

CAPÍTULO 2

ISBN 978-987-543-443-1

http://cursosihlla.bdh.org.ar/Libro_011/

Recurrencia de anegamiento en la pampa deprimida, Provincia de Buenos Aires

Pablo Vazquez¹, Sergio Masuelli², Gabriel Platzeck² y Olver Boolsen³

¹ INTA, EEA Cuenca del Salado, Av. Belgrano 416, 7203, Rauch, Buenos Aires, Argentina.

² Centro Espacial Teófilo Tabanera, CONAE. Ruta 645 km 8, 5187, Córdoba, Argentina.

³ Servicio Meteorológico Nacional – Fuerza Aérea Argentina. 25 de Mayo 658, Capital Federal.

Correo electrónico: pmvazquez@correo.inta.gov.ar

1. Introducción

La Pampa deprimida es una extensa llanura anegable dominada por la presencia de suelos hidro-halomórficos del suborden Natracuoles y Natracualfes (Miaczynski 1995; Soil Survey Staff, 2006) ubicada en el centro-este de la provincia de Buenos Aires, Argentina (36° 18' 15'' Sur; 58° 36' 56'' Oeste) (Figura 1).

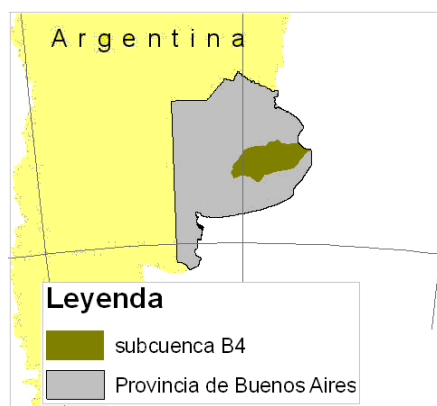


Figura 1. Ubicación del área de estudio en la provincia de Buenos Aires y Subcuenca B4.

Abarca en gran parte la cuenca media y baja del río Salado, todos los sistemas hidrográficos de sus tributarios y el sistema del río Samborombón. Es el área de

concentración de los escurrimientos superficiales y subsuperficiales por excelencia de un área de 10 millones de ha. La región que más frecuentemente se anega es la subcuenca B4, cuya superficie puede estimarse en 3,5 millones de ha (Posadas, 1934; Barbagallo, 1983).

El patrón hidrológico de la depresión del Salado está bien definido en el espacio y en el tiempo, pero las respuestas a dichos eventos no pueden ser explicadas por los conceptos clásicos de la hidrología de superficie (transmisión de un volumen en el tiempo), ya que se trata de una extensa zona plana con una alta densidad de cuerpos de agua y de escasa energía morfogenética (Tricart, 1973). Esto se ve claramente si se representa a los procesos de entrada y salida del agua del sistema en un modelo de balance hidrológico. Entonces:

$$P = ET + Es + As + Pc + Alm \quad (1)$$

donde P es la precipitación, ET es la evaporación y la evapotranspiración, Es es el escurrimiento superficial, As es la retención superficial (lagunas, cubetas, cañadas), Pc la infiltración y Alm el almacenamiento en el suelo.

Para un sistema hidrológico como el de la depresión del Salado, caracterizado por disipar la energía proveniente de la lluvia por medio de la amortiguación (Barbagallo, 1983), se observa que:

$$P - (ET + As + Pc + Alm) = Es \quad \text{y} \quad Es < \%10 \quad (2)$$

Por lo tanto, es de esperar que la P caída en la zona no sea evacuada por canales, cañadas y arroyos, sino que el sistema capta el agua y lo transformaría en expansión y disipación ocupando todas las áreas deprimidas de primer orden (cubetas de deflación, áreas deprimidas aledañas a cuerpos de agua, vías de escurrimiento), para luego, una vez colmatadas éstas, avanzar sobre las de segundo orden (áreas planas circundantes a las anteriores) siguientes en función de su altura relativa. Tal cual lo descrito por Posadas (1934), la zona tendría una capacidad estimada de retención de agua en depresiones que según distintos autores rondaría entre los 100 y 300 mm, aunque este dato es estimativo y por el momento no ha sido evaluado (Sala, 1983).

También es importante destacar que más del 70% de las grandes inundaciones se han observado con eventos extraordinarios de otoño-invierno, con una duración media del período anegado de cinco meses (Vazquez *et al.*, 2003). El resto ocurrieron durante la primavera, pero por condiciones de mayor demanda de la ET , su duración media descendió a tres meses o menos (Posadas, 1934; Barbagallo, 1983). Esto refuerza la idea que el principal componente vertical que controla el volumen de agua superficial es la ET . La capacidad de infiltración de un horizonte Bt sódico típico de la depresión del Salado, que llegaría a lo sumo a 0,001 mm día⁻¹, un techo del mismo cercano a los 10 – 20 cm de profundidad, y

