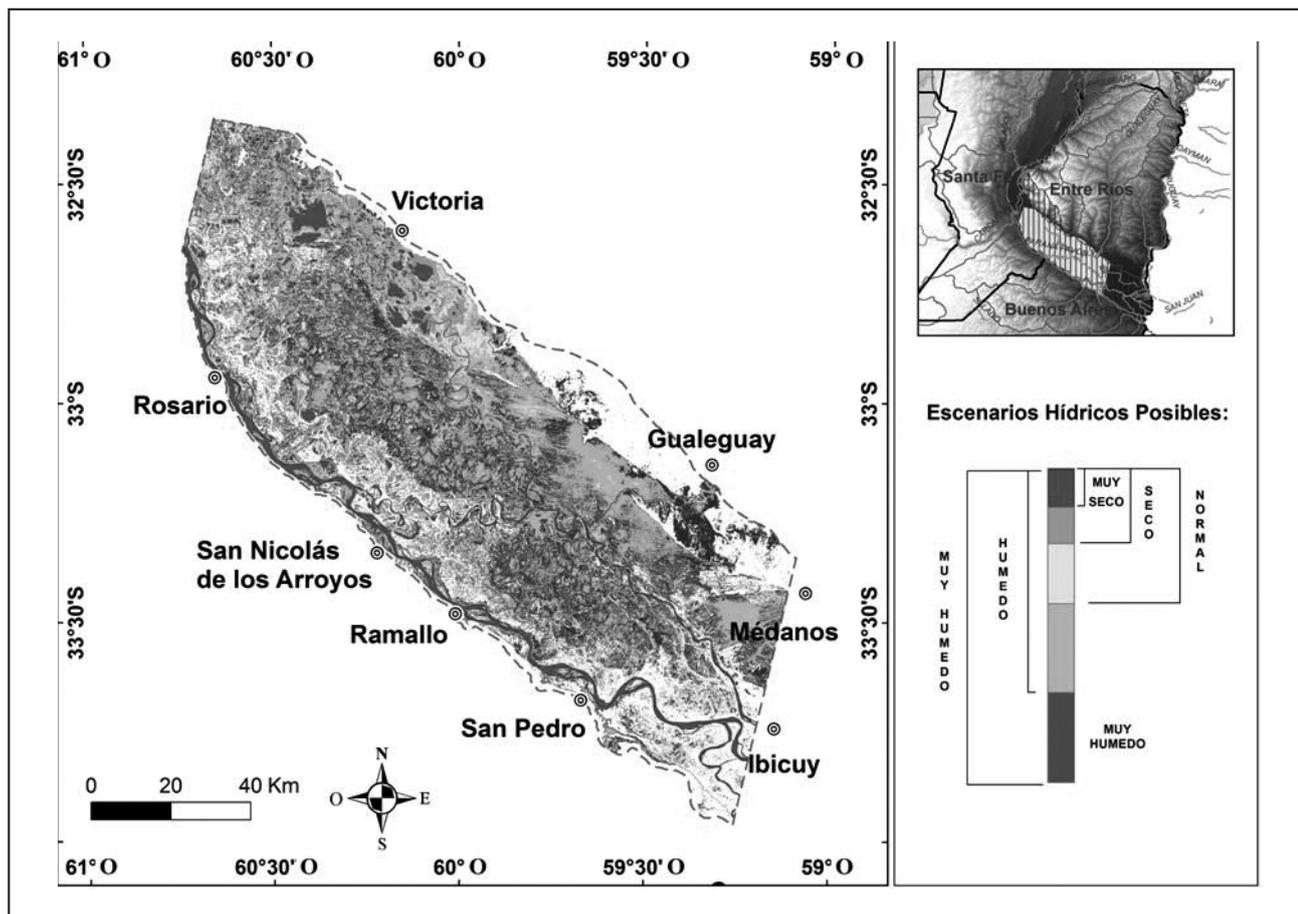


Figura 3. Cartografía de susceptibilidad a inundación y sequía del delta del Río Paraná. Escenarios Hídricos Probables: Muy Seco, Seco, Normal, Húmedo y Muy Húmedo.

al ingresar a la opción “Delta del río Paraná dentro de la pestaña “Proyectos” (Figura 4). Inmediatamente aparecen las opciones de los cinco escenarios hidrológicos para seleccionar y en la imagen se puede ver demarcada la región de estudio de este trabajo. De esta manera, se brinda una herramienta pública que permite localizar establecimientos en particular por sus coordenadas geográficas de latitud y longitud y observar simultáneamente el predio sobre imágenes de Google Earth y el mapa de susceptibilidad hídrica. De esta forma es posible visualizar el nivel de riesgo presente en un establecimiento determinado, ante la presencia o pronóstico de cualquiera de los escenarios descriptos.

