

Dinámica de las inundaciones en las cuencas del departamento Maracó (La Pampa)

AUTORES

Lorena Verónica Carreño, Zinda Edith Roberto y Fabián Néstor Cabria



Ministerio de Agricultura,
Ganadería y Pesca
Argentina

INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGÍA AGROPECUARIA
Centro Regional La Pampa-San Luis
Estación Experimental Agropecuaria Anguil "Ing. Agr. Guillermo Covas"

Este trabajo es parte de la tesis de Maestría en Manejo y Conservación de Recursos Naturales para la Agricultura, Orientación: Agroecosistemas. Área Ciencias de las Plantas y Recursos Naturales. Fac. de Cs. Agrarias (UNMDP) de la primera autora.

AGRADECIMIENTO: Los autores agradecen a Francisco Babinec y Alberto Quiroga, de la EEA INTA Anguil, por la revisión del trabajo.

También se agradece la colaboración del proyecto disciplinario (PD I044) "Napas y Agroecosistemas", por brindar los recursos requeridos para la impresión de ejemplares de la presente publicación.

IMAGEN DE TAPA: "Paisaje con campos inundados", obra del pintor impresionista francés, Camille Pissarro (1830-1903).

Diseño Gráfico

Dis. Gráf. Francisco Etchart

Noviembre de 2020



EDICIONES INTA

Centro Regional La Pampa-San Luis
EEA INTA Anguil "Ing. Agr. Guillermo Covas"
RN N°5 Km 580, CP 6326, Anguil, La Pampa, Argentina

Resumen

Las inundaciones son procesos, fundamentales en el mantenimiento de humedales y ecosistemas costeros, tal como lo son el flujo de energía y el ciclo de nutrientes. En el caso de agroecosistemas, estas perturbaciones naturales causan efectos apreciables tanto sobre las comunidades vegetales y animales, como sobre los asentamientos urbano-rurales presentes en la región, afectando la economía, el transporte y la infraestructura local asociada a los mismos. Particularmente en el caso del NE de La Pampa, durante los años 1999 y 2001, se registraron precipitaciones extraordinarias, que dieron lugar a situaciones de inundación y anegamiento severos afectando una amplia superficie productiva. Otra situación similar ocurrió durante el otoño del año 2017. En este contexto de dinamismo constante del paisaje pampeano, las imágenes satelitales acopladas a un entorno SIG, proporcionan una herramienta adecuada para el estudio de la evolución de las áreas anegadas. Esta y otras capas de información permitirían desarrollar sistemas de prevención, seguimiento y evaluación a diferentes escalas espaciales y temporales. En este trabajo se evaluó a través del análisis de imágenes satelitales, la dinámica de las inundaciones en dos cuencas del departamento Maracó durante el período comprendido entre 1993 y 2017. Para completar el estudio se evaluaron registros de precipitaciones, niveles freáticos, excesos hídricos y uso de la tierra (uso consuntivo). Si bien la máxima superficie inundada ocurrió en la primavera del año 2001 para ambos casos, en la cuenca con tosca ("Oeste") la superficie inundada en términos relativos fue superior en casi todo el período, situación muy evidente en el

período de inundación 1999-2002 (excepto en la inundación 2016-2017 donde la cuenca "Este" resultó más afectada). Al menos hay dos factores que pueden explicar la diferencia de permanencia del agua en la superficie del suelo, entre las cuencas "Este" y "Oeste": 1) la diferencia textural y, 2) la profundidad de la tosca. La relación entre la lluvia caída 15, 30, 60 y 90 días antes de la fecha de la imagen satelital y la superficie inundada, presentó mejor ajuste con la lluvia acumulada de 60 días, que explica algo más del 25% de la ocurrencia de las inundaciones. Hay una clara tendencia de aumento de la superficie destinada a cultivos, acompañado de una disminución de la superficie destinada a pasturas para ambas cuencas, lo que se refleja en una disminución del uso consuntivo anual que realiza la vegetación. Es decir, el cambio en el uso de la tierra en los últimos años hacia especies que evapotranspiran menor cantidad de agua (dejando, por lo tanto, un volumen mayor disponible en el perfil del suelo), facilitaría la posterior ocurrencia de inundaciones cuando se manifiestan las precipitaciones. Sin embargo, esto no se reflejó claramente en un ascenso del nivel freático en el segundo período de inundación, como era de esperarse. Evidentemente, los niveles freáticos no responden de manera clara y rápida a las precipitaciones y uso de la tierra local, sino que presentan una dinámica mucho más compleja, cuyo estudio excede los alcances del presente trabajo.

Palabras clave: *anegamiento, exceso hídrico, nivel freático, precipitación, riesgo*

Introducción

La palabra **dinámica** proviene del griego *dynamis*, que significa fuerza, potencia. Por su parte, en el campo de la física, la dinámica analiza y describe cómo evoluciona un sistema en un cierto periodo temporal según aquellas causas que producen cambios en su estado. Teniendo en cuenta esto, se optó por incluir el término en el título del presente trabajo, ya que incorpora la noción de cambio tanto a nivel espacial como temporal de la variable en estudio, en este caso, la superficie inundada.

Las **inundaciones** constituyen procesos esenciales como lo son el flujo de energía y el ciclo de nutrientes, fundamentales en el mantenimiento de humedales y ecosistemas costeros. Sin embargo, cuando nos referimos a agroecosistemas, estas perturbaciones naturales causan efectos apreciables tanto sobre las comunidades vegetales y animales, como sobre los asentamientos urbano-rurales presentes en la región, afectando la economía, el transporte y la infraestructura local asociada a los mismos (Aragón et al. 2010).

Moncaut (2001) realizó un interesante trabajo cualitativo al reconstruir y compilar los episodios de inundación y sequía ocurridos entre los años 1576-2001 en la región pampeana, dejando en claro que las inundaciones siempre se han repetido de forma cíclica en el tiempo. No obstante, a partir de la década del 70 se advierte, en gran parte del territorio argentino, el ingreso a un ciclo climático húmedo, el cual se caracteriza por un marcado aumento en las precipitaciones que se manifiesta a partir de eventos que aportan grandes volúmenes de agua que superan a lo observado en registros históricos. Los recurrentes episodios de anegamiento que fueron sucediendo en consecuencia, han afectado una vasta extensión de tierras agropecuarias en la llanura pampeana. Aunque las causas y mecanismos no han sido estudiados en detalle, los anegamientos están explicados en parte por el relieve plano o deprimido de esas tierras, lo cual limita la evacuación rápida de volúmenes importantes de agua (Fuschini Mejía 1994). En gran parte de la región, también existen

evidencias de un incremento tanto en la recarga subterránea como en la escorrentía superficial.

Particularmente en el caso del NE de La Pampa, durante los años 1999 y 2001, se registraron precipitaciones extraordinarias que dieron lugar a situaciones de inundación y anegamiento severos afectando una importante superficie productiva. El incremento de las precipitaciones, agravado por la escasa pendiente del terreno, provocó la inundación y anegamiento de vastas extensiones, siendo los departamentos más afectados de la provincia de La Pampa: Capital, Catrileo, Chapaleufú, Conhelo, Maracó, Quemú-Quemú, Realicó y Trenel (Martínez Uncal 2015). Otra situación de anegamiento de tierras ocurrió desde la primavera de 2016 hasta la primavera de 2017. Hacia octubre de 2016 se registraron en la provincia de La Pampa precipitaciones por encima de la media, debido al efecto "Niño" presente en la región desde el verano anterior (Vázquez 2017). Posteriormente, entre el 26 de marzo y el 30 de abril de 2017 llovieron 650 mm en los departamentos del Noreste y Este provincial (esto siempre en términos generales). Las lluvias consideradas ocurrieron sobre un suelo ya seco, pero con un nivel freático muy elevado y entrando en el otoño, lo cual agravó la situación. Un informe técnico de la estación experimental Anguil del INTA (Vázquez 2017), indicó una superficie inundada de alrededor de 600.000 has para el NE provincial y de 1.400.000 has anegadas. El mismo informe indicó que el 50% de la tierra apta para la agricultura se vio afectada directamente por el desastre natural, mientras que la restante superficie (principalmente lomas) era inaccesible por la imposibilidad de transitar por caminos y potreros.

