DETERMINACIÓN Y ANÁLISIS DE NIVELES DE PELIGROSIDAD A INUNDACIONES EN EL SURESTE DE LA PROVINCIA DE CÓRDOBA (ARGENTINA)

Gabriela Inés MALDONADO[1]

Resumen

Estimar y analizar la dinámica temporal de procesos como inundaciones resulta una tarea compleja por diversos aspectos. Entre ellos cabe mencionar la diversidad de factores que influyen en su origen y dinámica y la carencia de datos e información con la cobertura espacial y temporal necesaria. En el presente trabajo se elabora una propuesta para la construcción de un mapa de peligrosidad a inundaciones en el sureste de la provincia de Córdoba (Argentina), mediante el procesamiento y articulación de datos de diversas fuentes (que en general resultan accesibles), que ha dado resultados satisfactorios para el área de estudio. La propuesta articula y correlaciona espacial y temporalmente: estudios sectoriales realizados previamente; características geomorfológicas, edafológicas y climáticas; análisis digital de imágenes satelitales; análisis estadístico de precipitaciones; y, determinación y análisis estadístico de excedentes hídricos. La integración de los datos e información culminan en un mapa de peligrosidad a inundaciones, que evidencia que un porcentaje importante de la superficie presenta niveles de peligrosidad a inundaciones medios, altos y muy altos. Asimismo se pudo determinar que en la mayor parte de la superficie el principal origen se encuentra en las precipitaciones excedentes acumuladas en el área debido al escaso escurrimiento superficial de las aguas.

Palabras Claves: Inundaciones. Mapa de peligrosidad. Excedente hídrico. Sureste de Córdoba.

Abstract

Identification and analysis of levels of floods hazard in the southern of Córdoba province (Argentina)

The comprehension about floods dynamics constitutes a very complex task because of the confluence of multiple factors and the lack of specific information. A methodological proposal for the construction of a map of floods hazard in the southern of Córdoba (Argentine) is presented in this paper. The data and information provided from different accessible sources, such us geomorphologic, soil and climatic characteristics, digital images analysis; statistics analysis of precipitations; and statistics analysis of water surplus, are linked to assess the floods hazard. The map of floods hazard is obtained as a result of the integration of these information. An important part of the studied area is represented by a medium, high o very high level of hazard. It is concluded that surplus of precipitations accumulated in the area represents the main factor that generates the floods in southern of Córdoba.

Key Words: Floods. Hazard map. Water surplus. Southern of Córdoba.

[1] Departamento de Geografía. Universidad Nacional de Río Cuarto. CONICET - Ruta Nacional N 36 – km 601. Río Cuarto (Córdoba, Argentina) - Correo electrónico: E-mail: gimaldonado@hum.unrc.edu.ar

INTRODUCCIÓN

El estudio de las características y comportamiento temporal de eventos como las inundaciones se constituye, cada vez más, en una tarea ineludible para comprender la amenaza en el marco del análisis de situaciones de riesgo y, en el mismo sentido, para elaborar propuestas de intervención territorial que tiendan a modificar y disminuir la vulnerabilidad socio-territorial de los actores sociales expuestos.

Evidentemente una inundación puede ser producto de una combinación de factores, lo que complejiza su estudio y determinación. En el sureste de la provincia de Córdoba (Argentina), al igual que la mayor parte de la región pampeana argentina, en cada evento de inundaciones se conjugan: desbordes de cursos de agua y lagunas, afloramiento del nivel freático, precipitaciones intensas y/o prolongadas, escaso drenaje por la existencia de cuencas endorreicas y/o sistema de avenamiento deficiente, instalación de obras de infraestructura que modifican u obstaculizan el escurrimiento superficial del agua, entre otros. Dada la variedad de factores intervinientes y la complejidad y diversidad de posibles relaciones entre éstos, la comprensión precisa de la dinámica temporal de las inundaciones y la determinación de sus principales causantes requiere tanto el relevamiento de datos de diversos tipos como la realización de estudios sectoriales específicos, muchas veces inexistentes.

Es por ello, que el objetivo del presente trabajo es presentar los resultados obtenidos de la implementación de una serie de pasos técnicos y metodológicos tendientes a obtener un mapa de amenaza a inundaciones en un sector del sureste de la provincia de Córdoba, mediante el procesamiento y articulación de datos de diversas fuentes que en general resultan accesibles.

El área de estudio se encuentra en el sureste de la provincia de Córdoba (Argentina). Corresponde, casi en su totalidad, a la pedanía de Italó, ubicada al este del departamento General Roca. En la misma se encuentran las localidades de Jovita, Pincén, Italó, Onagoity y Buchardo y es recorrida en sentido noreste-suroeste por el río Quinto (figura 1).

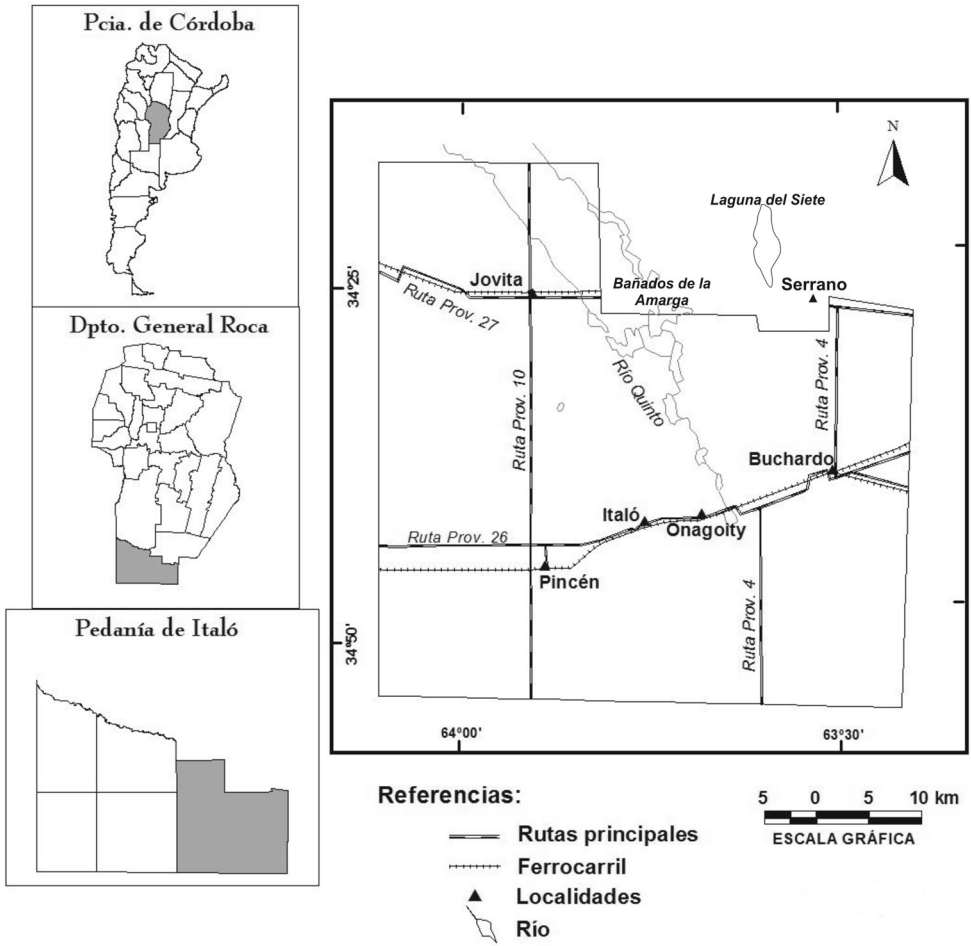

Figura 1 - Localización del área de estudio (Córdoba, Argentina)
Fuente: elaboración propia.