una velocidad de infiltración básica inferior a los 17 mm h⁻¹ (INTA, 1977; Vázquez, 2001). Seguramente existen vías de flujo preferencial hacia el acuífero, pero son de escasa importancia ante la magnitud de estos eventos. Además, cuando están húmedos, los suelos arcillosos, y más aún los sódicos, se expanden notablemente (coeficiente de extensibilidad del suelo mayor a 0,110), cerrando cualquier grieta. Con respecto al nivel freático, varios autores han probado que en la pampa deprimida no hay relación evidente entre la altura del nivel freático y el agua acumulada en superficie (Sala *et al.*, 1981, Lavado y Tabeada, 1988). Ellos detectaron que en momentos húmedos y de nivel freático alto, la calidad del agua de la parte superior del acuífero ubicada a unos 40 cm de profundidad poseía una composición química totalmente distinta a la superficial y que no había relación existente entre la altura de la freática y el estado hídrico de las distintas comunidades vegetales del pastizal. La tensión capilar es poco significativa en momentos de saturación del suelo si no existe una demanda atmosférica importante, por lo cual dominan los movimientos descendentes del agua. En periodos de alta demanda atmosférica, dominan la *ET* y el ascenso capilar, motivo por el cual suelen observarse aumentos en la conductividad eléctrica y aumento del pH en superficie (Barbagallo, 1983).

Este conjunto de situaciones se presentan en la cuenca del arroyo Azul, donde incrementos significativos en el área cubierta por agua se observa sólo al llegar a un determinado milimetraje acumulado (Vázquez, 2003). Es evidente entonces que los procesos verticales dominan en la dinámica del agua acumulada superficialmente en la pampa deprimida, como son la *ET* y la infiltración profunda y el almacenamiento.

La teledetección ha probado ser una herramienta poderosa al momento de evaluar áreas afectadas por distintas catástrofes. La elaboración de mapas de inundaciones puede considerarse como un ejercicio multidisciplinario que involucra estudios de base geomorfológica y climática, complementados por una aproximación aportada por los sensores remotos, muchas veces más sensible que la escala de la información de base disponible (Hudson y Colditz, 2003). De hecho, los mapas topográficos del Instituto Geográfico Militar (IGM) existentes en el área (escala 1:50000 y equidistancia = 2,5 m) son insuficientes para describir en detalle el relieve y su relación con los sitios donde se almacenará el agua. Con las imágenes RADAR se pueden generar modelos digitales de terreno con excelentes resultados tanto a escala regional como local (Burrough, 2000).

La distribución de *P* es igualmente importante al momento de modelar la anegabilidad, puesto que la distribución de las tormentas nunca es homogénea sobre toda la región, y es fundamental conocer dicha información pues explica el sentido en el que el agua puede avanzar sobre las depresiones de primero y segundo orden (Barbagallo, 1983).

A partir de estos antecedentes, se realizó un estudio multitemporal con imágenes de satélite para determinar la recurrencia de anegamiento de la subcuenca B4, perteneciente a la pampa deprimida.

2. Materiales y Métodos

2.1. Información de base

Se ha trabajado con información de numerosas fuentes para lograr el mapa de anegamiento definitivo. Las fuentes pueden agruparse en cartografía, imágenes satelitales y datos de precipitación diaria, como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Fuentes de información utilizadas.

<i>Cartografía</i>	<i>Imágenes</i>	<i>Precipitación</i>
_Cartas IGM 1:50.000: Coordenadas planas Gauss-Krüger (sistema Campo Inchauspe); _Cursos de agua del Instituto Nacional del Agua (INA); _Cartas geomorfológicas del INTA 1:100000;	_Imágenes facilitadas por la CONAE (proyecto Emergencias Ambientales n° 136); _Información: Imágenes Landsat TM y ETM (total 60). (*) _Mosaico fotográfico de referencia espacial patrón: http://delemn.gsfc.nasa.gov _Información: Imágenes Landsat ETM+ pancromáticas (14,25 m), georeferenciadas con Gauss-Krüger faja 5. Diferencia espacial respecto de la señal GPS: 1 píxel.	_Información de pluviometría diaria de 20 estaciones provenientes del Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2004) (Figura 2). (*) Las imágenes utilizadas corresponden a periodos de lluvias extraordinarias, eventos húmedos, promedio y secos de cada estación del año.

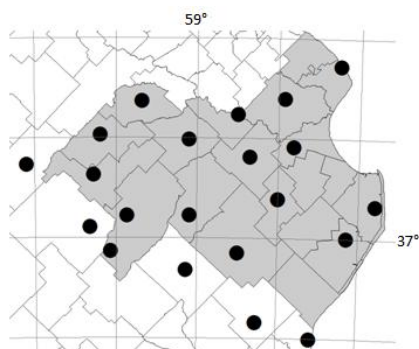


Figura 2. Distribución espacial de las estaciones meteorológicas del SMN en el área de influencia de la subcuenca B4 (el punto negro relleno indica la ubicación de las estaciones).