Por lo tanto, una de las zonas más recurrentemente afectadas por las inundaciones en la provincia, es la denominada *Región Fisiográfica Oriental con régimen hídrico subhúmedo – seco*, específicamente dos de sus cuatro subregiones: **Planicies Medanosas** y **Planicies con Tosca** (INTA et al. 1980). Esta fue la zona geográfica comprendida en el presente estudio.

Los **objetivos** de este trabajo fueron: a) monitorear la evolución de las áreas inundadas en dos cuencas del NE de la provincia de La Pampa durante un período de 25 años (1993-2017); b) analizar la relación existente entre área inundada, precipitaciones, niveles freáticos, excesos hídricos y uso de la tierra; c) determinar el área máxima inundada del período y; d) elaborar un mapa de riesgo de inundación (probabilidad) a escala de lote catastral. Este último punto es muy importante ya que en la zona de estudio muchos productores poseen explotaciones que se encuentran por debajo de la unidad económica que, sumado a la pérdida del área productiva provocada por las inundaciones, agrava la problemática.

Materiales y Métodos

1. Área y período de estudio

Para determinar el *área de estudio* se utilizó el Modelo Digital de Elevación (MDE) corregido de 30 m del Instituto Geográfico Nacional (IGN), que se descarga de manera libre y gratuita desde el sitio <http://www.ign.gov.ar/>. Se utilizaron 12 sectores del MDE SRTM (formato .img) del mosaico que conforma al territorio de la República Argentina. Al mosaico generado se le aplicó el módulo SEXTANTE-Análisis Hidrológico Básico del gvSIG (versión ejecutable 1.1.2) para crear las cuencas. Es un algoritmo que utilizando la red de drenaje (previamente calculada con el mismo módulo),

elabora los límites geográficos de las diferentes cuencas presentes en el área de estudio.

Disponiendo de esta información se seleccionó un área para realizar el presente estudio, localizándose la misma en el NE de la provincia de La Pampa la cual comprende a dos cuencas: una ubicada en la Subregión de la planicie medanosa (412.232 has) y otra, en la Subregión planicie con tosca o costra calcárea (144.467 has). El área total estudiada entonces, abarca una superficie de alrededor de 556.700 has ubicándose dentro de los límites del path/row 228/85 (órbita de Landsat). Por lo tanto, el único distrito político abarcado en su totalidad por ambas cuencas es el departamen-

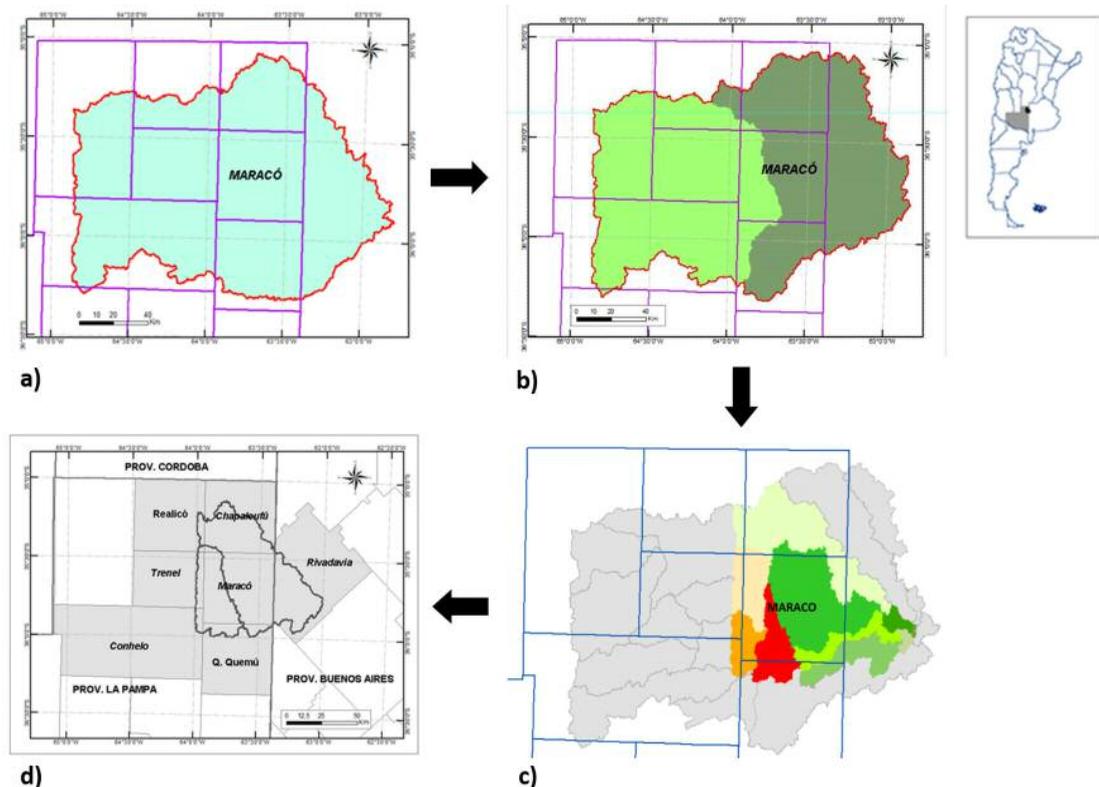


Figura 1: a) Cuenca hidrográfica del NE de la Provincia de la Pampa generada a partir del módulo SEXTANTE del gvSIG con la información altimétrica de teselas del MDE Shuttle Radar Topography Mission - NASA que suministra el IGN; b) Subcuenca Este (verde oscuro) y subcuenca Oeste (verde claro) que componen la cuenca hidrológica NE de la Provincia de La Pampa; c) Microcuencas del departamento Maracó (en tonalidad rojo las de la Subcuenca Oeste y en tonalidad verde las de la Subcuenca Este) y; d) Localización geográfica del presente estudio.

to Maracó, comprendiendo de forma parcial a los restantes. De aquí es que se llamó cuencas del departamento Maracó al área de estudio del presente trabajo. En esta decisión, también se tuvo en cuenta la disposición de información de las restantes variables estudiadas (precipitación, profundidad de los niveles freáticos, balance hídrico, uso de la tierra, uso consuntivo).

La Figura 1 muestra la secuencia generada para la determinación del área de estudio: a) la gran cuenca, b) subcuenca Este y Oeste, c) microcuenclas de las subcuenclas Este y Oeste y, d) área de estudio final.

Los registros de lluvia histórica sirvieron de base para determinar el período de estudio, buscando incluir en el mismo, eventos de inundación. Los datos se obtuvieron de la Administración Provincial del Agua (La Pampa). Los registros recientes se adquirieron del sitio web <http://www.apa.lapampa.gov.ar/>, mientras que los primarios, ausentes en la URL especificada, se solicitaron al personal de APA. Se analizaron aquellas localidades que contaban con registros pluviométricos históricos dentro del área de estudio y sus alrededores, a saber: Agustoni, Ceballos, Dorila, General Pico, Intendente Alvear, Metileo, Monte Nieves, Ojeda, Quemú Quemú, Speluzzi, Trebolares, Vertiz y Villa Mirasol. La Figura 2 muestra la ubicación de dichas localidades dentro

del área de estudio. Nótese que algunas no están ubicadas dentro de las cuencas definidas en el paso anterior pero igualmente fueron incluidas, debido a la cercanía con el área de estudio (menor a los 30 km).

Se evaluaron y analizaron las precipitaciones históricas de la zona para determinar la situación inicial y final del período a estudiar. De acuerdo a esto, queda definido un período de 25 años (1993-2017). Se consideró situación inicial el año 1993, ya que hasta ese momento las precipitaciones registradas se ajustaban al promedio zonal histórico (728 mm). Este promedio histórico de la región se calculó con datos de Roberto y Martínez Uncal (2012), donde recopilan las precipitaciones de las localidades de la provincia de La Pampa para el período 1921-2012. A partir del año 1996 las precipitaciones en la región comienzan a incrementarse paulatinamente, superando el valor promedio para la zona hasta el año 2002 inclusive, dando como resultado un período húmedo de aproximadamente 7 años de duración. Sin embargo, es a partir de marzo de 1999 que las precipitaciones resultan de carácter extraordinario, definiendo la situación de catástrofe para la zona. A partir del año 2003, las precipitaciones comienzan a disminuir, con valores cercanos al promedio histórico zonal (exceptuando el año 2004 donde la cantidad de lluvias fue superior al promedio serial. A partir de ahí, hubo un período de años bastante secos (2005-2011), y en el año 2012 vuelven a ocurrir precipitaciones extremas, que luego decrecen a valores normales hasta el año 2015. Si bien las precipitaciones del año 2017 no fueron extraordinarias, hubo en la región ciertos episodios de inundación (otoño-invierno), razón por la cual el período finaliza en ese año (Figura 3).