MATERIALES Y MÉTODOS

La presente propuesta articula y correlaciona espacial y temporalmente: estudios realizados previamente; características geomorfológicas, edafologógicas y climáticas; resultados del análisis digital de imágenes satelitales en un periodo de 20 años a fin de determinar superficies de agua; y, análisis estadístico ponderado de excedentes hídricos obtenidos a través del método Thornthwaite. Por lo anteriormente expresado, para la construcción del mapa de niveles de peligrosidad a inundaciones en el área de estudio se recopiló, sistematizó y analizó información y datos de diversas fuentes.

Por un lado se digitalizaron, georreferenciaron y analizaron las cartas topográficas y cartas de suelo a escala 1:50.000. De las últimas se extrajeron las variables referidas a *Capacidad de uso del suelo* y *Limitaciones para su uso*.

A su vez se recopilaron y analizaron estadísticamente los registros pluviométricos provistos por cuatro estancias, con datos desde la primera mitad del siglo XX. Se corroboró su consistencia y se establecieron: áreas de influencia, precipitaciones medias ponderadas en distintas escalas temporales, tendencias, precipitaciones acumuladas y probabilidad de ocurrencia. Se vincularon los registros de precipitaciones a la capacidad de retención de agua por parte del suelo y a la temperatura regional, para la aplicación del método Thornthwaite a fin de determinar el déficit o excedente hídrico entre los años 1975 y 2006.

Se analizaron digitalmente doce imágenes satelitales Landsat 5 TM y 7 ETM+, escena 228/84, comprendidas entre los años 1987 y 2006. El criterio de selección de las imágenes se basa en las máximas precipitaciones registradas 30, 60 y 90 días antes de la adquisición de la misma -sujeto a disponibilidad-. Se determinaron y compararon tanto las superficies anegadas como la evolución de las mismas para establecer, luego de superponer los resultados, el grado de afectación: alto, medio o bajo, para el período temporal comprendido entre los años 1987 y 2006.

La totalidad de la información espacial fue integrada y correlacionada en un sistema de información geográfica, a fin de obtener el mapa de peligrosidad a inundaciones en el área de estudio y reconocer el origen fundamental de las mismas.

BREVE CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA, EDAFOLÓGICA Y CLIMÁTICA DEL ÁREA DE ESTUDIO

Caracterización geomorfológica y edafológica

El área de estudio se caracteriza por un relieve plano-cóncavo, de escasa pendiente. La máxima altura que se registra en el sector es de 160 msnm, en el extremo noroeste, y la mínima de 126 msnm en el extremo sureste, con una pendiente general de 0.03º (0.05%). Predominan materiales post-pampeanos (loess, limos) hacia el oeste y más arenosos hacia el este, con fuerte modelado eólico. Las lomas arenosas tienen mayor recurrencia y magnitud en el sector oeste y suroeste del área de estudio (sector de las localidades de Pincén e Italó) disminuyendo su número y altura hacia el norte y este (INTA;AGENCIA CÓRDOBA AMBIENTE, 2000). En el área se encuentran algunos relictos de médanos, aún inestables, resultantes del modelado eólico y con una dinámica asociada a los ciclos climáticos. En los períodos secos tienden a activarse y a avanzar sobre las planicies y en los períodos húmedos a cubrirse de vegetación y estabilizarse (ESTRUCH et al, 1999). En años de precipitaciones abundantes, producto del relieve plano-cóncavo, el escurrimiento superficial del agua es escaso, por lo que predomina el movimiento vertical de la misma, es decir, procesos de evaporación e infiltración y, por consiguiente, el eventual saturamiento de suelo (PAOLI; GIACOSA, 2003).

En cuanto a las características edafológicas, se han analizado las cartas del suelo con el fin de reconocer las capacidades y limitaciones generales del uso del suelo. En las Cartas de Suelo de la República Argentina (INTA; AGENCIA CÓRDOBA AMBIENTE, 2000, 2004) la clasificación por *capacidad de uso* comprende ocho tipos, siendo los de Clase I los de mejor capacidad de producción y los que presentan menos limitaciones. Estas últimas se incrementan hasta la Clase VIII, correspondiente a aquellos suelos que carecen de capacidad productiva agrícola y ganadera debido a la gravedad de sus limitaciones.

En el área de estudio no se encuentran suelos con capacidad de uso de las Clases I, II y V. Predomina la Clase III que abarca el 53% de la superficie. Ésta corresponde a suelos que requieren prácticas de manejo y conservación más complejas que los tipos I y II, pero son adecuados para cultivos y pasturas. Siguen en orden de importancia los suelos Clase IV

(20% del área) para los cuales la variedad de cultivos producibles se limita. Las Clase VI (11% del área) y VII (8% del área) representan a suelos con graves limitaciones que no resultan aptos para cultivos, siendo recomendable destinar ambos tipos a pasturas naturales, y eventualmente cultivo de pasturas en el tipo Clase VI. Por último, dentro de la Clase VIII se encuentran incluidos los relictos de médanos, médanos, lagunas permanentes o semi-permanentes y bañados (8% del área).

La capacidad de uso del suelo es acompañada por las principales limitaciones que éstos poseen. Una Clase de suelo (cualquiera excepto la I y VIII) puede poseer distintos tipos de limitaciones: por susceptibilidad a la erosión; por tendencia a acumulación de humedad excedente por escaso drenaje, freática alta y/o anegabilidad; dentro de la zona radical -sector del suelo influenciado por el sistema radical de las plantas- que incluye suelos salinos o alcalinos de escasa profundidad, baja capacidad de retención de humedad y bajo nivel de fertilidad; y, de tipo climática.

En el área de estudio el 84% de los suelos poseen limitaciones dentro de la zona radical. Estas limitaciones se combinan con: susceptibilidad a la erosión (35%); limitaciones climáticas (30%); y, limitaciones referidas a excesos de agua (19%). Esta última se concentra mayormente en la mitad norte del área de estudio. En cuanto a las dos primeras combinaciones, la diagonal marcada por las lagunas interconectadas del río Quinto divide dos sectores: uno ubicado al noreste de la diagonal, que concentra la mayor cantidad de suelos que se combinan con limitaciones climáticas; y el segundo, al suroeste del río Quinto, donde predominan las combinaciones con suelos susceptibles a la erosión. La subclase que representa sólo limitaciones climáticas, ubicada en las inmediaciones de la localidad de Buchardo, representa un 7% del total del área, mientras que las superficies no aptas un 9% (se encuentra incluida la totalidad de la Clase VIII).