### Aplicación de la metodología sobre dos periodos observados

#### Abril - Septiembre de 2011

El pronóstico del volumen estacional acumulado para el semestre Abril-Septiembre de 2011 fue de 264000 hm<sup>3</sup> (valor más probable). Considerando una banda de confianza del 50 % los límites superior e inferior corresponden a los 229000 hm<sup>3</sup> y 299000 hm<sup>3</sup>. En situaciones normales el volumen acumulado en el río Paraná en el puerto de Corrientes en este período varía entre 227000 y 264000 hm<sup>3</sup> (análisis estadístico de la serie histórica 1905-2008 para el volumen acumulado entre Abril-Septiembre). Por lo tanto, durante la temporada otoño-invierno

2011 se esperó una temporada normal según el volumen pronosticado. Es decir con caudales medios mensuales normales o ligeramente por encima de lo normal, con tendencia a húmedo. En base a esto se seleccionó como posible cartografía de susceptibilidad hídrica el escenario análogo al pronóstico (Figura 5.a). Asimismo, para constatar la correcta elección del escenario pronosticado se obtuvieron dos imágenes correspondientes al final del período Abril-Septiembre 2011. Se encontraron dos imágenes disponibles: una del 28 de agosto y otra del 29 de septiembre, las cuales fueron procesadas y clasificadas para obtener las máscaras de agua siguiendo la metodología planteada en este trabajo. Como resultado, se obtuvieron las imágenes que se muestran en la Figura 5.b y c. Como consecuencia, se observa que el escenario seleccionado de acuerdo al pronóstico tuvo concordancia con los datos observados y, a su vez, que el pronóstico de caudales normal con tendencia a húmedo fue válido. La imagen de fines de agosto de 2011 muestra un panorama normal, mientras que la de fines de septiembre del mismo año ya se encuadra en un escenario húmedo. Asimismo, se calculó el porcentaje de píxeles ocupados por agua para cada una de las imágenes. En el caso del 28 de agosto se obtuvo un valor de 23 % y para el 29 de septiembre el valor fue de 34 %. Esto concuerda con lo observado en las imágenes y si se compara con los datos que muestra la Tabla 4, los porcentajes se hallan dentro del rango de un escenario normal en el primer caso y de un húmedo en la segunda fecha.