2. Descripción del área de estudio

El mosaico constituido con los MDE utilizados para definir la escala espacial, sirvió además para generar las siguientes figuras descriptivas de la zona de estudio: altitud (msnm), pendientes (%), curvas de nivel (m) y, red de drenaje (Figura 4).

Como ya se mencionó en la Introducción, la zona donde se llevó a cabo el presente estudio pertenece a la Región Fisiográfica Oriental con régimen hídrico subhúmedo – seco, de la cual nos interesan dos subregiones: Planicies Medanosas y

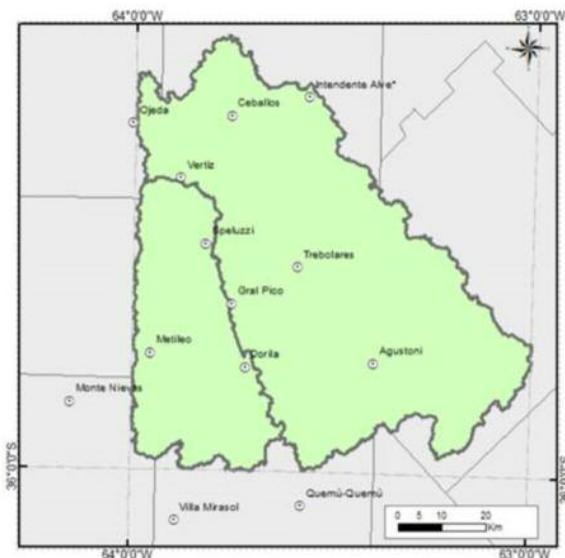


Figura 2. Localidades con registros pluviométricos históricos utilizadas para definir la escala temporal de análisis del presente estudio.

Figura 3. Promedio de las precipitaciones anuales acumuladas en milímetros de las 13 localidades con registros pluviométricos entre 1993 y 2017. La línea roja representa el promedio histórico zonal (728 mm, período 1921-2012).

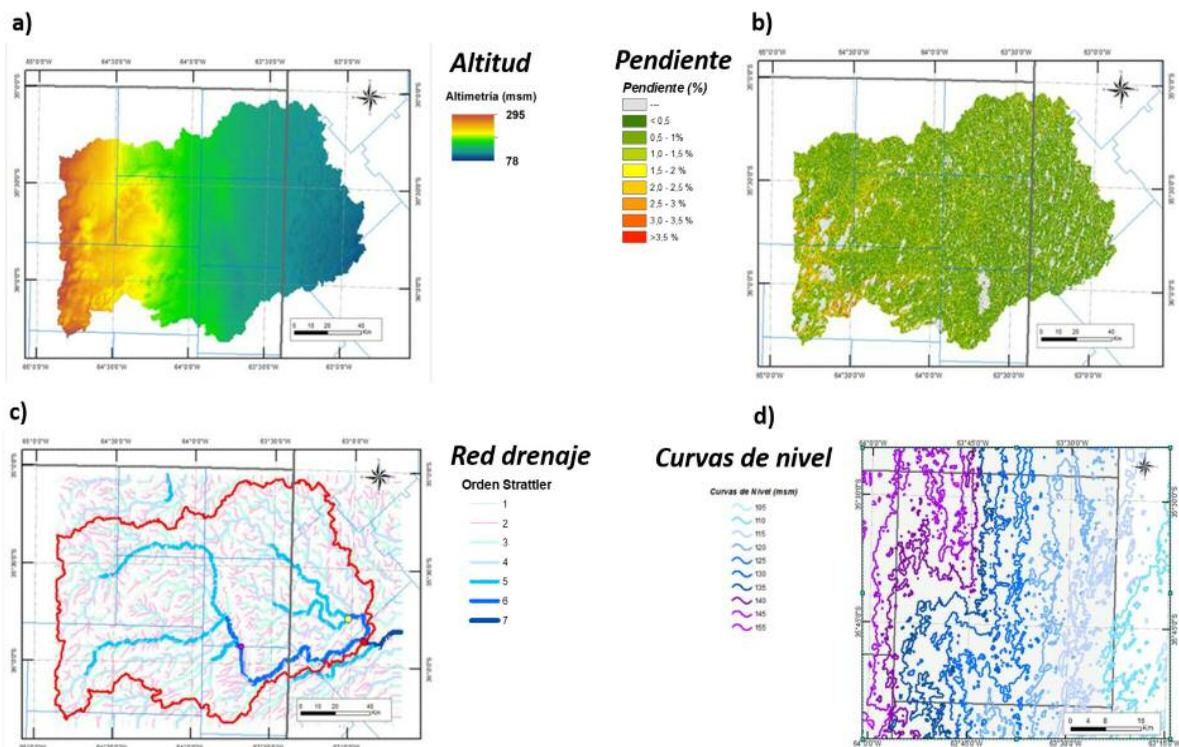
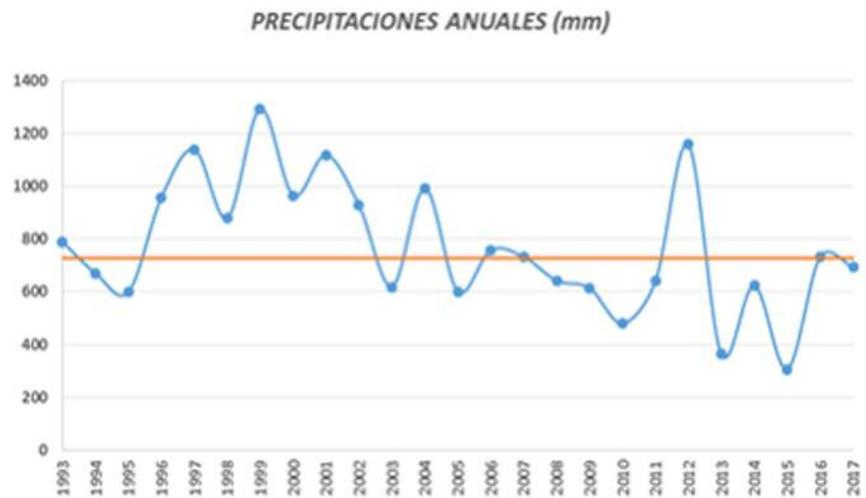


Figura 4. a) Altitudes (msnm) de la gran cuenca. Las alturas varían desde un valor mínimo de 78 m hasta un valor máximo de 295 m, creciendo en dirección Este a Oeste. Las menores alturas están representadas por tonos verdosos y azulados, mientras que las alturas mayores por tonos anaranjados y amarillos; b) Pendientes (%) del área de estudio, elaborado con el Módulo geomorfometría. Las pendientes van aumentando a medida que se pasa de una tonalidad verde-amarilla (<math>< 2\%</math>) al naranja-rojo (> 2%). Con tonalidad gris se representan las depresiones; c) Red de drenaje del área de estudio. Nótese que a medida que se engrosa la línea mayor es el flujo de agua (mayor número de orden). El punto color amarillo corresponde a la desembocadura de la subcuenca Este y el punto color rosa representa la desembocadura de la subcuenca Oeste. Por último, el punto color rojo corresponde a la desembocadura de la cuenca mayor y; d) Curvas de nivel (m) del departamento Maracó (equidistancia: 5 m). El rango de las alturas tiene una amplitud de 50 m, aumentando en dirección Este a Oeste. Las curvas de menor altura corresponden a las tonalidades celestes y azuladas, mientras que las de mayor altura se representaron con tonalidades violáceas y rosas.