En síntesis, la totalidad del suelo del área de estudio presenta serias limitaciones, fundamentalmente vinculadas a su escasa profundidad, salinidad o alcalinidad, escasa capacidad de retención de agua y fertilidad reducida, lo que deriva en limitaciones para su uso. Este escenario geomorfológico y edafológico juega un rol fundamental a la hora de definir la magnitud e intensidad de la amenaza, mediante la interrelación con el patrón de precipitaciones.

Caracterización climática: análisis de precipitaciones

La temperatura media del área es de 17ºC, con valores medios del mes más cálido de 23ºC, correspondiente a enero, y del mes más frío de 9ºC, correspondiente a Julio.

El análisis detallado de las precipitaciones -distribución espacio-temporal- se realizó en base a cuatro registros pluviométricos del área de estudio. Las precipitaciones anuales medias ponderadas para el período 1925-2005, son de 766mm. En cuanto a la distribución espacial de las mismas, de los módulos pluviométricos por estación se desprende que las estaciones de Jovita y Buchardo tienen una media superior a las estaciones de Pincén e Italó, lo que muestra una correspondencia con la tendencia de disminución de precipitaciones hacia el sur y oeste de la región. La misma observación puede aplicarse al comparar las medias mensuales de las cuatro estaciones, donde claramente se aprecia el mismo patrón de variación espacial.

En cuanto a la distribución temporal, se observa un régimen anual de precipitaciones propio de la región pampeana, con máxima concentración en el período comprendido entre los meses de octubre a marzo y precipitaciones mínimas en invierno. En la figura 2 se muestran los resultados de la media anual de precipitaciones por decenios, para la totalidad de la región. La primer y última columna corresponden a las medias de los períodos 1925-1930 y 2001-2005 respectivamente, representando el resto de las columnas a los decenios comprendidos entre 1931 y 2000. Se observa un notable incremento de la media anual a

partir del decenio 1971-1980, superando inclusive la media regional para los últimos 80 años (766mm), incremento que no se ha revertido hasta la actualidad.

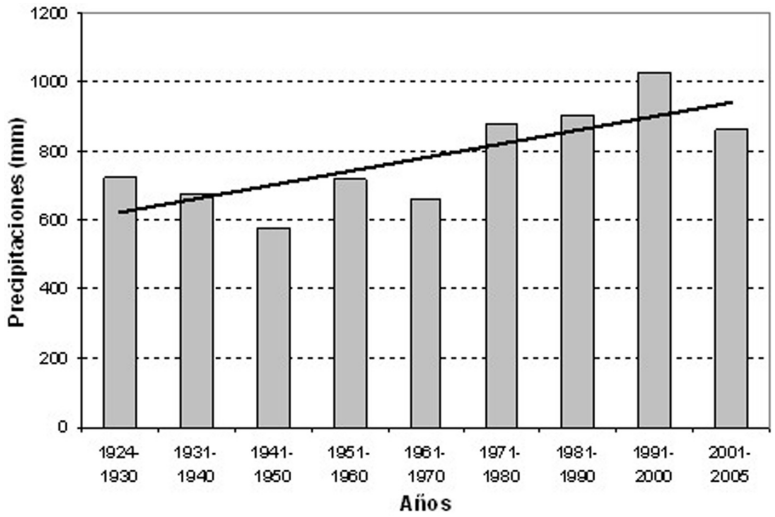

Figura 2 - Precipitaciones medias anuales por decenio en el área de estudio (Córdoba, Argentina) y línea de tendencia. Período 1925-2005

Fuente: Elaboración propia en base a datos de precipitaciones suministrados para las cuatro estaciones.

En la misma línea en la figura 3 se presentan tres columnas para los doce meses del año, que abarcan distintos cortes temporales. La primer columna representa la media mensual para el período comprendido entre los años 1925-1970; la segunda el período 1971-2005 y la última la totalidad del período analizado, es decir, 1925-2005. En el mismo se observa que si bien en casi la totalidad de los meses se registra un incremento de la media para el período 1971-2005, en relación a los otros dos cortes temporales, este incremento es mucho más significado en los meses de enero, febrero, marzo y abril, aumentando, respecto del período 1925-1970, en un 58% en enero, 40% en febrero, 45% en marzo y 40% en abril. La distribución temporal de las precipitaciones tiene una incidencia relevante para el problema de las inundaciones en la región puesto que, si se considera que por las características topográficas predomina el movimiento vertical del agua (evaporación-infiltración), si la concentración de las mismas se acentúa en los meses previos al otoño-invierno y se generan excedentes que no pueden de ser absorbidos por el suelo, la evaporación de los mismos será más lenta producto de la disminución de la capacidad evapotranspirante de la atmósfera propia de los meses fríos.

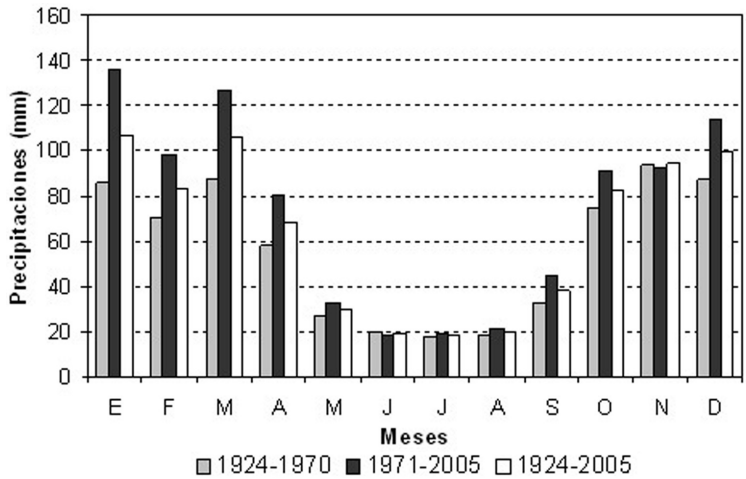

Figura 3 - Precipitaciones medias mensuales en el área de estudio (Córdoba, Argentina) en tres períodos: 1925-1970; 1971-2005; y, 1925-2005

Fuente: Elaboración propia en base a datos de precipitaciones suministrados para las cuatro estaciones.

DETERMINACIÓN DE ÁREAS INUNDADAS MEDIANTE EL USO DE IMÁGENES SATELITALES

El sensoramiento remoto en general, y las imágenes satelitales en particular, constituyen una herramienta de extrema utilidad a la hora de distinguir áreas inundadas debido al alto contraste de reflectancia entre el agua y las demás superficies.