2.2. Procesado de imágenes

Las imágenes fueron georreferenciadas a partir de un mosaico pancromático Landsat ETM+, de 14,25 m de resolución espacial y error de un píxel, por el método de rotación, traslación y re escalado, utilizando el algoritmo de vecino más próximo, ya que esta combinación no altera sensiblemente el valor radiométrico de los píxeles. La proyección utilizada fue Gauss Krüger faja 5 (Datum Campo Inchauspe). La clasificación de agua se realizó aplicando el método del árbol, el cual consiste en discriminar las clases entre sí en pasos sucesivos, tal cual lo haría un sistema experto, utilizando en cada caso información específica que permite separar una clase del resto. Lo interesante de este método, a diferencia de la clasificación supervisada, es que no utiliza todas las bandas incluidas en la clasificación para discriminar, sino que se aprovecha de un conocimiento previo del comportamiento espectral de cada clase para extraerlo con precisión. Esto evita el incremento en el desvío estándar de las clases a separar por efecto de incluir información no necesaria, y por ende, una mayor factibilidad de discriminar satisfactoriamente cada clase de su entorno (Skidmore, 1989; Chuvieco, 2000). Se utilizaron las bandas infrarrojo medio (IRM) (banda 5), infrarrojo lejano (IRL) (banda 7) y el NDVI. La selección obedece a experiencias previas realizadas en la zona por Vázquez *et al.* (2006). La zona presenta vegetación que crece en los cuerpos de agua (palustres) o cultivos forrajeros con un elevado contenido de humedad en sus hojas en determinados momentos del año, por lo que el uso de una sola banda IRL es insuficiente para clasificar agua. En términos generales, el IRL se utiliza para identificar cuerpos de agua libre. Los cultivos que presentan elevada humedad en su dosel se confunden con los cuerpos de agua, por lo cual se utiliza el NDVI para identificarlos y eliminarlos de las áreas clasificadas. La banda IRM se utilizó específicamente para identificar cubiertas con vegetación palustre senescente en invierno sobre las lagunas, e incluirlas dentro del área clasificada como agua. Todas ellas fueron corregidas radiométricamente según los algoritmos sugeridos por la USGS (2000). Debido a la escasa información atmosférica disponible para la región, se corrigieron las imágenes por el método de Chávez (1996) incluido en el módulo ATMOSC del software IDRISI ANDES (2006), el cual solo requiere ingresar datos necesarios para aplicar el método de *Resta de Superficies Oscuras* (ó *DOS* - del inglés *Dark Object Subtraction*, ver en capítulo 1 apartado 2.2.2 en detalle la descripción del método), pero agregándole un procedimiento para estimar los efectos de absorción de los gases atmosféricos y el efecto Rayleigh a partir del coseno del ángulo cenital solar. Basándose en determinaciones de anegamiento previos en el área (Vázquez *et al.*, 2003), se clasificaron y binarizaron las áreas anegadas en las 60 imágenes disponibles, obteniéndose 29 mosaicos parciales (uno por cada fecha estudiada).

2.3. Cálculo de frecuencia relativa y recurrencia de anegamiento

La frecuencia relativa de anegamiento se calcula sumando la cantidad de veces que un píxel fue clasificado con presencia de agua y dividiendo este resultado por el número de fechas utilizadas en el *World-wide Reference System* específico. Sin embargo, esto representa un resultado engañoso. La zona es muy extensa (3,5 millones de ha) y las *P* no se distribuyen de manera homogénea, por lo cual debe corregirse este aspecto y referirlo a la frecuencia de ocurrencia del evento en particular y limitado al área donde ocurrió la tormenta.

Para calcular la recurrencia de cada evento, se calculó la frecuencia de precipitaciones categorizadas en rangos de 30 mm, desde 0 a 960 mm. Se consideraron periodos acumulativos de 30, 60 y 120 días. Los periodos no son conjuntos excluyentes de datos, se los consideró desplazando cada periodo un día por vez, similar al cálculo de una media móvil. Luego se calculó su recurrencia acumulada, comenzando desde el evento de mayor milimetraje registrado (tormentas extraordinarias) hasta los periodos sin registro de precipitación (donde se sumaría el 100 % de las recurrencias). Una vez caracterizadas las recurrencias de *P* para periodos de 30, 60 y 120 días de cada estación meteorológica, se caracterizan las fechas estudiadas en las imágenes de satélite. La recurrencia de cada historia pluviométrica observada se obtiene al integrar las recurrencias a 30, 60 y 120 días en una ecuación lineal. La ecuación se define de la siguiente manera (Vázquez *et al.*, 2008):

$$\text{Recurrencia de anegamiento fecha } A = \frac{(\text{rec.30.M} + \text{rec.60.N} + \text{rec.120.O})}{(M + N + O)} \quad (3)$$

en donde *rec.30*, *rec.60*, *rec.120* representan las recurrencias de precipitaciones acumuladas a 30, 60 y 120 días, respectivamente. *M*, *N* y *O* son factores de ponderación de las recurrencias.