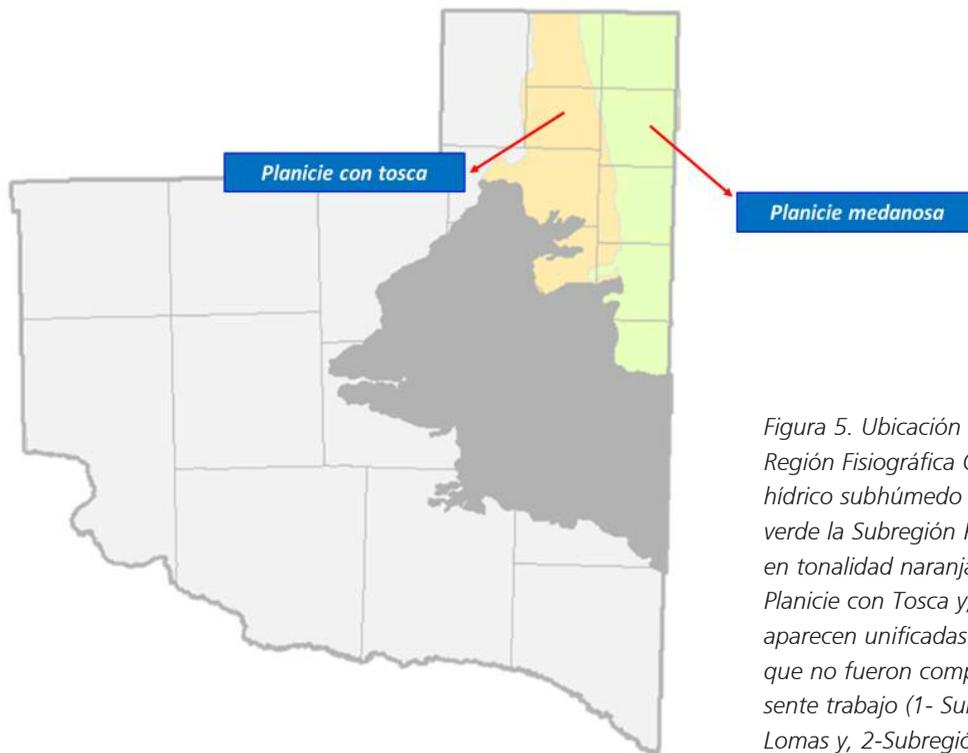


Figura 5. Ubicación geográfica de la Región Fisiográfica Oriental con régimen hídrico subhúmedo – seco. En tonalidad verde la Subregión Planicie Medanosa, en tonalidad naranja la Subregión Planicie con Tosca y, en tonalidad gris aparecen unificadas las dos Subregiones que no fueron comprendidas en el presente trabajo (1- Subregión Colinas y Lomas y, 2-Subregión Mesetas y Valles).

Planicies con Tosca (Figura 5). A continuación, se hace una breve descripción de ambas, en base al Inventario Integrado de los RRNN de la provincia de La Pampa.

Subregión Planicies Medanasas

Ubicada en el extremo NE de la provincia, con una considerable extensión en sentido N-S, pone de manifiesto claras diferencias climáticas (temperatura). El sector N posee invierno más benigno y la época estival más cálida. La ocurrencia de las primeras y últimas heladas es variable (en la zona S los cultivos de cosecha son más riesgosos). Las precipitaciones medias anuales históricas eran de 600-650mm, incrementándose en los últimos años a 700-800mm. Los vientos presentan un comportamiento similar al de toda la provincia, siendo las direcciones dominantes N-NE y S-SO.

Los procesos morfogenéticos que actuaron en esta subregión fueron fundamentalmente hídricos y eólicos. Los primeros elaboraron una superficie calcárea con pendiente regional al E y sobre ella, el viento acumuló un manto arenoso de espesor variable. El relieve es plano a suavemente ondulado. Los suelos presentan regimenes de humedad ústico, régimen de temperatura térmica y su clase, por tamaño de partícula, es franca arenosa.

Subregión Planicies con Tosca

Situada en la parte NE de la provincia, con extensión en sentido N-S donde se aprecian ciertas diferencias climáticas (temperatura). La parte N posee invierno más benigno con verano más caluroso. Las fechas medias de las primeras y últimas heladas sufren un retraso y un adelanto respectivamente de alrededor de 15 días, teniendo influencia en las fechas de siembra y cosecha. La diferencia de las lluvias entre E y O se acentúa en la parte central donde llega a ser de unos 100mm. Los vientos al igual que en la subregión “Planicies Medanasas”, tienen una predominancia en direcciones N-NE y S-SO.

Esta subregión se caracteriza por la presencia de una costra calcárea difundida y originada en épocas pasadas, donde posteriormente se depositó por acción eólica, un delgado manto arenoso. Se observa una planicie uniforme muy suavemente ondulada con una pendiente regional SO-NE, donde no se visualizan vías de drenaje de importancia. El microrelieve está compuesto por pequeñas lomas y depresiones.

En esta subregión, los cultivos cubren casi un 90% de la superficie, tanto estivales (maíz, mijo) como invernales (centeno, avena, cebada, trigo), mientras que el 10% restante está representado

por pastizales naturales, bosques de *Prosopis caldenia*, matorrales y arbustales halófilos.

3. Variables involucradas

Si bien el área de estudio definida por la aplicación del módulo hidrológico del gvSIG, abarca dos cuencas con más de 500 mil hectáreas, una limitante en el presente trabajo fueron los datos disponibles de las variables a analizar que fueron recopilados efectivamente. En lo que respecta a la determinación de la superficie inundada, mediante el análisis de imágenes satelitales, se cubrieron ambas cuencas en su totalidad. Por su parte, el análisis de las restantes variables, precipitaciones, niveles freáticos, excesos hídricos, uso de la tierra y uso consuntivo, se centró en el departamento Maracó (La Pampa). La elección del mismo tuvo que ver con dos razones a saber: por un lado, para las localidades del departamento Maracó se cuenta con los registros históricos de niveles freáticos más completos y continuos, dato que es limitante para realizar estudios con series de tiempo amplias como la que en este trabajo se propone; por el otro lado, el departamento Maracó es el único distrito político cuyo territorio está completamente situado dentro del área de la cuenca del NE de la provincia de La Pampa que comprende a las dos subcuencas que representan a la planicie medanosa y a la planicie con tosca.

Área inundada

La metodología referida al cálculo del área inundada, siguió tres pasos principales: 1) obtención y procesamiento de las imágenes satelitales, 2) cálculo del área inundada y, 3) cálculo de la evolución del área inundada. A continuación, se detalla cada uno.

1. Obtención y procesamiento de imágenes satelitales

En esta etapa se procede a obtener las imágenes satelitales correspondientes al área de estudio para el periodo comprendido entre 1993-2017. Se analizaron imágenes del satélite Landsat 5 TM (1993-2011) y Landsat 8 OLI/TIRS (2013-2017), comprendiendo siempre que fuera posible, dos imágenes por año, una en primavera y otra en otoño. La de primavera, se corresponde con la

estación de mayores precipitaciones en la región, y la de otoño donde si bien las precipitaciones son más escasas, las ETP son menores y por lo tanto pequeñas variaciones en los registros de lluvia en esta época pueden generar notables efectos sobre el terreno. La imagen utilizada corresponde al path & row 228/85 porque involucra ambas cuencas de estudio.

Es necesario aclarar que en la zona de estudio durante la primavera del año 2012 ocurrieron precipitaciones elevadas que provocaron inundaciones en algunas localidades. Sin embargo, y como ya fue explicado en la sección Materiales y Métodos esta inundación no fue analizada debido a que las imágenes Landsat 7 de ese año disponibles en los servidores gratuitos presentan un bandedo que genera gaps o líneas de ausencia de información. Con el fin de que todas las superficies de agua calculadas en esta sección sean comparables entre sí a lo largo del período de estudio, es que se optó por descartar del análisis las imágenes Landsat de ese año.

Los pasos seguidos para la obtención y procesamiento de las imágenes fueron los siguientes:

- Selección de imágenes satelitales y descarga de las mismas: luego de analizar las imágenes satelitales disponibles en el período de estudio, se seleccionaron aquellas que presentaban menor cantidad de nubes, mayor nitidez y que fueran aproximadamente de las mismas fechas para todos los años. Una vez seleccionadas, se procedió a la descarga de las mismas desde dos servidores gratuitos: a) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciales (INPE) de Brasil (<http://www.inpe.br/>), y b) Servicio Geológico de los Estados Unidos- USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov/>).
- Reproyección: las imágenes satelitales fueron re proyectadas de la proyección UTM zona 20 S (código: 32720) a coordenadas planas Gauss Krüger faja 3 (código 22183), utilizando el software libre y gratuito gvSIG (versión ejecutable 1.1.2). Esto responde a que la mayor parte de la información disponible de la provincia de La Pampa se encuentra en dicha faja.
- Recorte del área de estudio: seguidamente se procedió a utilizar el área de estudio (cuencas) como área de recorte de cada imagen (Figura 6).