Existen diversos estudios en los que se ha aplicado el análisis digital de imágenes satelitales para la detección de superficies de agua. En general, el análisis se basa en Clasificaciones Supervisadas y No Supervisadas (FRAZIER et al, 2000; MUNYATI, 2000; entre otros); en análisis de Componentes Principales (HUDSON et al, 2003; BATES et al, 1997, entre otros), en la integración de datos obtenidos de sensores ópticos con imágenes de radar (COLBY et al, 2000; WANG et al, 2002; entre otros) y, operaciones matemáticas entre bandas (WANG, 2002).

La superposición de los resultados genera un importante aporte para la comprensión de la dinámica temporal del fenómeno de las inundaciones y permite realizar un primer acercamiento al mapa de peligrosidad diferencial.

Pre-procesamiento y análisis digital de imágenes satelitales

Se utilizaron imágenes Landsat 5 TM y 7 ETM+, escenas 228/84, del año 1987 y los años comprendidos entre 1997 y 2006. Se generaron sub-imágenes que abarcan específicamente el área de estudio y se las georreferenció con un promedio de 50 puntos de control por imagen y un RMS global menor a un pixel. El sistema de proyección utilizado es UTM, Datum WGS84.

El criterio de selección de las imágenes se basó en las máximas precipitaciones acumuladas 30, 60 y 90 días antes de su adquisición -en función de la disponibilidad de escenas-, de manera tal de poder correlacionar las superficies anegadas con los registros de precipitaciones previas a la adquisición de la imagen y los excedentes hídricos determinados por el método Thornthwaite modificado. Bajo el mismo criterio, se seleccionaron imágenes correspondientes a periodos con déficit hídrico intensos, para el reconocimiento de aquellas superficies con agua permanente.

Para la detección de superficies de agua se realizó una suma aritmética entre las bandas 4 y 7 (TM y ETM+) (WANG, 2002). Como resultado de esta operación se obtuvo una imagen donde se amplían las diferencias de Niveles Digitales (ND) entre las superficies de agua y el resto de las superficies. De esta manera, en función de lo observado en cada imagen y de datos tomados en el terreno, se estableció un umbral de corte, por el cual aquellos píxeles con valores de ND menores a ese umbral son considerados superficies de agua y los píxeles con valores de ND mayores se corresponden a otro tipo de superficie. El mismo procedimiento fue aplicado a la totalidad de las sub-imágenes, obteniendo un total de doce estados de situación en relación a la superficie agua-no agua entre los años 1987-2006.

Los resultados obtenidos del procesamiento digital de las imágenes satelitales fueron superpuestos a fin de determinar, para los últimos 20 años:

1) Sectores de agua permanente: corresponden a las superficies obtenidas de la intersección de los resultados de todas las imágenes analizadas. Constituyen menos del 1% del área total del sector en estudio;
2) Áreas de inundación: corresponden a aquellos sectores que en alguna o varias imágenes poseen superficies con agua, que no corresponden a los sectores determinados en el punto 1. Constituyen en su totalidad un 22.5% del total del área. Estos sectores de inundación fueron divididos en tres tipos de grado de peligrosidad a inundaciones: a) *alto* (12%), superficies de agua que persisten en casi la totalidad de las imágenes; b) *medio* (2.5%), sectores que se encuentran ocupados por agua en por lo menos cuatro de las doce imágenes analizadas; y por último, c) *bajo* (8%), correspondiente a aquellos sectores que se encuentran anegados en un máximo de dos imágenes.

De esta manera, se pudo obtener un mapa de peligrosidad a inundaciones según registros de los últimos 20 años, basado en el estudio digital y temporal de imágenes satelitales. Se elaboró así un mapa preliminar que será utilizado como una variable más para la elaboración del mapa de peligrosidad diferencial a inundaciones en el sureste de la provincia de Córdoba.

PELIGROSIDAD A INUNDACIONES

Delimitación de macro-ambientes por peligrosidad hídrica

La integración de lo trabajo anteriormente permitió delimitar cuatro macro-ambientes en el área de estudio (figura 4), ellos son:

a) el sector oeste (P) afectado por inundaciones no vinculadas directamente al río Quinto, caracterizado por endorreísmo e intensos procesos de salinización pos-eventos de inundaciones. Las localidades incluidas en este macro-ambiente son Pincén e Italó;
b) dos áreas de transición a ambos lados del río Quinto. Estos sectores, en eventos de máximas inundaciones, reciben aportes tanto de otras cuencas como de desbordes del río Quinto, por lo que revisten diferentes grados de salinización post-inundaciones en función del origen de los aportes. El área T2 se diferencia

de T1 por estar vinculada a los vestigios de los bañados de La Amarga, que ingresan como cuña en el sector norte del área de estudio;

c) en el área específicamente relacionada al río Quinto (R), la inundación se produce por desbordes del mismo, muchas veces vinculados tanto a la pérdida de capacidad transporte de los cauces como de retención de aguas de las lagunas, producto de su colmatación con sedimentos. A diferencia de las anteriores la recuperación pos-inundación es inmediata. Incluye el norte de la localidad de Jovita y la comuna de Onagoity;

d) por último, se delimitó el macro-ambiente S, en el cual se encuentra la localidad de Buchardo, y está vinculado a desbordes de la laguna El Siete o La Amarga - ubicada al norte de Serrano- y a precipitaciones locales. Posee menos problemas de salinización del suelo, siendo ésta más puntual que regional.