Una vez calculada la recurrencia para cada fecha, se definieron las áreas de influencia de cada estación meteorológica aplicando el método de polígonos de Thiessen con el software ARC EDITOR 9.2. Esta metodología es muy simple y ha demostrado robustez al momento de estimar datos faltantes de precipitación en áreas con paisajes poco desarrollados (Tabios y Sala, 1985). Teegavarapua *et al.* (2005) compararon varias metodologías para estimar datos faltantes de precipitación, concluyendo que este tipo de metodología es adecuada para implementarse en varias situaciones, sobre todo cuando los puntos disponibles a interpolar son escasos. Se crearon 29 imágenes, una por cada fecha estudiada, con la recurrencia de precipitación registrada en cada estación meteorológica. Una vez definidas, se multiplicó cada máscara de agua con su correspondiente mapa de polígonos de Thiessen donde fueron definidas las recurrencias de precipitación, obteniendo 29 imágenes de recurrencia de precipitación sólo donde

había sido identificada agua. Mediante el procedimiento MIN del módulo MAP ALGEBRA AND LOGIC MODELER disponible en el software IDRISI ANDES (2006) se extrajo para cada *ijésimo* píxel el mínimo valor de recurrencia a partir del cual pudo identificárselo como anegado. Esto permitió identificar, por lo tanto, la precipitación umbral y la estación más riesgosa para cada píxel anegado. Los resultados hallados fueron chequeados sobre 200 establecimientos. El modelo aplicado se resume en la Figura 3.

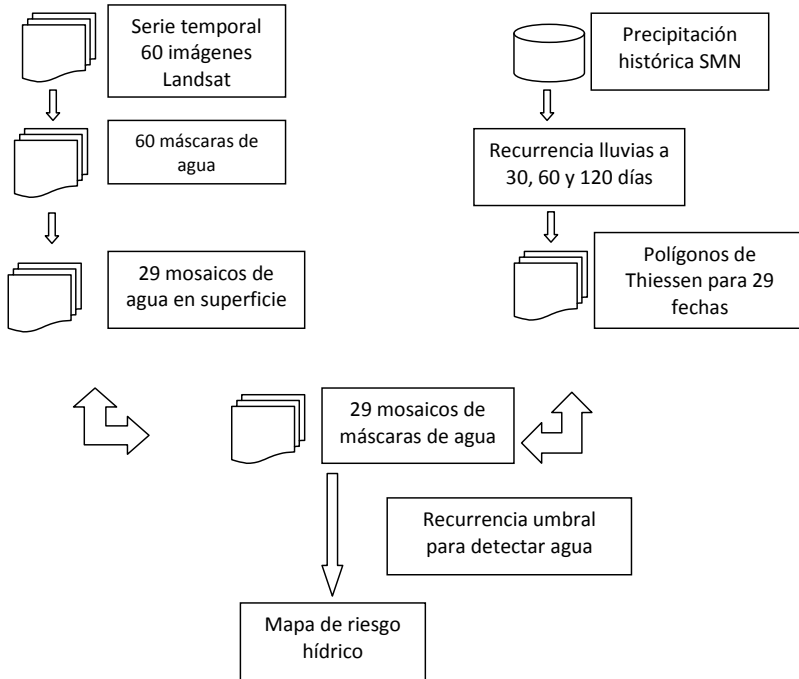


Figura 3. Modelo para determinar la recurrencia umbral de anegamiento para cada píxel en el área de la subcuenca B4.

3. Resultados y Discusión

El agua presentó un patrón de expansión asociado a la capacidad de retención de agua del paisaje y quedó evidenciado por las diferentes tasas de anegamiento observadas por milímetro de lluvia caída (Figura 4).

Una vez colmatados los almacenamientos, el agua inunda áreas vecinas hasta alcanzar un nuevo punto de equilibrio, sin evidenciarse escurrimientos de importancia.

La primera área de expansión está comprendida por áreas inundables con menor o igual a 85 mm de P y corresponde a los cuerpos de agua permanente y semipermanente. Éstas ocupan el 16 % del área total analizada (Tabla 2). Los

suelos dominantes son Cromudertes, Peludertes, Argiacuoles, Argialboles y Natracualfes.

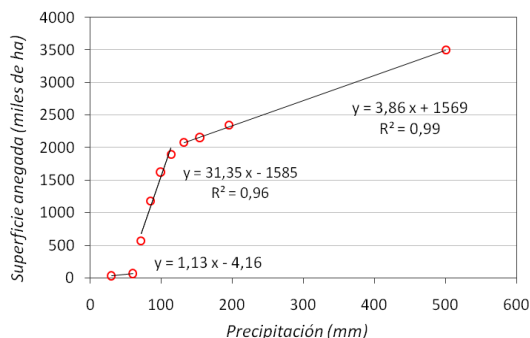


Figura 4. Superficie anegada (en miles de ha) en función de la Precipitación registrada (mm).

La segunda área de expansión está integrada por áreas anegadas con lluvias acumuladas entre 85 y 132 mm. Hay presencia de lagunas semipermanentes de escasa profundidad, desarrolladas sobre relieves extremadamente planos. Los suelos dominantes son Natracualfes y Natracuoles muy alcalinos en superficie. Ocupa el 39 % de la superficie.

Tabla 2. Relación existente entre P acumulada en 30 días (Pac30), recurrencia porcentual (expresada en ciclos de 30 días al año), superficie afectada para cada recurrencia, grado de afectación porcentual y grado de afectación porcentual acumulado.