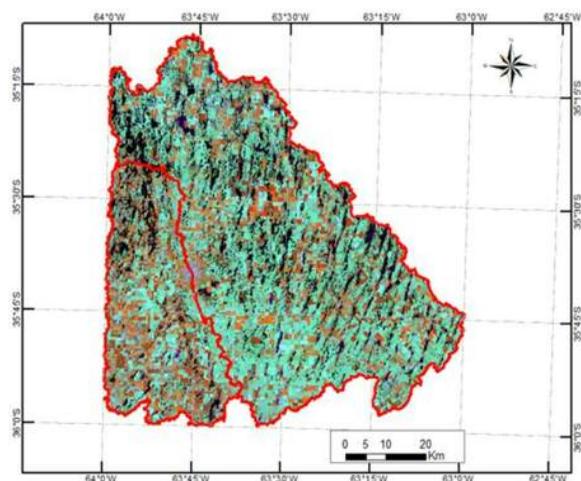


Figura 6. Cuencas utilizadas como recorte del área de estudio (subcuencas Este y Oeste que constituyen la cuenca que se sitúa al NE de la provincia de La Pampa).

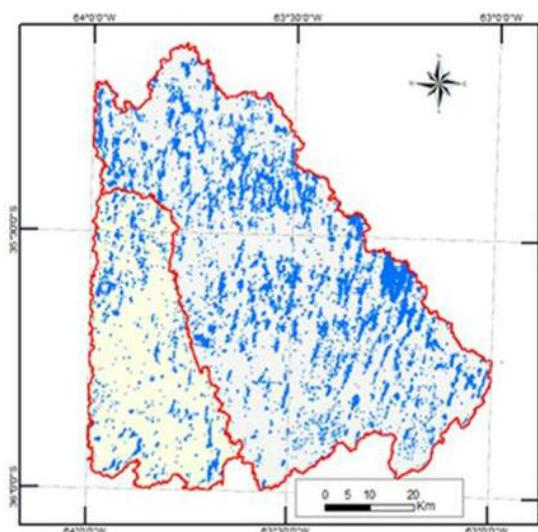


Figura 7. Ejemplo de capa de superficie inundada generada a partir de la clasificación no supervisada de las imágenes satelitales.

2. Cálculo del área inundada

Se realizó el procesamiento digital de las imágenes satelitales para la identificación de las áreas inundadas visibles en ellas. Este proceso requirió llevar a cabo previamente la clasificación no supervisada de las imágenes (clustering). En la clasificación se trabajó con la composición multibanda en falso color compuesto de los canales RGB 453 del Landsat 5 TM y RGB 564 para Landsat 8 OLI/TIRS. Estas combinaciones de bandas permiten una visualización de los sectores ocupados por agua, en distintas tonalidades que van del azul al negro, lo que facilita distinguir claramente el agua del resto de las cubiertas naturales. La clase 1 representa área inundada.

Los raster obtenidos en cada clasificación fueron convertidos al sistema vectorial (polígonos). En cada capa, resultado del proceso de clasificación, se seleccionó la clase 1, correspondiente a la clase agua y se procedió a guardarla como "capa agua".

Luego en cada tabla de atributos de cada capa, se calculó la superficie de cada polígono. De esta forma quedaron constituidos 38 capas de superficie inundada del área de estudio (Figura 7).

3. Evolución del área inundada

Seguidamente, a través del comando de unión se calculó el área máxima inundada.

Para obtener los cambios en el área inundada, se procedió a calcular la diferencia entre las cober-

turas de agua (shapefile) obtenidas en la etapa anterior, entre fecha y fecha. Al shapefile resultante se lo reclasificó en tres categorías: a) 1-1 sin cambios; b) 1-0 decrecimiento del área; c) 0-1 incremento del área. Seguidamente se procedió a determinar las superficies de dichas categorías, en términos de porcentaje sobre la superficie total.

Como último paso se elaboró una gráfica de vulnerabilidad o riesgo. Para esta etapa se utilizó una escala espacial de mayor detalle (Maracó). Para ello se utilizó el shapefile de máxima área inundada y la división a nivel de lote catastral del departamento, estimándose así, para cada lote, la probabilidad de anegamiento. De esta forma es posible identificar aquellos títulos que estuvieron en situación de emergencia agropecuaria (entre 50-79% de su superficie inundada) y, aquellos en situación de desastre agropecuario (> 80% de su superficie inundada). Ambos grupos acceden a los beneficios que establece la ley de emergencia provincial.

Precipitaciones

En una primera instancia, se procedió a elaborar un archivo con los datos de las precipitaciones diarias durante el período analizado (1993-2017). Esta compilación se realizó con los datos registrados en las localidades que conforman una red de modo de abarcar el área de estudio. La información fue proporcionada por APA.

Para cada localidad se calcularon las precipitaciones acumuladas a 15, 30, 60 y 90 días antes de la fecha de cada imagen satelital, quedando constituidos 38 archivos, uno por cada imagen.

Posteriormente los datos de las precipitaciones acumuladas se vincularon con la posición geográfica de las localidades. Para lograrlo se recurrió a la herramienta de gestión de datos que en los SIG facilita la unión de información por localización. Mediante este procedimiento se adecuó la información disponible de modo de posteriormente poder llevar a cabo la interpolación del agua caída dentro del área de estudio (distancia inversa).

Luego de interpolar y obtener las imágenes cuyas celdas dan a conocer la distribución espacial de las precipitaciones acumuladas cada 15, 30, 60 y 90 días antes de la fecha de cada imagen satelital, se procedió a determinar a partir de un zonal los valores correspondientes a la precipitación media, máxima, mínima y desvío estándar (STD) en cada polígono que representa área inundada en las diferentes fechas

La tabla, producto del zonal se utilizó para calcular el coeficiente de determinación entre el área inundada y las precipitaciones acumuladas 15, 30, 60 y 90 días antes de la fecha de registro de cada imagen satelital. La Figura 8 resume los pasos secuenciales seguidos.

Excesos hídricos

El régimen hídrico de una región no queda caracterizado sólo por los datos de precipitación. La misma actúa substancialmente disminuyendo o aumentando las posibilidades de crecimiento de los cultivos ante una demanda climática representada por la evapotranspiración. En el presente trabajo se calculó el balance hídrico diario seriado mediante el software "AgroAgua" (Forte Lay et al. 1996).

En el presente trabajo, se ejecutó el programa para las 4 localidades del área de estudio que poseían series de datos de niveles freáticos históricos (General Pico, Ceballos, Speluzzi y Dorila), durante el período 1963-2017. Si bien el período de estudio es más acotado (1993-2017), el balance seriado debe correrse para un lapso de tiempo mayor (hacia atrás), ya que el cálculo inicia con capacidad de campo para el 1 día de la serie y se estima que le demanda alrededor de 10 años estabilizarse. Los parámetros utilizados para correr el programa fueron:

- capacidad de campo = 150 mm*
- punto de marchitez permanente: 70 mm*
- precipitación: obtenida de APA y la Policía de la Provincia*