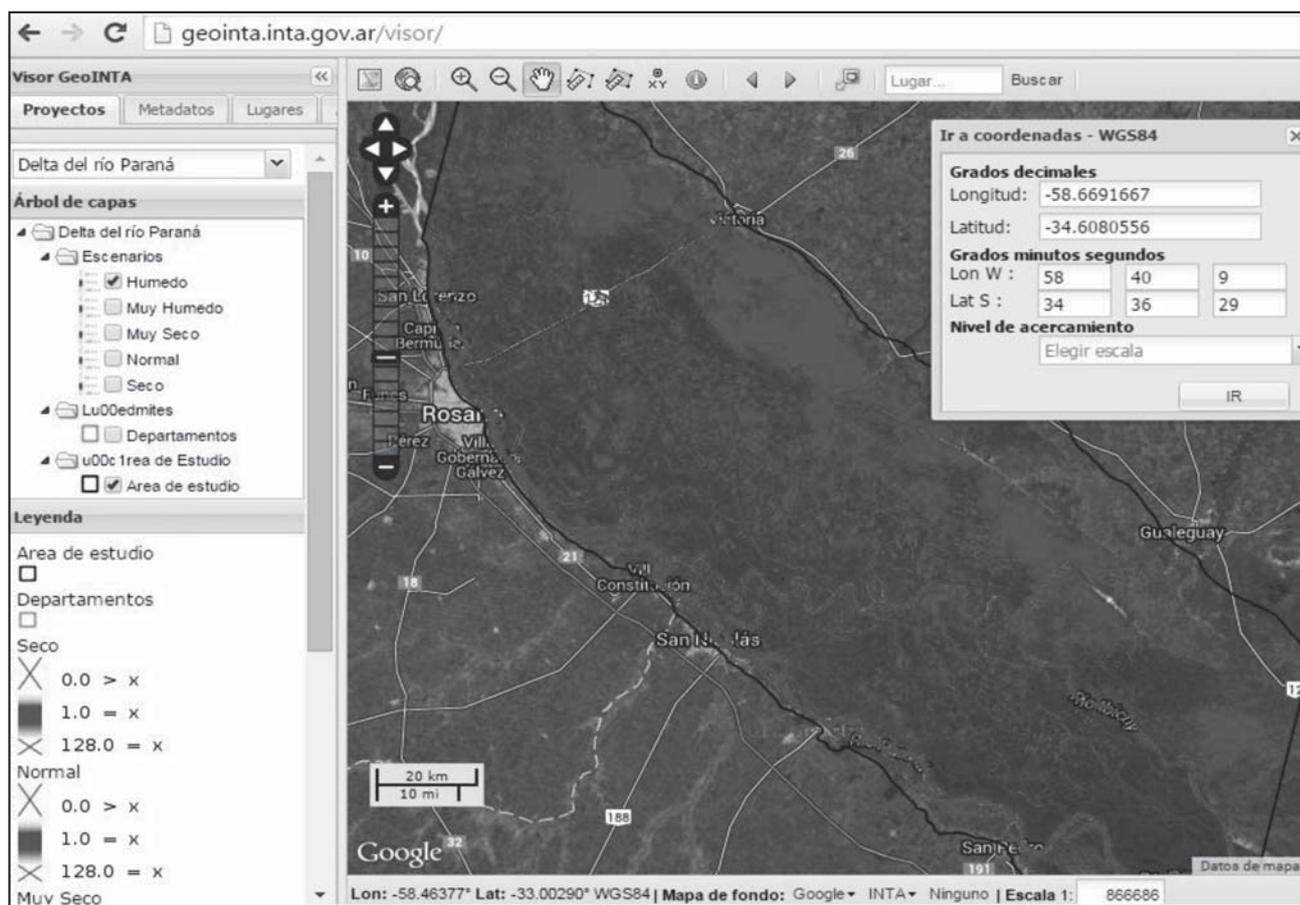


Figura 4. Visor GeoINTA, Cartografía de susceptibilidad hídrica del Delta del río Paraná. Escenario húmedo sobre imagen Google Earth.

### *Abril - Septiembre de 2013*

En esta oportunidad se procesó la imagen observada hacia el final del período, precisamente el día 17 de agosto de 2013. La máscara de agua obtenida corresponde con un escenario clasificado como húmedo. Por otra parte el volumen observado en el puerto de Corrientes fue de 301.200 hm<sup>3</sup>, que se corresponde con el escenario mencionado. En este caso se procedió a comparar la imagen observada con la cartografía de susceptibilidad hídrica análoga a dicho escenario (Figura 6). Asimismo se calculó el porcentaje de píxeles ocupados por agua en la imagen observada (49%) y se comparó con el rango de píxeles que posee un escenario húmedo (24,1% a 53%), encontrando concordancia entre los mismos.

### DISCUSIÓN

El mapa de susceptibilidad hídrica resultante permite dar una idea de la distribución espacial de píxeles ocupados por agua para cada escenario hidrológico, que a su vez depende de los pronósticos estacionales de derrames para el río Paraná en la estación hidrométrica del puerto de Corrientes. Estos pronósticos surgen como resultado de la corrida de un modelo que utiliza como herramienta las Redes Neuronales Artificiales y son publicados semestralmente por el Instituto de Clima y Agua del INTA. El primero en Setiembre [año i] para el período Octubre [año i] - Marzo [año i+1] y el segundo en Abril [año i+1]