<i>Pac</i> (mm)	<i>Recurrencia</i> (%)	<i>Superficie</i> (ha)	<i>Afectación</i> (%)	<i>Acumulada</i> (%)
S/D	S/D	1160842	33	100
195	10	187002	5	67
154	20	73889	2	61
132	30	187259	5	59
114	40	269152	8	54
99	50	442342	13	46
85	60	614010	18	34
72	70	501857	14	16
60	80	33906	1	2
30	100	29743	1	1
<i>Superficie total subcuenca B4</i>			3571777	

La tercera área de expansión está asociada a áreas anegadas con precipitaciones acumuladas entre 132 y 200 mm. Son sectores suavemente ondulados, con deficiente capacidad de drenaje interno de los suelos pero moderado drenaje superficial. Los suelos dominantes de este sector son

Argiudoles acuícos, Hapludoles taptó árgicos y nátricos, asociados con Natracuoles alcalinos en profundidad. Ocupa el 12 % de la superficie.

La cuarta área está representada por sectores no anegables o anegables por un periodo inferior a 15 días en cualquier momento del año, bajo las *P* más importantes relevadas en la región (inundaciones de 1980, 1985, 1993 y 2002). Esto identifica claramente su ubicación en los sectores más altos del paisaje. Los suelos asociados son Argiudoles típicos, Paleudoles petrocálcicos, Hapludoles líticos, Hapludoles típicos y Hapludoles taptó árgicos, todos ellos de buena aptitud agrícola. Ocupa el 33% del área (Figuras 5 y 6).

La tercera área de expansión está asociada a áreas anegadas con precipitaciones acumuladas entre 132 y 200 mm. Son sectores suavemente ondulados, con deficiente capacidad de drenaje interno de los suelos pero moderado drenaje superficial. Los suelos dominantes de este sector son Argiudoles acuícos, Hapludoles taptó árgicos y nátricos, asociados con Natracuoles alcalinos en profundidad. Ocupa el 12 % de la superficie.

La cuarta área está representada por sectores no anegables o anegables por un periodo inferior a 15 días en cualquier momento del año, bajo las *P* más importantes relevadas en la región (inundaciones de 1980, 1985, 1993 y 2002). Esto identifica claramente su ubicación en los sectores más altos del paisaje. Los suelos asociados son Argiudoles típicos, Paleudoles petrocálcicos, Hapludoles líticos, Hapludoles típicos y Hapludoles taptó árgicos, todos ellos de buena aptitud agrícola. Ocupa el 33% del área (Figuras 5 y 6).

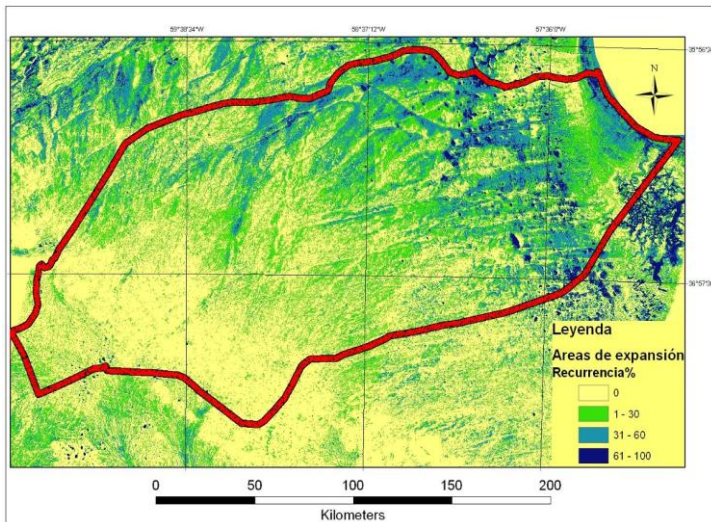


Figura 5. Identificación de áreas de expansión del agua en la subcuenca B4 asociadas a la recurrencia de anegamiento.

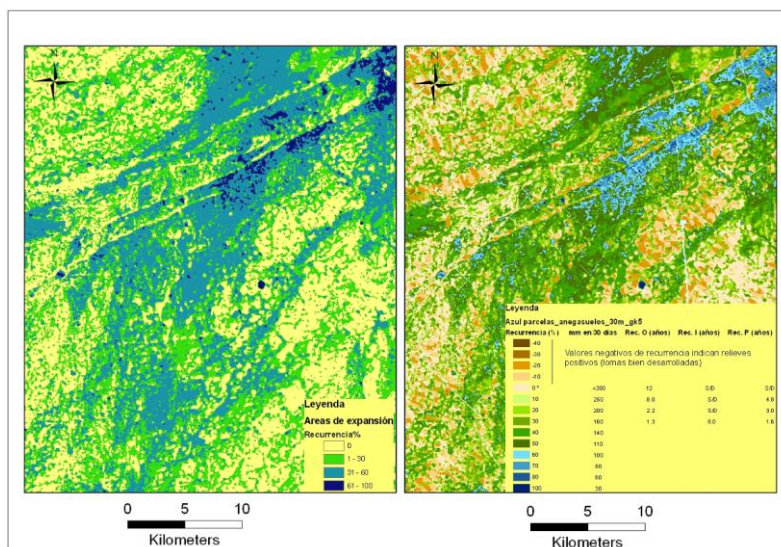


Figura 6. Detalle comparativo entre el mapa de áreas de expansión del agua y el de recurrencia de anegamiento.