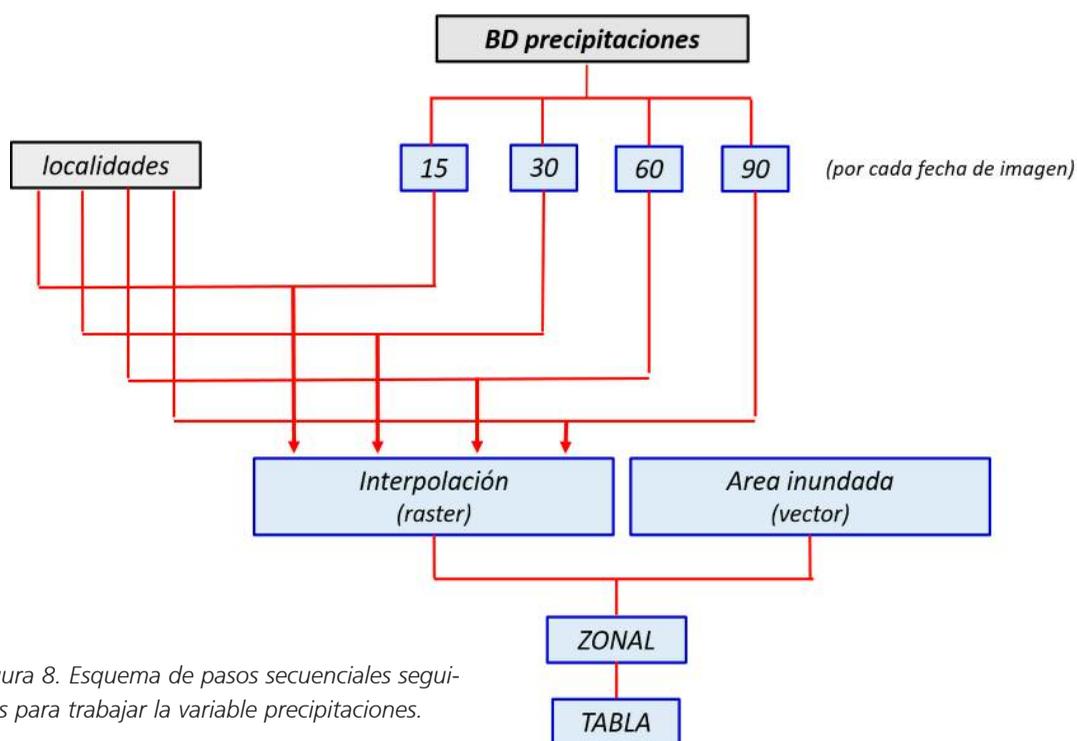


Figura 8. Esquema de pasos secuenciales seguidos para trabajar la variable precipitaciones.

Para cada localidad se calcularon los excesos acumulados 15, 30, 60 y 90 días antes de la fecha de cada imagen satelital, quedando 38 archivos, uno por cada imagen, con las localidades involucradas en el análisis.

Los archivos obtenidos, fueron luego correlacionados con el shapefile de las localidades para llevar a cabo la interpolación de los excesos en el área de estudio (distancia inversa). La Figura 9 resume los pasos secuenciales seguidos.

Niveles freáticos

La variable nivel freático casi siempre resulta una limitante en estudios a largo plazo, ya que no existen registros de datos históricos continuos para muchas localidades. Es por ello, que sólo fue posible recopilar datos de sólo 4 localidades de la zona de estudio, a saber: General Pico, Ceballos, Speluzzi y Dorila. Hay que aclarar que en todos los pozos no existe ningún registro del año 2003. La Figura 10 muestra la ubicación de los pozos en el área de estudio y la Tabla 1 muestra el detalle de la información recopilada para cada uno de ellos.

Con esta información se generó una base de datos conteniendo el dato de precipitaciones,

excesos hídricos y niveles freáticos, buscando posibles relaciones entre estas variables.

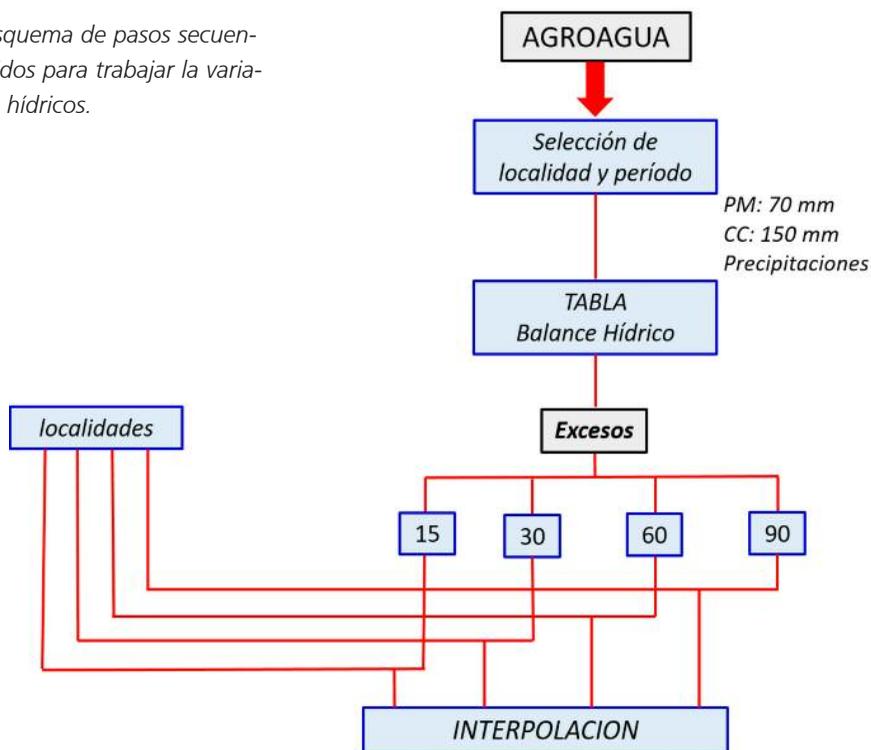
Uso de la tierra

Se utilizaron datos del Registro Provincial Agropecuario – REPAGRO (<https://produccion.lapampa.gob.ar>), para armar la base de datos sobre uso de la tierra de ambas cuencas. La información de la planilla que declaran los productores viene discriminada en dos ítems: uso de la tierra y agricultura.

En la sección uso de la tierra se tienen en cuenta los datos de superficie con agricultura para cosecha (trigo, avena, cebada, centeno y otros), verdeos de invierno (avena, cebada, centeno y otros), cultivos diferidos o verdeos de verano (maíz, sorgo y otros), rastrojos y barbechos, pasturas perennes (alfalfa, pasto llorón, etc.) y monte y campo natural.

Por su parte, en la sección agricultura, la información se divide en superficie sembrada con cultivos de cosecha fina (trigo, avena, cebada, centeno y otros) y cultivos de cosecha gruesa (girasol, maíz, sorgo granífero, soja, maní y otros).

Figura 9. Esquema de pasos secuenciales seguidos para trabajar la variable excesos hídricos.



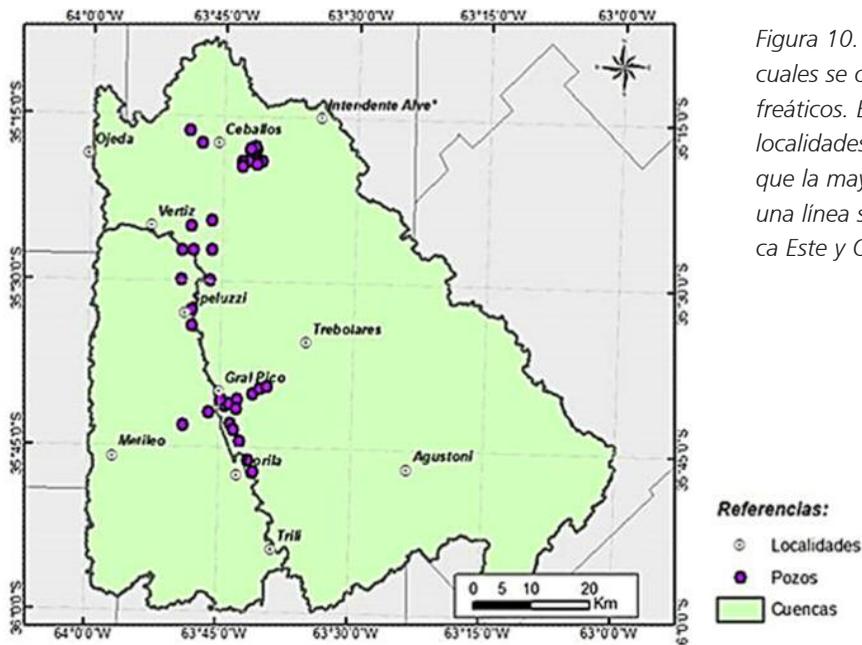


Figura 10. Localización de los pozos de los cuales se obtuvieron registros de niveles freáticos. En rojo se presentan algunas localidades que sirven de referencia. Nótese que la mayoría de los pozos se ubican en una línea sobre el límite que divide la cuenca Este y Oeste.

Tabla 1. Detalle de la información recopilada de los pozos ubicados en el área de estudio.