para el período Abril - Setiembre [año i+1] y en función de éstos se selecciona la cartografía correspondiente. La superposición del mapa de susceptibilidad hídrica con las imágenes de Google Earth brinda la posibilidad de estimar para cada período estacional el grado de susceptibilidad a inundación y/o sequía probable para cualquier localización geográfica dentro del sector estudiado. Por otra parte, es importante destacar que la cantidad de imágenes disponibles para el período seco fue muy baja y consecuentemente su bondad para representar la cartografía de susceptibilidad hídrica. A esto se suma que el escenario hídrico seco es el más difícil de analizar, ya que es muy dependiente de la situación antecedente y muy sensible a las lluvias locales. Asimismo, dentro del escenario húmedo correspondiente con el sub período Octubre-Marzo se dispuso de una sola imagen (Tabla 2). Esto indica que habría que continuar con la investigación incluyendo imágenes actuales para ampliar la serie histórica y obtener una mejor representación de la cartografía de susceptibilidad hídrica. A su vez, las imágenes que se vayan incorporando permitirán realizar a futuro una validación de la cartografía producida. Esta investigación no incluyó en su metodología la validación propiamente dicha de la cartografía de susceptibilidad generada debido a que sobre los 19 años analizados, fue posible utilizar sólo 15 imágenes, que abarcaron solamente 8 eventos. De esta manera no resultó conveniente separar un grupo de imágenes para la etapa de validación. No obstante, se seleccionaron imágenes correspondientes al

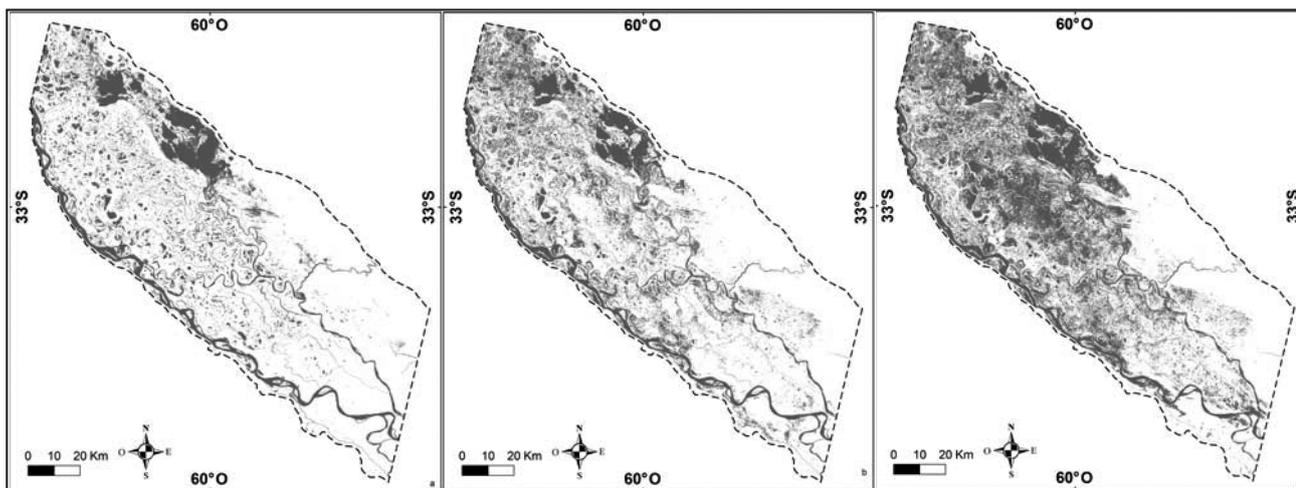


Figura 5. Superficie ocupada por agua en a. escenario hídrico normal y en dos fechas observadas b. 28 de agosto de 2011 y c. 29 de septiembre de 2011.