De las fechas estudiadas, se detecta claramente que las grandes inundaciones se han dado principalmente en otoño – invierno. En primavera – verano también se dan eventos de importante magnitud, tanto en intensidad de P como en milímetros caídos. La principal diferencia entre estos dos periodos es la ET . Una P de 200 mm puede anegar en verano una superficie de 1200000 ha durante una semana (diciembre 2005 – enero 2006), pero en otoño – invierno ésta puede extenderse por 5 meses (inundación abril – mayo 2002). Por lo tanto, el verdadero riesgo debe referirse a la recurrencia de estos eventos para los periodos críticos.

El análisis de registros de P diaria (SMN, 1980 – 2004) indicó que las recurrencias para un mismo tipo de evento son muy diferentes entre el otoño y el invierno (Tabla 3), siendo el otoño el periodo más crítico del año (meses abril y mayo).

Los anegamientos prolongados ocurridos durante el período otoño – invernal condicionan el aprovechamiento de las tierras marginales para la agricultura, ya que pueden obligar a resembrar o perder la oportunidad de siembra en los cultivos de invierno, y se puede ver imposibilitada la cosecha de los cultivos de verano por anegamiento o inaccesibilidad.

El avance de la agricultura en los últimos 20 años se realizó sobre zonas muy marginales, incrementándose en un 69 % desde 1986 al 2001 (Cañivano *et al.*, 2003). Sin embargo, se desconoce la proporción de cultivos realizados para cada nivel de riesgo.

Tabla 3. Recurrencia media de eventos de *P* que afectan más del 50 % de la superficie de la subcuenca B4, calculada en años, para los periodos otoño e invierno (para 24 años y 20 estaciones meteorológicas).

<i>Pac30</i>	<i>Recurrencia (años)</i>	
	<i>otoño</i>	<i>invierno</i>
Entre 100 y 150 mm	1	2
Entre 150 y 200 mm	2	5
Entre 200 y 300 mm	4	20
Mayor a 300 mm	8	480

Para el ciclo 2003 – 2004, se evaluó la recurrencia de anegamiento para la superficie ocupada por diferentes usos del suelo determinada por [Vázquez et al. \(2006\)](#). El 25 % de la agricultura de la subcuenca B4 (72413,19 ha) se realizó sobre suelos netamente ganaderos, con una recurrencia igual o mayor al 40 %. Estamos ante la presencia de cultivos, principalmente de verano, realizados sobre suelos muy anegables, con elevado contenido de sodio en su perfil, con riesgo de no poder ser cosechados año por medio.

La proporción de cultivos forrajeros realizados sobre suelos marginales es inferior a la de los cultivos, llegando solo al 7 %. No se clasificaron pasturas en áreas con recurrencia mayor al 40 %. Si analizamos estos dos resultados, se observa claramente el mayor cuidado prestado a la implantación de pasturas y cultivos forrajeros que a los cultivos. Todo esto está vinculado al manejo, ya que el pisoteo de los animales compromete seriamente la persistencia de los recursos forrajeros, sobre todo en los suelos marginales.

Para vincular estos resultados con el aspecto inmobiliario, se ponderó la recurrencia de anegamiento a nivel de parcela catastral, de tal manera de poder establecer un valor medio de riesgo para cada unidad parcelaria. El 23 % de las parcelas (equivalente al 31 % de la superficie) conforman un grupo caracterizado por anegarse 50 % o más de su superficie con lluvias menores o iguales a 100 mm (Tabla 4).

Tabla 4. Valoración de las parcelas catastrales del año 2006 ubicadas en la zona de la subcuenca B4 en función de su recurrencia de anegamiento ponderada.

<i>Parcelas catastrales</i>					
	<i>Recurrencia de anegamiento (ponderado)</i>	<i>Cantidad</i>		<i>Superficie</i>	
		<i>Nº</i>	<i>%</i>	<i>hectáreas</i>	<i>%</i>
≤20	7227	34,28	751104	19,36	
21-40	8667	41,11	1920124	49,50	
41-60	4201	19,93	1014146	26,14	
61-80	970	4,60	187941	4,85	
>80	19	0,09	5697	0,15	
<i>total</i>	21084		3879012		

El conocimiento de la recurrencia de anegamiento para cada ha y el valor ponderado de anegamiento a escala parcelaria constituyen una herramienta que permite controlar un importante grado de incertidumbre. Permite tomar decisiones más objetivas al momento de planificar actividades regionales o dentro de un establecimiento, ajustar la división parcelaria o incluso tomar decisiones inmobiliarias.

El área afectada por una recurrencia de anegamiento igual o superior al 60 % (Tabla 2) representa el 34 % del área total de la subcuenca B4 (1214140 ha). El 12 % de ésta (156040 ha) tiene relación directa con obras de origen antrópico existentes en la región, siendo principalmente los bordos de canales, rutas con escaso alcantarillado (por medio de tubos y otras obras) o puentes ferroviarios subdimensionados (Tabla 5).

La subcuenca B4 explica el 86 % de la superficie inundada por efecto de infraestructura en la cuenca baja del río Salado (156000 ha).