PERIODO	LOCALIDAD	POZO	
		NOMBRE	ALTURA (m)
1990-2017	CEBALLOS	81	137.5
		II-5	133.7
	DORILA	II-7	130.1
		II-8	129.1
		II-4	135.3
	GENERAL PICO	I-1	134.0
		I-3	136.2
		I-5	138.7
		I-6	137.6
		II-3	136.6
		I-10	128.6
		I-11	126.9
	SPELUZZI	I-7	137.0
		4	144.0
		6	151.0
		7	150.0
		8	148.0

Uso consuntivo

Teniendo en cuenta el ciclo en días del desarrollo de cada cultivo, se calculó el uso consuntivo para los distintos cultivos de cosecha fina, cosecha gruesa y pasturas, mediante el método de Blannet y Criddle (1950), desarrollado en el Oeste de EEUU.

$$UC = K \times F$$

donde:

K coeficiente de cultivo

F factor de uso consuntivo ($\sum f$)

$$f = t \times p$$

donde:

t temperatura en grados Fahrenheit

p es el porcentaje de horas de luz del mes con respecto al total anual (tabla según latitud)

Para el área de estudio, se utilizaron los siguientes ciclos de desarrollo:

soja - noviembre a marzo

alfalfa - septiembre a mayo

girasol - noviembre a marzo

maíz - noviembre a abril

trigo - junio a diciembre

sorgo - noviembre a abril

Los consumos hídricos de los cultivos se calcularon a partir de los coeficientes de cultivo (Kc) provistos por la Oficina de Riesgo Agropecuario (ORA - www.ora.gob.ar).

Posteriormente se calculó un uso consuntivo por hectárea (como % estimado según la participación de cada uso de la tierra). El paso siguiente fue la representación gráfica para detectar tendencias en el uso de la tierra.

Resultados y Discusión

Área inundada

En esta sección se presenta la información obtenida mediante el procesamiento de las imágenes Landsat para el período 1993-2017. Durante el período de estudio, existió una alternancia de años secos, años normales y años donde las precipitaciones superaron la media anual histórica. En la Figura 11 se puede observar como a lo largo de esos años la superficie inunda-

da calculada mediante el análisis de imágenes satelitales, acompañó dicha variación.

La superficie inundada promedio para el área de estudio total (período 1993-2017), fue de 19.315 hectáreas (± 21.269 hectáreas), con un mínimo de 426 hectáreas (otoño del año 2011) y un máximo de 93.012 hectáreas (primavera del año 2001). En el área de estudio total, entre mayo de 1993 y noviembre de 1998, la superficie inundada no superaba las 20.000 hectáreas, y a partir de abril de 1999 se incrementan notablemente las precipitaciones dando comienzo a los problemas en las zonas afectadas. Durante un lapso de 4 años (otoño del año 1999 hasta el otoño del año 2002), el área inundada presentó valores superiores a las 20.000 hectáreas con un pico de 93.012

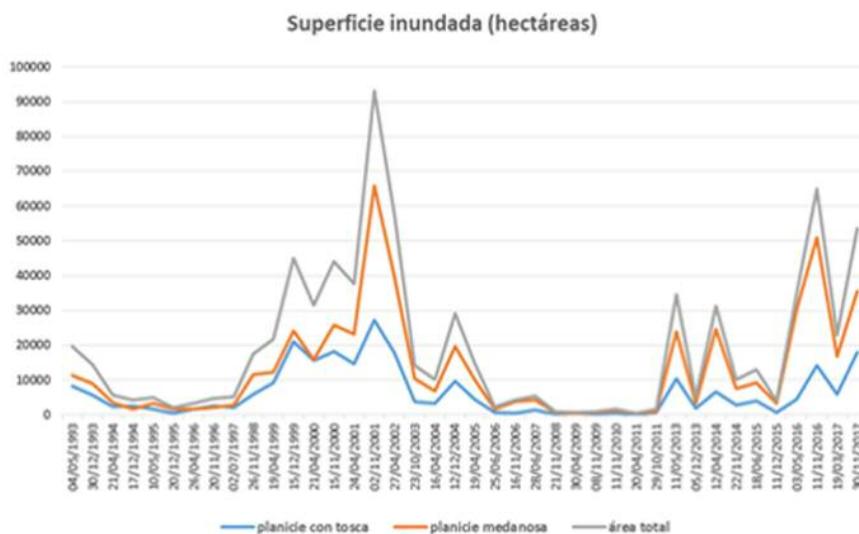


Figura 11. Superficie inundada (hectáreas) en el área de estudio. Se discrimina la superficie para la cuenca "Oeste" (color azul), para la cuenca "Este" (color naranja) y, la superficie inundada total (color gris).

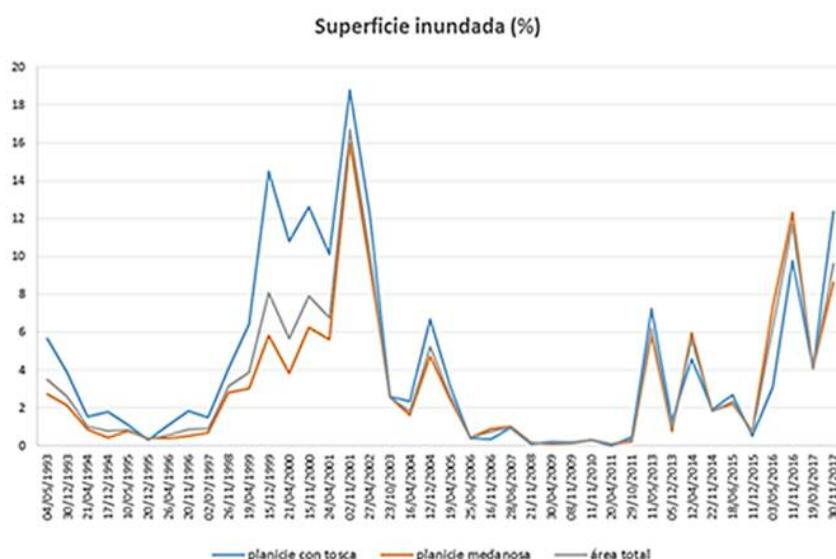


Figura 12. Superficie inundada (en % de la superficie total de cada cuenca), período 1993-2017. Se discrimina la superficie para la cuenca "Oeste" (color azul), la cuenca "Este" (color naranja), y la superficie para toda el área de estudio (color gris).

hectáreas para la primavera del año 2001. Recién a partir de la primavera del año 2003 la superficie inundada comienza a disminuir presentando nuevamente valores menores a las 20.000 hectáreas para la región. Esta situación se mantiene hasta el otoño del año 2016 donde vuelve a superar los valores medios, escenario que se mantiene hasta finalizar el período de estudio en la primavera del año 2017. Hay que aclarar que entre estos dos períodos de elevadas superficies inundadas (otoño 1999 a otoño 2002 – otoño 2016 a primavera 2017), hubo algunos años aislados donde la superficie inundada también superó las 20.000 hectáreas, lo que puede haber respondido a lluvias intensas localizadas con suelos relativamente secos y no, a un fenómeno de inundación regional.

Sin embargo, el área inundada presentada en unidades de superficie (hectáreas) puede no estar evidenciando la problemática que la inundación tuvo en cada cuenca en particular. Es por ello, que en la Figura 12 se presenta la misma información, pero expresada en porcentaje con respecto al área involucrada en cada caso (cuenca "Oeste": 144.467 has. – cuenca "Este": 412.232 has. – área de estudio total: 556.700 has.). Aquí se puede diferenciar algo que en la Figura anterior no era posible, la superficie inundada en la cuenca "Oeste" en casi todos los casos fue superior a la de

las otras dos zonas de estudio. Esta situación es muy evidente en el período de inundación 1999-2002. Sin embargo, en la inundación 2016-2017 la cuenca "Este" resulta la más afectada, aunque los valores de superficie inundada son más similares entre cuencas que en el período de inundación anterior. Estos resultados estarían planteando un comportamiento distinto en ambos períodos y en ambas cuencas, situación que se buscará explicar más adelante. Para el área total estudiada, el promedio de superficie afectada para todo el período fue de 3,47% ($\pm 3,82\%$), con un mínimo de 0,08% (otoño del año 2011) y un máximo de 16,71% (primavera del año 2001).

En la Figura 13 se muestran las fechas con máxima y mínima superficie inundada para el área de estudio completa. La máxima superficie alcanzó las 93.012 has el 02/11/2001, mientras que la mínima superficie de 426 has ocurrió el 20/04/2011.