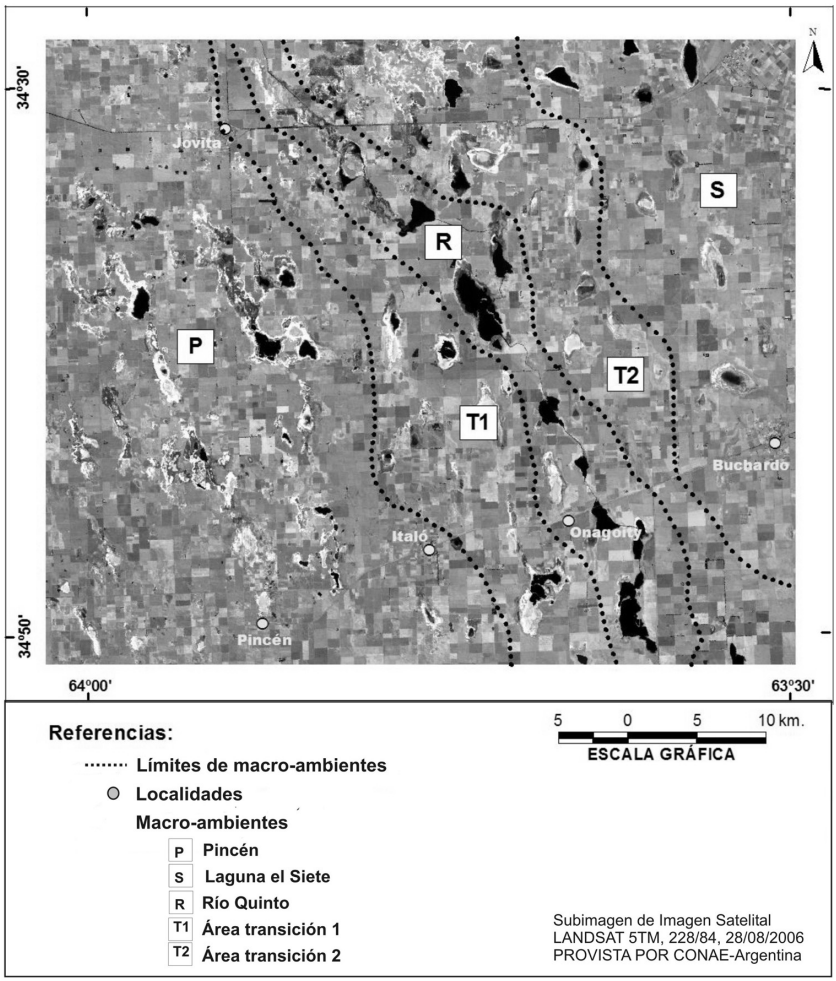

Figura 4 - Delimitación de macro-ambientes por peligrosidad hídrica en el área de estudio (Córdoba, Argentina)
Fuente: elaboración propia.

Mapa de peligrosidad a inundaciones

Como resultado final del análisis realizado se elaboró el mapa de peligrosidad a inundaciones en el área de estudio (figura 5). Para la construcción del mismo se consideraron específicamente: la clasificación de suelos en función de su capacidad y limitaciones (INTA y Agencia Córdoba Ambiente, 2000, 2004); los resultados del análisis digital de imágenes satelitales; y, el mapa de amenaza elaborado por Estruch et al (1999).

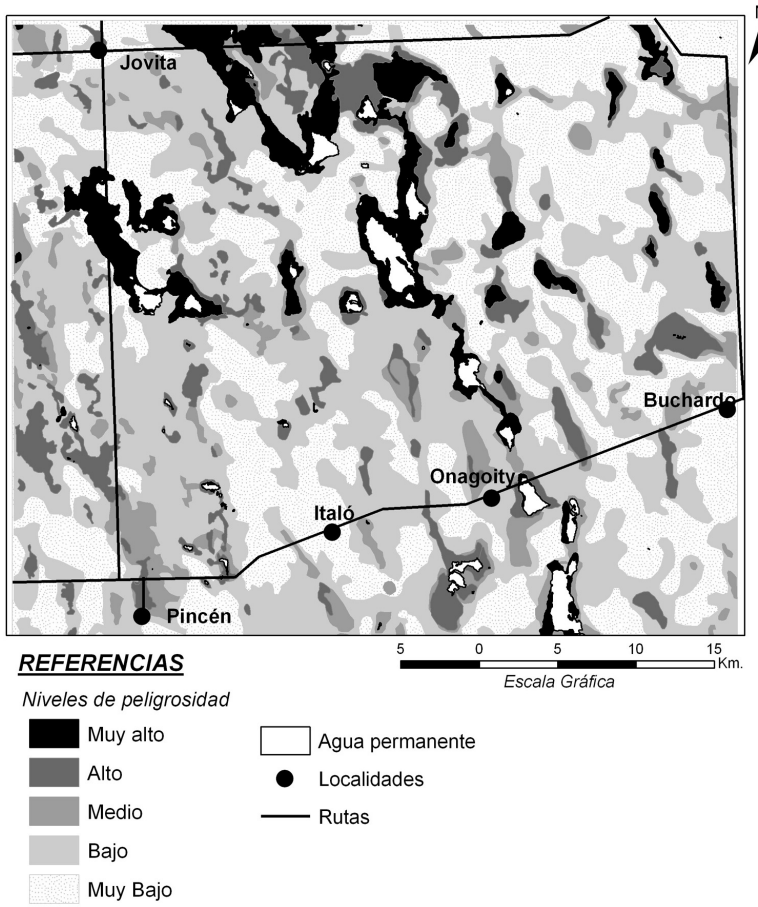

Figura 5 - Mapa de niveles de peligrosidad a inundaciones en el sureste de Córdoba, Argentina
Fuente: elaboración propia.

El peligro o amenaza a inundaciones se diferencia en cinco categorías: *Muy Alta, Alta, Media, Baja y Muy Baja*, representados en escala de grises. Asimismo se presenta como entidad poligonal diferenciada lo que se determinó como *Agua Permanente.* A continuación se describen los criterios de selección y las características principales de cada nivel de peligrosidad:

- *Agua Permanente*. Se determinó como *agua permanente* los sectores que fueron reconocidos dentro de esta categoría en el análisis digital de imágenes satelitales. En las cartas de suelo la superficie delimitada como Lagunas y Bañados es significativamente mayor pero puesto que, por medio de canalizaciones autorizadas o no autorizadas, se han modificado situaciones puntuales, se considera más oportuna la delimitación de esta entidad en base a la determinación de superficies de agua en el terreno reconocida a través de las imágenes. La mayor parte del agua permanente se encuentra en la serie de lagunas interconectadas que conforman el río Quinto y en un sector muy pequeño localizado al centro-oeste del área de estudio, que se conoce en la región con el nombre de "bajo de Güemes".
- *Muy alta peligrosidad*. Puesto que restan superficies importantes que no han sido determinadas como *agua permanente* pero han sido clasificadas como *Lagunas y Bañados* por las cartas de suelo, éstas fueron asignadas al nivel correspondiente a la máxima peligrosidad, en función de que: a) las cartas de suelo consideran estos sectores como no aptos para uso agropecuario; b) como resultado del análisis digital de imágenes los mismos se clasificaron de alta peligrosidad preliminar; y, c) en el trabajo de Estruch et al se asigna a estos sectores la categoría de Muy alto o Alto riesgo. Se observa la máxima concentración al este de la localidad de Jovita, en el extremo sur de los bañados de La Amarga y abarcando los márgenes de algunas lagunas del río Quinto. El segundo sector de mayor relevancia corresponde al área circundante al "bajo de Güemes" y, una superficie menor se localiza al noreste del área de estudio, en el macro-ambiente vinculado a los desbordes de la laguna El Siete o La Amarga.
- *Alta peligrosidad*. Se definió en función de aquellas zonas que se clasificaron, en el análisis digital de imágenes, como alta o media peligrosidad y coinciden con suelos que presentan limitaciones tanto dentro de la zona radical como por exceso de agua. Estos sectores, además de rodear en gran parte las superficies correspondientes al nivel anterior, se localizan en pequeñas porciones en la totalidad del área de estudio, incluido el espacio inmediatamente al norte de la localidad de Jovita.
- *Medio*. Corresponden a aquellos sectores que hayan sido determinados de alta o moderada peligrosidad en el análisis digital de imágenes satelitales y que coincidan con la superficie determinada por Estruch et al de Moderado riesgo. Son áreas donde la aparición de superficies con agua, en muchos casos, ocurre en porciones aisladas. Presentan limitaciones al uso del suelo de diversos tipos y su capacidad, en todos los casos, varía entre VI y VIII. Se encuentra en la totalidad del área de estudio, en superficies de diversas magnitudes, algunas asociadas a niveles de peligrosidad superiores. Interesa destacar que tanto al norte de la localidad de Pincén como de la localidad de Onagoity se presentan sectores de peligrosidad media.
- *Bajo*. Representan áreas que han sido esporádicamente ocupadas por pequeñas superficies de agua que no llegan a formar una laguna, presentándose como pequeñas manchas dispersas. Han sido reconocidas en imágenes satelitales en no más de dos escenas, pueden pertenecer a diversas capacidades y limitaciones de suelo y, en su mayoría, fueron determinadas por Estruch et al como de Bajo o Moderado riesgo. Están representadas de color verde oscuro y comprenden la mayor superficie del área de estudio.
- *Muy Bajo.* El área restante, no incluida en ninguna de las otras categorías, se las clasificó como de muy baja peligrosidad. No se han detectado superficies de agua en las imágenes satelitales y en general predominan suelos con capacidad de uso tipo III. Las localidades de Italó y Buchardo se encuentran rodeadas se sectores de muy baja peligrosidad.