Para verificar los resultados, se chequearon 200 establecimientos con visita a campo junto a los asesores y propietarios, detectándose correctamente el 95 % de las situaciones observadas. Esto responde principalmente a la aplicación de un filtro de mediana de 3x3 al trabajo original para eliminar ruido. El grado de detalle del trabajo final es superior al de las cartas de suelo escala 1:50000, ya que permitió identificar la distribución de subgrupos de suelo dentro de cada unidad cartográfica, lo cual podría aprovecharse para ajustar la cartografía edafológica de la región.

El error de estimación de área afectada por cada recurrencia se determinó a partir de evaluar 200 establecimientos in situ (Tabla 6).

Tabla 5. Superficie anegada con una recurrencia igual o superior al 60 % atribuible a obras de infraestructura.

<i>Lugar</i>	<i>Superficie Anegada (ha)</i>
Intersección Ruta prov. 50 y FF.CC. Roca	1425
Ao. Los Huesos (partidos de Azul - Rauch)	5336
Intersección camino Rauch - Pila y FF.CC. Roca	6563
Canal 9	9972
Intersección Ruta prov. 60 y Ao. Langueyú	13900
Canal 11	25753
Ao. Cortaderas (partido de Azul)	42120
Ruta prov. 29 y camino Rauch - Pila	50971
<i>Total</i>	156040

Se comprobó que los límites de las áreas afectadas diferían en promedio respecto de las estimadas, en ± 30 m. Este error fue introducido cuando los resultados parciales fueron suavizados por un filtro de mediana de 3x3 píxeles. El

error medio ponderado fue de 22,5 %, pero si consideramos áreas mayores a 100 ha, el error es de solo 4,77 % (Tabla 6).

Tabla 6. Errores medios de estimación de superficie anegada.

<i>Superficie, Áreas clasificadas</i>	<i>Ocupación subcuenca B4(%)</i>	<i>Error ponderado parcial (%)</i>
Entre 1 y 100 ha.	50	40,20
Entre 101 y 500 ha.	20	8,40
Entre 500 y 1000 ha.	10	4,50
Mayor a 1000 ha.	20	1,20
<i>Error ponderado total</i>		22,50
<i>Error para áreas anegadas mayores a 100 ha</i>		4,77

4. Conclusiones

La recurrencia de anegamiento en la subcuenca B4 incluida en la cuenca del Río Salado (provincia de Buenos Aires) fue calculada utilizando fuentes de fácil acceso. El grado de certidumbre de los resultados fue del 95%, mientras que el error en el cálculo de los límites de las superficies afectadas por los distintos grados de anegamiento fue del orden de ± 30 m. Se identificó un claro patrón de expansión de las aguas, asociado al tipo de relieve y a la precipitación registrada. La mayor capacidad de retención de agua se detectó en las áreas ocupadas por lagunas, cubetas, donde cada milímetro caído puede cubrir 1113 ha. Una vez saturado este sistema (con precipitaciones superiores a los 60 mm acumulados en 30 días), comienza una gran expansión de la masa de agua superficial, cubriendo cada mm de lluvia aproximadamente 31000 ha. Esta superficie corresponde a extensas zonas planas con una recurrencia de anegamiento del 40 % o mayor, la cual representa, junto con la anterior, el 54 % de la superficie de la subcuenca B4. Los periodos críticos de inundaciones son claramente otoño e invierno, pues el proceso que más condiciona la salida de agua del sistema es la evapotranspiración. Los problemas severos comienzan a partir de precipitaciones superiores a los 150 – 200 mm, lo que implica tener anegada aproximadamente el 67 % de la superficie por periodos del orden de 2 ó 3 meses. Si bien ambos periodos son muy riesgosos por la escasa evapotranspiración, los riesgos son mayores en otoño, pues las recurrencias determinadas para una misma precipitación son sensiblemente mayores a las halladas para el invierno.

Estos patrones de anegamiento condicionan claramente el uso del suelo. Un 25 % de los cultivos son realizados en áreas de recurrencia de anegamiento superior o igual al 40 %, lo que implica la posibilidad de perder 72413 ha todos los años. Este riesgo es tomado principalmente por las expectativas de elevados precios en los granos. Solo el 7 % de cultivos forrajeros y pasturas es realizado en suelos riesgosos. Esto responde a que el recurso forrajero puede ser fácilmente

degradado por el pisoteo diario bajo condiciones de anegamiento, hecho que ocurre todos los años.

Las estructuras antrópicas contribuyen en un 12 % en el anegamiento regional, siendo los principales impedimentos para el movimiento del agua los bordos de los canales 12, 11 y 9, la ruta provincial 29 (entre la localidad de Ayacucho y su cruce con el camino a Casalins) y la línea férrea de Metrovías (ex FF.CC. Roca).

Agradecimientos

Este trabajo no podría haberse realizado sin la colaboración del Instituto de Hidrología de Llanuras, quienes creyeron en esta propuesta de trabajo y nos apoyaron desde el inicio. A la memoria del Dr. Eduardo Usunoff, Director del IHLLA, quien ya no está físicamente entre nosotros pero siempre recordaremos con verdadero afecto.