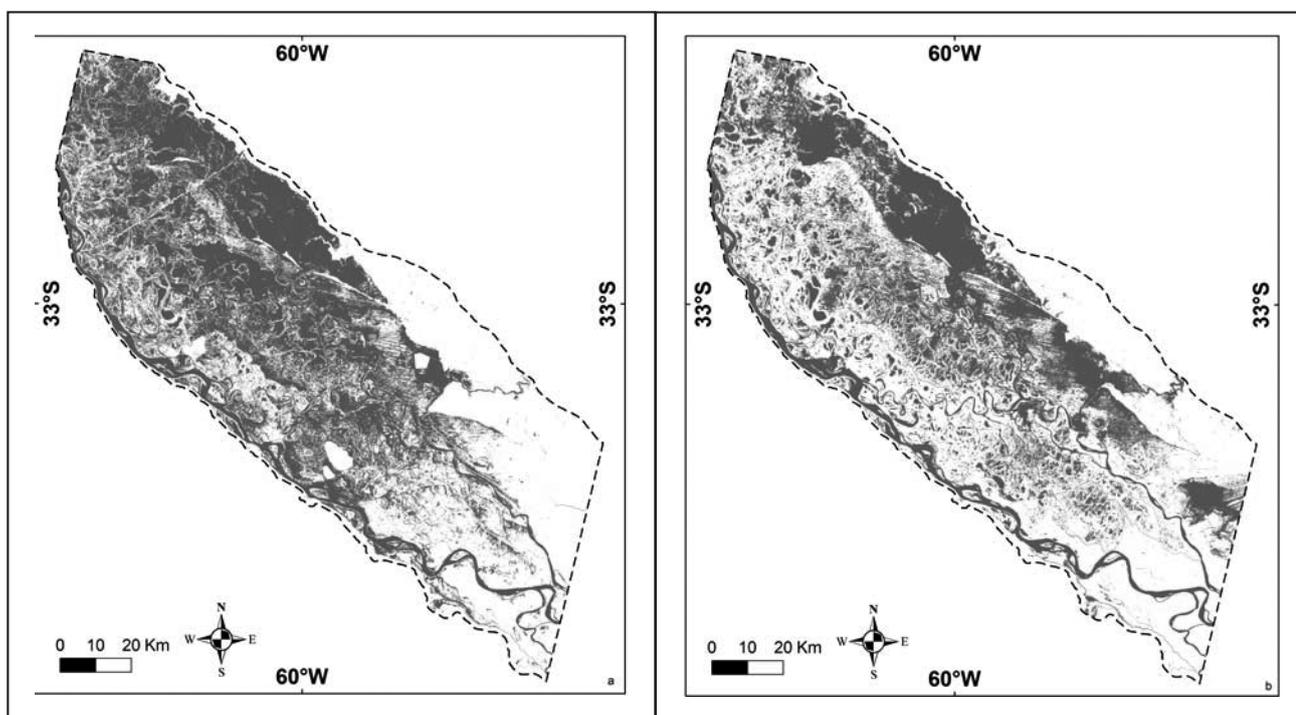


Figura 6. Escenario hídrico húmedo (a) y observado el 17 de agosto de 2013 (b).

período que fue pronosticado durante la realización del trabajo (Abril-Septiembre de 2011), pudiendo acceder a una validación informal de la cartografía resultante. En este caso, se demostró que los datos observados hacia fines del período estacional pronosticado estuvieron dentro de los rangos del pronóstico y la cartografía seleccionada. Posteriormente, se pudo constatar una imagen observada a fines del período Abril-Septiembre de 2013 donde se pudo comparar un escenario observado como húmedo con la cartografía de susceptibilidad hídrica homóloga. De aquí en adelante para los escenarios hídricos planteados se seleccionarán imágenes a intervalos regulares que ayudarán a evaluar la confiabilidad de esta cartografía hídrica junto con los resultados de los pronósticos estacionales, para

cada uno de los semestres. Finalmente se menciona que durante el año 2014 INTA inició la ejecución de proyectos relacionados a la temática agua, en el marco del recientemente aprobado Programa Nacional Agua. Un producto comprometido en uno de estos proyectos (PNAGUA-1133024) es la validación a campo de la cartografía generada para el Delta del río Paraná. Como actividad principal se están realizando gestiones ante productores agropecuarios con establecimientos ubicados en el área en estudio con la finalidad que éstos informen en cada período (Abril-Setiembre y Octubre-Marzo) si su área ha sido, o no, ocupada por agua, con el objetivo de verificar "in situ" la confiabilidad del producto obtenido con imágenes satelitales.