En el mapa elaborado se puede observar que gran parte del área de estudio posee desde niveles medios a muy altos de peligrosidad a inundaciones, por lo que la amenaza analizada no constituye una excepcionalidad en el sureste de la provincia de Córdoba.

Los sectores con niveles de *muy alta y alta peligrosidad* han sido determinados en casi la totalidad de las imágenes satelitales, por lo que en años de excedentes de precipitaciones no necesariamente extremos se encuentran afectados por inundaciones, con el mínimo período de recurrencia. Tanto los niveles *medio* como *bajo* son afectados por eventos de inundación de mayor magnitud, como los ocurridos en el año 1987 y, sobre todo el nivel bajo, en el período 1997-2001, máximo evento registrado en los 20 años de análisis de imágenes satelitales y en los 30 años de determinación de excedentes de precipitaciones (ver apartado siguiente). En consecuencia, la probabilidad de ocurrencia de inundaciones con estas características es significativamente más baja, puesto que está asociada a precipitaciones que superen ampliamente la media regional y que tengan una continuidad temporal que abarque más de dos años. Se registran, a lo largo del siglo XX, sólo dos eventos que poseen estas características.

Los resultados obtenidos y presentados en el mapa de peligrosidad a inundaciones deben ser articulados con los macro-ambientes delimitados anteriormente, ya que la recuperación de la capacidad productiva del suelo pos-evento de inundación de un sector determinado, con cualquier grado de peligrosidad, será diferente en función del macro-ambiente en que se localice.

ANÁLISIS DE EXCEDENTES DE PRECIPITACIONES Y DÉFICIT HÍDRICOS

A fin de poder determinar el excedente de agua precipitada en el área de estudio se aplicó el método Thornthwaite seriado, para todos los meses, entre los años 1975 y 2005 en las estaciones de Jovita, Italó, Buchardo y Pincén. Luego, los resultados por estación fueron agrupados a nivel regional, mediante la determinación de la media ponderada en función de la superficie de influencia de las distintas estaciones. El factor de ajuste que se utilizó para la Evapotranspiración Potencial Computada (coeficiente k) es para 30° de latitud sur y, la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo se estableció en función de las cartas de suelo de Jovita y Buchardo, en 150mm. Por último, los datos de temperatura media mensual que se utilizaron corresponden a la estación agro-meteorológica de la Universidad Nacional de Río Cuarto, con medias mensuales calculadas para todos los años del período trabajado.

El índice de Thornthwaite, basado en el desarrollo de numerosos experimentos (ORSOLINI et al, 2000), considera que la evapotranspiración potencial (ETP) en un mes determinado es producto de una relación entre la temperatura media y las horas de insolación -en función de la latitud-. Una vez calculada ETP, se debe determinar la evapotranspiración real (ETR) y establecer si se registra excedente o déficit hídrico.

Vale la pena aclarar que la determinación de excedentes y déficit se realiza bajo el supuesto de que la totalidad del área es homogénea, de que todos los tipos de suelo tienen la misma capacidad de absorción y retención del agua y de que, cuando se registran excedentes, éstos no se concentran en determinados sectores sino que están distribuidos homogéneamente.

En función de lo observado en el análisis digital de imágenes satelitales y en los trabajos de campo, se consideró necesario realizar una modificación en el tratamiento de los excedentes obtenidos. En la aplicación del método Thornthwaite los excedentes existentes en un mes determinado no son incorporados en los cálculos del mes siguiente. Debido a las características topográficas del área de estudio, a la inexistencia de una red de drenaje definida, al endorreísmo y, por consiguiente, al predominio del movimiento vertical del agua, se considera que si en un mes determinado se registra excedente de agua, disponible para escurrir, puesto que esta no escurre o lo hace muy lentamente, al mes siguiente parte importante de ese excedente continua en el sistema, por lo que debe ser considerado en los

cálculos posteriores. Para la incorporación de parte del excedente se optó por la propuesta realizada por Bruniard (1992) quién estima que del total de excedente en un mes determinado, un tercio llega al colector principal de agua -sale del sistema-, mientras que los otros dos tercios restantes permanecen en el sistema y se adicionan a los excedentes del mes siguiente.

Con la modificación propuesta se pretende aproximar los cálculos realizados a lo observado en el terreno. En las figuras 6a y 6b se presentan los resultados obtenidos, para la media regional ponderada, por la aplicación del método Thornthwaite en sus dos versiones. Se puede observar que la modificación implementada prolonga los efectos de los excedentes, lo que se considera más cercano a lo que sucede en la región.