Referencias

1. Baragallo, J. Las áreas anegables de la Pampa Deprimida. Un planteo agro hidrológico para su solución, Coloquio internacional sobre hidrología de grandes llanuras, Olavarría, Argentina, 1983, 73 pp.
2. Burrogh, P.; Van Gaans, P., MacMillan, R. High-resolution landform classification using fuzzy k-means, *Fuzzy Sets and Systems*, 2000, 113, 37-52.
3. Cañibano, A.; Gandini, M.; Sacido, M., Vazquez, P. El crecimiento de la actividad agrícola en la cuenca del arroyo del Azul, Buenos Aires, Argentina. XI Simposio Latinoamericano sobre percepción remota y sistemas de información espacial-Selper, Chile, 2003.
4. Chavez Jr., P. S. Image-based atmospheric correction- Revisited and improved. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 1996, 62(9), 1025-1036.
5. Chuvieco, E. Fundamentos de teledetección espacial, Capítulo 7: Tratamiento digital de imágenes: II. Generación de información temática, Rialp, S.A, Madrid, España, III edición, 2000, 406-408.
6. CLARK LABS – CLARK UNIVERSITY. IDRISI ANDES, Manual del usuario, 2006.
7. Frenguelli, J. Rasgos generales de la morfología de la provincia de Buenos Aires, L.E.M.I.T. Serie 3, n° 62. La Plata, Argentina, 1956.
8. Consejo Federal de Inversiones (Provincia de Buenos Aires). Estudio de la zona deprimida del Salado. Informe Final: Estudios de Suelo y Vegetación, Vol. 3 (D), La Plata, Argentina, 1981.
9. Hudson, P., Colditz, R. Flood deliniation in a large and complex alluvial valley, lower Pánuco basin, Mexico. *Journal of Hidrology*. 2003, 280, 229-245.

10. INTA. La pampa Deprimida, Condiciones de drenaje de sus suelos, Departamento de suelos del INTA, Publicación n° 152. Serie suelos, 1977, 162 pp.
11. Lavado, R.S., Taboada, M.A. Water, salt and sodium dynamics in a natraquoll in Argentina. *Catena*, 1988, 15, 577-594.
12. Miaczynski, C. Los suelos hidromórficos e hidrohalomórficos de la provincia de Buenos Aires. *Rev. Fac. Agr.*, 1995, 15, 23-36.
13. Posadas, C. La solución al problema de las inundaciones y desagües en la provincia de Buenos Aires. Ministerio de Obras Públicas, La Plata, Argentina, 1934.
14. Sala, O.; Soriano, A., Perelman, S. Relaciones hídricas de algunos componentes de un pastizal de la depresión del Salado. *Revista Facultad Agronomía (UNCPBA)*, 1981, 2, 1-10.
15. Sala, J. La problemática en las investigaciones geohidrológicas en grandes llanuras con escasa información. Coloquio internacional sobre hidrología de grandes llanuras, Olavarría, Argentina, 1983, 21 pp.
16. Servicio Meteorológico Nacional, base de datos agroclimáticos diarios, 1980 – 2004.
17. Skidmore, A. K. An expert system classifies eucalyptus forest types using Thematic Mapper data and digital terrain model. *Photogrammetric Eng. and Remote Sensing*, 1989, 55, 1149-1464.
18. Soil Survey Staff. *Keys to Soil Taxonomy*. 10th Ed. USDA, NRCS, Washington DC, 2006, 341 p.
19. Tabios III, G., Salas, J. A comparative analysis of techniques for spatial interpolation of precipitation. *Water Resources Bulletin*, 1985, 21, 365-380.
20. Teegavarapua, R. S., Chandramoulia, V. Improved weighting methods, deterministic and stochastic data-driven models for estimation of missing precipitation records. *Journal of Hydrology*, 2005, 312, 191–206.
21. Tricart, J. La Geomorfología de la Pampa deprimida como base para los estudios edáficos y agronómicos. Ed. INTA, Colección científica XII, Buenos Aires, Argentina, 1973, 198 pp.
22. USGS. MRLC 2000 Image preprocessing Procedure. 2000, <http://edc.usgs.gov/>.
23. Vázquez, P.; Costa, J. L.; Monterubbianesi, G., Godz, P. Predicción de la productividad primaria de pastizales naturales de la pampa deprimida utilizando propiedades del horizonte A. *Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo*, 2001, 19(2), 136-143.
24. Vázquez, P.; Entraigas, I.; Gandini, M., Usunoff, E. Identificación de patrones de anegamiento en la cuenca del arroyo del Azul mediante el uso de imágenes Landsat. *Revista de Teledetección*, 2003, 19, 43-50.

25. Vázquez, P.; Masuelli, S., Platzeck, G. Determinación de patrones espectrales para distintos usos del suelo en ambientes heterogéneos. INTA, Publicación Técnica n° 1, 2006, 32 pp.
26. Vázquez, P.; Masuelli, S.; Platzeck, G., Boolsen, O. Recurrencia de anegamiento en la depresión del río Salado: subcuena B4. Revista de Teledetección, 2008, 30, 47-59.