**CONCLUSIONES**

Por medio de esta sencilla herramienta el productor puede combinar la información de imágenes de Google Earth con los mapas de susceptibilidad hídrica a través de las coordenadas geográficas del campo en una página web de libre acceso. De esta manera podrá conocer en forma directa en qué medida su

campo podría ser afectado por agua según el escenario hidrológico elegido de acuerdo al pronóstico estacional, también publicado por INTA en una página web de acceso libre. Esta información es de gran utilidad para la toma de decisiones ya sea para realizar un ordenamiento territorial, planificar el ecoturismo y las prácticas agrícolas, ganaderas y forestales.

**TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO**

- ACEÑOLAZA, P.H.; PAVEDANO, A.; MANZANO, J.; DE DIOS MUÑOZ, J.; ARETA Y RONCHI VIRGOLINI, A.L., 2003.  
Biodiversidad del Parque Nacional Pre-Delta.  
*Serie Miscelánea. INSUGEO, 12: 169-184.*
- ANDERSON, R.J.; RIBEIRO DOS SANTOS, N.D. AND DIAZ, H.F., 1993.  
An analysis of flooding in the Paraná/Paraguay River basin.  
*World Bank, Latin America Tech. Dept., Environment Division, LATEN Dissemination, Note 5, 19 pp.*
- BERBERY, E.H. AND BARROS, V.R., 2002.  
The Hydrologic Cycle of the La Plata Basin in South America.  
*Journal of Hydrometeorology, 3 (6): 630-645.*
- BONFILS, C.G., 1962.  
Los suelos del Delta del río Paraná. Factores generadores, clasificación y uso.  
*Revista de Investigaciones Agrícolas, XVI (3): 257-370.*
- CAMILLONI, I.A., 2005.  
Extreme flood events in the Uruguay River of South America.  
*VAMOS Newsletter, No. 2, International CLIVAR Project Office, Southampton, United Kingdom, pp 23-25.*
- CANEVARI, P.; BLANCO, D.E.; BUCHER, E.; CASTRO, G.; DAVIDSON, I., 1999.  
Los humedales de la Argentina. Clasificación, situación actual, conservación y legislación.  
*Wetlands International, Publicación N° 46.*
- EDROSA, R.; SOLDANO, A.; SERAFINI, M.C., 2009.  
Generación de cartografía sobre susceptibilidad a inundaciones en las Islas del Delta Superior y Medio del río Paraná.  
*Mapping: Map and Sig consulting, 131: 75-78.*
- FLAMENCO, E.A., 1998.  
Pronóstico de inundaciones en el río Paraná en Corrientes, basado en el fenómeno ENSO.  
*Bulletin de l' Institut Français d' Études Andines, 27 (3): 807-818.*
- FRANCHESCHI, E. A. Y LEWIS J. P., 1979.  
Notas sobre la vegetación del valle santafecino del Río Paraná (R. Argentina).  
*ECOSUR, 6: 55-82.*
- IRIONDO, M., 1972.  
Mapa geomorfológico de la llanura aluvial del Río Paraná desde Helvecia hasta San Nicolás, República Argentina.  
*Revista Asociación Geológica Argentina, 27: 155-160.*
- IRIONDO, M., 2004.  
The littoral complex at the Paraná mouth.  
*Quaternary International, 114: 143-154.*
- JENKS, G.F., 1967.  
The Data Model Concept in Statistical Mapping.  
*International Yearbook of Cartography, 7: 186-190.*
- MALVÁREZ, A.I., 1999.  
El Delta del Río Paraná como mosaico de humedales. En A.I. Malvárez (ed.).  
*Tópicos sobre humedales subtropicales y templados de Sudamérica. Oficina Regional de Ciencia y Técnica para América Latina y el Caribe (ORCyT) MAB/UNESCO. Montevideo, Uruguay, pp 35-54.*
- NEIFF, J.J., 1996.  
Large rivers of South América: toward the new approach.  
*Verhandlungen des Internationalen Verein Limnologie, 26: 167-180.*
- PASSEGGI, E., 2000.  
Caracterización sedimentológica del material parental de los suelos asociados a los depósitos de cauce del tramo medio del Río Paraná.  
*Tesis doctoral. Universidad Católica de Santa Fe, 216 pp.*