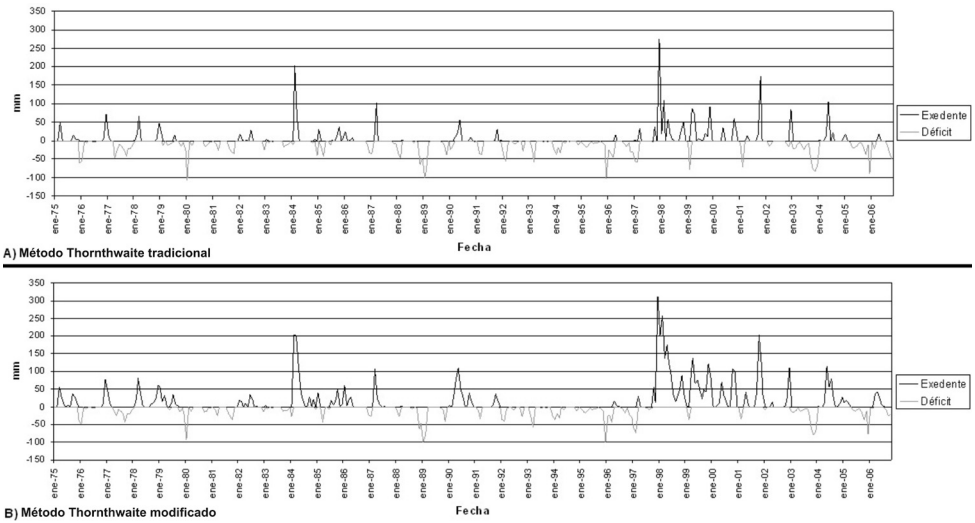

Figura 6 - Excedentes y déficit hídrico para el área de estudio (Córdoba, Argentina), años 1975-2006. Método Thornthwaite tradicional (a) y modificado. (b)

Fuente: elaboración propia en base a datos de precipitaciones suministrados para las cuatro estaciones y de temperaturas de Río Cuarto suministrados por la UNRC.

Se observa que en la totalidad del período bajo estudio se registra una sucesión de años con déficit y excedentes hídricos. En la totalidad de la región, el período que se destaca por los excedentes mensuales de precipitaciones y la continuidad temporal es el comprendido entre diciembre de 1997 y enero de 2002. El segundo período en importancia es el comprendido entre los años 1984 y 1986, con cuatro leves picos en los años 1975-1976; 1978; 1990-1991 y 2004. El período de déficit hídrico más prolongado se registra justamente antes del más importante en cuanto a excedentes, entre los años 1991 y fines de 1997; siguen en importancia el período entre los años 1970 y 1982; mediados de 1987 y fines de 1989 y desde mediados de 2005.

RELACIÓN ENTRE PRECIPITACIONES, EXCEDENTES Y SUPERFICIES DE AGUA

Puesto que una variable importante a ser considerada para el estudio de las inundaciones es la concentración de las precipitaciones en períodos temporales breves, se establecieron las precipitaciones acumuladas en un mes, dos meses y cuatro meses en la totalidad del registro, siguiendo la propuesta de Varni et al (2005, 2006). La acumulación máxima elegida es de 120 días (4 meses) ya que se considera que al finalizar este lapso de tiempo las condiciones del suelo son independientes de las condiciones dadas al inicio del periodo (Varni et al 2005, 2006).

Para el análisis de la relación entre las precipitaciones, los excedentes de precipitaciones y las superficies de agua determinadas sobre imágenes satelitales, se extrajeron las precipitaciones acumuladas en un mes, dos meses y cuatro meses previos a la fecha de adquisición de las imágenes satelitales. Lo mismo se realizó con los excedentes de precipitaciones determinados previamente con el método de Thornthwaite modificado, extrayendo los excedentes acumulados con la misma escala temporal que las precipitaciones, a fin de poder realizar una comparación lineal entre estos datos y los datos de superficie anegada. De toda la información previamente analizada se derivan las figuras 7 y 8.

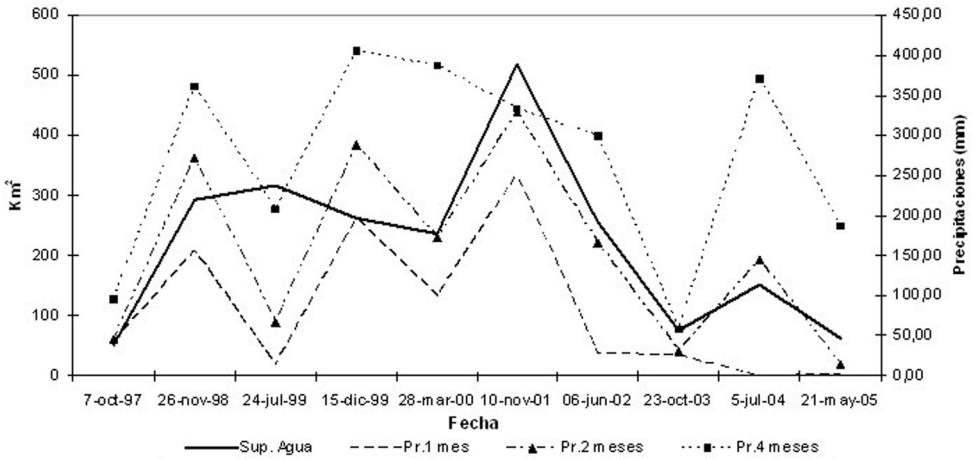

Figura 7 - Relación entre superficies con agua y precipitaciones un mes, dos meses y cuatro meses antes de la fecha de adquisición de la imagen satelital. Área de estudio (Córdoba, Argentina)

Fuente: elaboración propia.

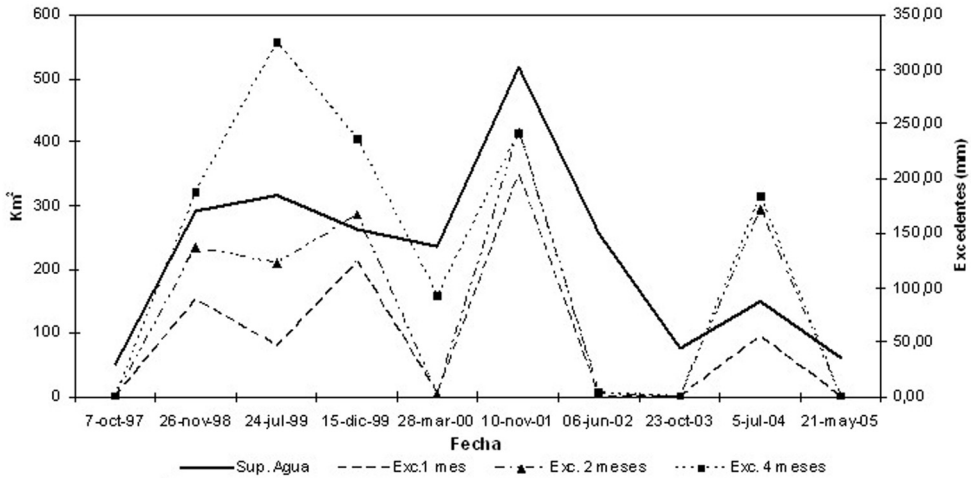

Figura 8 - Relación entre superficies con agua y excedente de precipitaciones un mes, dos meses y cuatro meses antes de la fecha de adquisición de la imagen satelital. Área de estudio (Córdoba, Argentina)

Fuente: elaboración propia.

En los años analizados en los gráficos se desprende una fuerte linealidad entre las superficies anegadas y las precipitaciones y excedentes un mes y dos meses antes de la fecha de adquisición de la imagen. Dicha relación no es tan lineal para el caso de las precipitaciones y excedentes acumulados cuatro meses antes.

DISCUSIÓN FINAL

La propuesta desarrollada en las líneas anteriores tiene por objetivo realizar un acercamiento significativo a la comprensión de la dinámica de las inundaciones en el sureste de Córdoba con datos e información que, generalmente, existe y es accesible. Del análisis de los resultados obtenidos se desprende lo siguiente:

1) Los eventos de inundaciones en el sureste de Córdoba tienen una recurrencia relativamente elevada, con eventos de diferente magnitud, según se observa en los excedentes hídricos calculados con el método Thornthwaite modificado.
2) Existe una fuerte linealidad entre las precipitaciones acumuladas uno y dos meses antes de la adquisición de una imagen satelital y la superficie de agua determinada sobre ésta. En igual sentido, la misma linealidad se registra entre los excedentes hídricos determinados uno y dos meses antes.
3) En función de lo concluido en el punto anterior, se puede afirmar que la principal fuente de agua que ingresa en el área de estudio, y se conjuga con otros factores produciendo eventos de inundaciones, son las precipitaciones que ocurren en lugar.

En cuanto al mapa de peligrosidad elaborado, éste se constituye en un esfuerzo de síntesis de la recopilación, sistematización y análisis de los datos relevados para el análisis e

interpretación de la peligrosidad. El mismo amplia el nivel de detalle presentado previamente por Estruch et al (1999) -aunque a grandes rasgos resulta compatible con el mismo- por lo que permite situar con mayor precisión las localidades e infraestructura del área de estudio en el contexto de la problemática de las inundaciones. Asimismo se puede observar que los niveles de peligrosidad de medios a muy altos ocupan una superficie importante del área de estudio.

En síntesis, la aplicación de la metodología propuesta y los resultados obtenidos permitieron determinar niveles de peligrosidad diferencial a inundaciones y establecer su principal causa: la ocurrencia de precipitaciones excedentes en la región –no se deben perder de vista las continuas intervenciones territoriales acontecidas en el devenir histórico de producción del espacio-. Esta conclusión no es un detalle menor cuando se analizan las respuestas brindadas desde distintos ámbitos para paliar la amenaza a inundaciones en el área de estudio. La mayor parte de las éstas corresponden a obras hídricas tendientes a regular el caudal del río Quinto e incrementar la capacidad de retención de las lagunas interconectadas que conforman su cauce en el área de estudio. Sin embargo, en la pedanía de Italó la superficie afectada por desbordes del río Quinto es significativamente menor a la superficie afectada por las precipitaciones ocurridas en el lugar. A pesar de ello, las obras hídricas desarrolladas se presentan como la solución definitiva a la amenaza de inundaciones. Incomprendido el origen y dinámica de los eventos de inundaciones, la gestión y la construcción de propuestas de intervención territorial que presenten como objetivo disminuir el riesgo pueden terminar por potenciar una reiteración sistemática de catástrofes.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece especialmente a la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE), por la provisión de imágenes satelitales por intermedio de un convenio marco con la Universidad Nacional de Río Cuarto (UNRC).

REFERENCIAS

BATES, P.; HORRITT, M.; SMITH, C.; MASON, D. Integrating remote sensing| observations of flood hydrology and hydraulic modelling. **Hydrological Processes,** Londres, v. 11, n. 14, p. 1777-1795, 1997.

BRUNIARD, E. **Hidrografía.** Procesos y tipos de escurrimiento superficial. Buenos Aires, Argentina: Editorial Ceyne, 1992. 121p.

COLBY, J. D.; MULCAHY, K. A.; WANG, Y. Modeling flooding extent from Hurricane Floyd in the coastal plains of North Carolina. **Environmental Hazard,** Amsterdam, v. 2, n. 4, p. 157-168, 2000

ESTRUCH, J.; ROMERO, M.; RUBIOLO, J. **Estudio del nivel freático en las localidades con problemas de absorción del subsuelo del sur cordobés**. Córdoba. Argentina: Publicación especial del Instituto de Estudios cooperativos, 1999. 103p.

FRAZIER, P. S.; PAGE, K. J. Water body detection and delineation with Landsat TM data. **Photogrammetric engineering and remote sensing**, Estados Unidos, v. 66, n. 12, p. 1461-1467, 2000.

HUDSON, P. F.; COLDITZ, R. R. Flood delineation in a large and complex alluvial valley, lower Pánuco basin, Mexico. **Journal of Hydrology,** Amsterdam, v. 280, n. 1-4, p. 229-245, 2003.

INTA y AGENCIA CÓRDOBA AMBIENTE. **Carta de suelos de la República Argentina. Hoja 3563-14 Buchardo.** Córdoba, Argentina: INTA-ACA, 2000. Escala 1:50.000.

INTA y AGENCIA CÓRDOBA AMBIENTE. **Carta de suelos de la República Argentina. Provincia de Córdoba. Hoja 3563 Jovita**. Córdoba, Argentina: INTA-ACA, 2004. Escala 1:50.000. 1 CD-Rom.

MUNYATI, C. Wetland change detection on the Kafue Flats, Zambia, by classification of a multitemporal remote sensing image dataset. **International Journal of Remote Sensing**, Londres, v. 21, n. 9, p. 1787-1806, 2000.

ORSOLINI, H.; ZIMMERMANN, E.; BASILE, P. **Hidrología. Procesos y métodos**. Rosario, Argentina: UNR Editora, 2000. 318p.

PAOLI, C.; GIACOSA, R. Características hidrológicas de la llanura pampeana central oeste (áreas de derrames del Río Quinto y arroyos del sur de Córdoba. En: Maiola, O., Gabellone, A. y Hernández, M. (Ed.). **Inundaciones en la Región Pampeana.** La Plata, Argentina: Editorial de la Universidad Nacional de La Plata, 2003. Capítulo 4, p. 73-86.

VARNI, M.; ENTRAIGAS, I.; GIANDINI, M. Propuestas de dos métodos para el mapeo de áreas anegadas utilizando condiciones hidrológicas cuantificables. **GeoFocus,** España, n.6, p. 33-46, 2006.

VARNI, M.; GIANDINI, M.; ENTRAIGAS, I.; VÁZQUEZ, P. Propuesta y comparación de metodologías para la determinación y mapeo de áreas anegadas mediante el uso de imágenes Landsat. En: *CONAGUA 2005*. Mendoza. Argentina. Mayo de 2005. **Anales del XX Congreso Nacional del Agua**. Mendoza, Argentina: Dpto. Gral de Irrigación, 2005. 1 CD-Rom.

WANG, Y., COLBY, J. D. y MULCAHY, K. A. An efficient method for mapping flood extent in a coastal floodplain using Landsat TM and DEM data. **International Journal of Remote Sensing**, Londres, v. 23, n. 18, p. 3681-3696, 2002.

WANG, Yong. Mapping Extent Floods: What we have learned and how can do better. **Natural Hazard Rev.**, Estados Unidos,v. 3, n. 2, p. 68-73, 2002.

Recebido em agosto de 2011

Aceito em novembro de 2011