- RODRÍGUEZ, D.M.; BOLZI, S.C.; VELASCO, I., 2010.  
Evaluación de zonas inundadas en la Pampa húmeda con datos del sensor MODIS/Terra.  
*XIV Simposio Internacional Selper. 8-12 de noviembre de 2010. Guanajuato, México.*
- RODRÍGUEZ, D.M.; VELASCO, I.; MARINO, M., 2009.  
Clasificación de coberturas de suelo mediante el uso de índices e imágenes satelitales de distintos sensores.  
*X Congreso Argentino de Meteorología - CONGREGMET X. 5-9 de octubre. Bs. As., Argentina.*
- SOLDANO, A., 2009.  
Inundaciones: ¿Qué es susceptibilidad? Conceptos sobre riesgo.  
*Síntesis temática realizada para el Foro Virtual de la RIMD creado para la Capacitación en Teledetección Aplicada a la Reducción del Riesgo por Inundaciones. 16 al 20 de marzo, Falda del Carmen, Córdoba, Argentina.*
- SU, F.; HONG, Y.; LETTENMAIER, D.P., 2008.  
Evaluation of TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA) and its Utility in Hydrologic Prediction in the La Plata Basin.  
*Journal of Hydrometeorology, 9: 622-640.*
- TAKEUCHI, W. Y YASUOKA, Y., 2005.  
Development of normalized vegetation, soil and water indices derived from satellite remote sensing data.  
*Journal of the Japan Society of Photogrammetry and Remote Sensing, 43 (6): 7-19.*



**ASAGAI**  
ASOCIACIÓN ARGENTINA  
DE GEOLOGÍA APLICADA  
A LA INGENIERÍA

Metodología para la delimitación de las áreas de riesgo hídrico en la Provincia de Santa Fe

*Mastaglia, María Inés - Pusineri, Graciela - Arbuat, Alejandra - Pilatti, Miguel Ángel*

Modelo de redes funcionales orientado a pronóstico de crecidas en cursos de llanura del Gran Rosario, Santa Fe, Argentina

*Scuderi, Carlos M. - Riccardi, Gerardo A. - Zimmermann, Erik D. .*

Nota Técnica. Estabilización de las subrasantes loésicas utilizando el descarte de piedras ornamentales

*Cruz, María P. - Martin Schmädke, Italo F. - Arnaudo, Carlos E. - Higa, José J.*

Construcción de vínculos interdisciplinarios e intersectoriales desde las ciencias sociales para el abordaje del riesgo hídrico. Ciudad de Santa Fe

*Córdoba, Anabella - Chialvo, Patricia - Morresi, María del Valle*

Estimación de la lluvia de diseño mediante información multi-satélite de libre disponibilidad

*Catalini, Carlos G. - García, Carlos M. - García, Cesar - Jovanovic, Nebo Z. - Bagan, Richard DH*

Modelo de flujo de agua subterránea en el sector industrial planificado (Tornquist, provincia de Buenos Aires)

*Albouy, René - Lafont, Daniela - Lexow, Claudio - Carrica, Jorge*

Cartografía de susceptibilidad hídrica en el delta del río Paraná

*Sepulcri, M.G. - Flamenco, E.A. - Pizarro, M.J. - Herrera, M.G. - Borus, J. - Giordano L.*

Procesos modeladores en los acantilados de Las Grutas, provincia de Río Negro

*Fucks, Enrique Eduardo - Schnack, Enrique Jorge - Scalise, Armando - Ahrendt, Kai - Vafeidis, Nassos - Sterr, Horst*

Visión crítica por introducción de obras en márgenes y cauce del río Dulce entre las ciudades de Santiago del Estero y La Banda

*Castellano, Juan - Ávila, Edgardo - Zerda, Hugo*

Portada: Vista de las características geomorfológicas del valle en el que se localiza Junín de los Andes, en segundo plano volcán Lanín.

Fotografía: F.X. Pereyra

**Revista de Geología  
Aplicada a la Ingeniería  
y al Ambiente**