Teniendo las capas de superficie inundada para cada fecha de imagen satelital, fue posible calcular la diferencia entre fechas, es decir: (fecha anterior (-) fecha posterior). Un resultado positivo, indica que la superficie inundada disminuyó, mientras que, si este resultado es negativo, la superficie inundada se incrementó. Para visualizar estos resultados, en la Figura 14 se observa la diferencia de superficie inundada entre el 24/04/2001

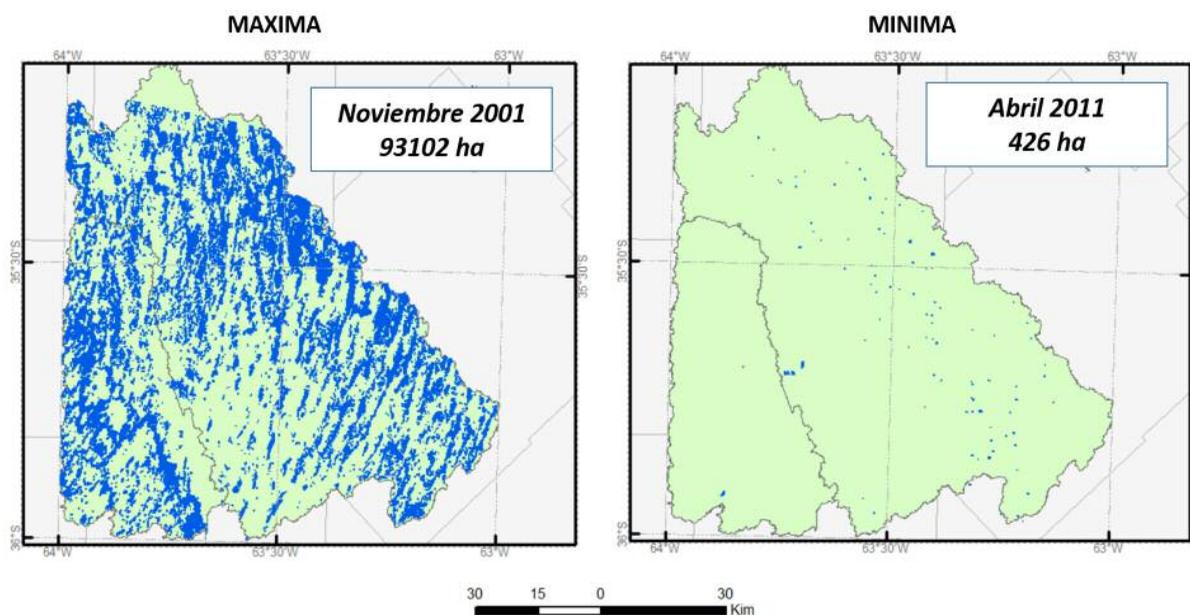


Figura 13. Izquierda: máxima superficie inundada para el área total de estudio (02/11/2001 - 93.012 has). Derecha: mínima superficie inundada (20/04/2011 - 426 has).

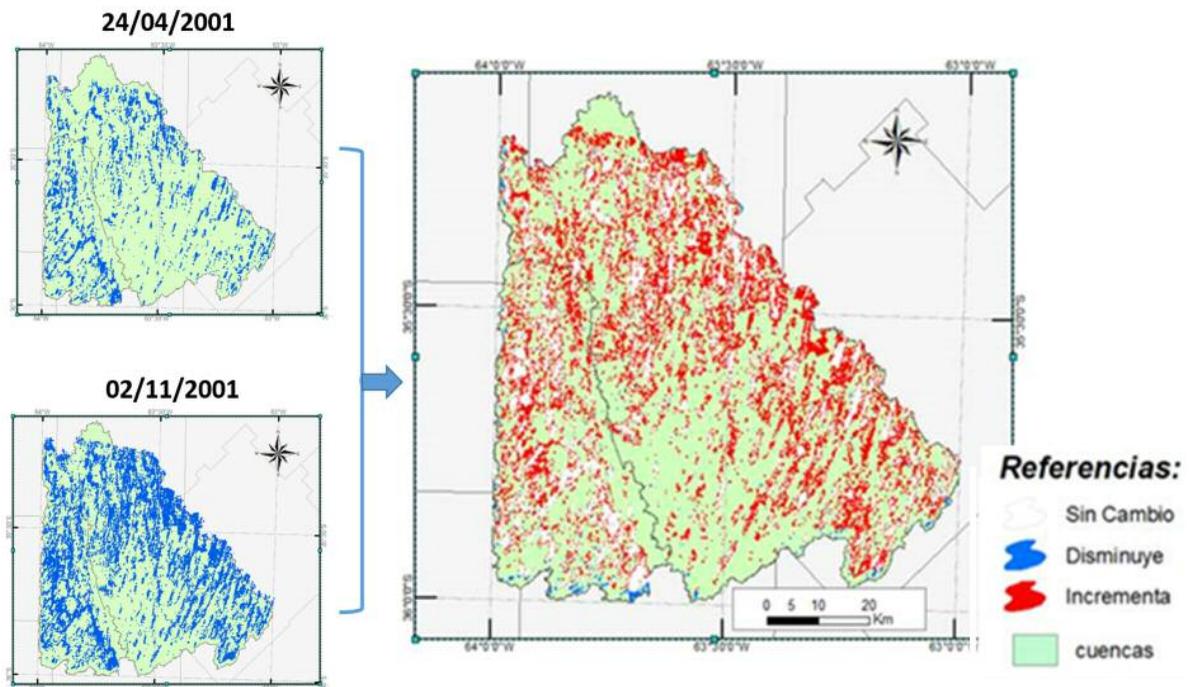


Figura 14. Diferencia de superficie inundada entre el día 24/04/2001 y el 02/11/2001 (193 días). El color azul indica disminución del área inundada, el rojo incremento y el blanco que se mantuvo constante entre ambas fechas.

y 02/11/2001 (máxima crecida para ambas cuencas). El color azul indica una disminución del área inundada, el rojo incremento, y el blanco que se mantuvo constante entre ambas fechas.

Promediando los datos de crecidas y recuperaciones para todas las fechas analizadas, éstos fueron mayores para la cuenca "Este" (crecida: 9.798 has y recuperación: 10.084 has) que para la cuenca "Oeste" (crecida: 4.503 has y recuperación: 3.794 has). Los datos pueden transformarse en tasas dividiendo por el total de días estudiados desde la primera a la última fecha (8.977 días).

Las tasas de la cuenca "Este" (crecida diaria: 1,1 ha/día y recuperación diaria: 1,1 ha/día), duplican a las de la cuenca "Oeste" (crecida diaria: 0,5 ha/día y recuperación diaria: 0,4 ha/día). Es decir, si bien los suelos de la cuenca "Este" se inundan más rápido, el hecho de que no existan impedimentos físicos para el drenaje (tosca) y, en los casos que, si existe, ésta se encuentra a profundidades que no impiden la circulación del agua, determina que la recuperación también sea más rápida.

Al menos dos son los factores que pueden explicar la diferencia de permanencia del agua en la superficie del suelo, entre las cuencas "Este" y

"Oeste": 1) la diferencia textural y, 2) la profundidad de la tosca. En cuanto a la textura, el origen de estos suelos fue producto de la deposición de sedimentos eólicos (fundamentalmente loess y arenas finas) provenientes de la zona cordillerana, que cubrió parte de la provincia de La Pampa y provincias limítrofes. Si bien las texturas actuales de ambos ambientes son similares (franca arenosa fina), la Planicie Medanosas Ondulada cuenta con acumulaciones arenosas que, en muchos casos, forman verdaderos médanos en los cuales la infiltración es muy rápida. El uso intensivo de los suelos sin mayores precauciones para su cuidado, han determinado que se produjeran "voladuras" que, eliminando las partículas más finas han modificado la clase textural (por ejemplo, de franca arenosa a arenosa franca). Dicha textura no ofrece ningún impedimento para la infiltración del agua a través del perfil del suelo, excepto cuando existen duripanes u horizontes endurecidos, que determinan un retardo en la penetración del agua en el suelo. En lo que respecta a la presencia de tosca, en la Planicie Medanosas Ondulada se encuentra a profundidades que oscilan entre 2/3m hasta 6m de profundidad. A dichas profundidades, la presencia de tosca no

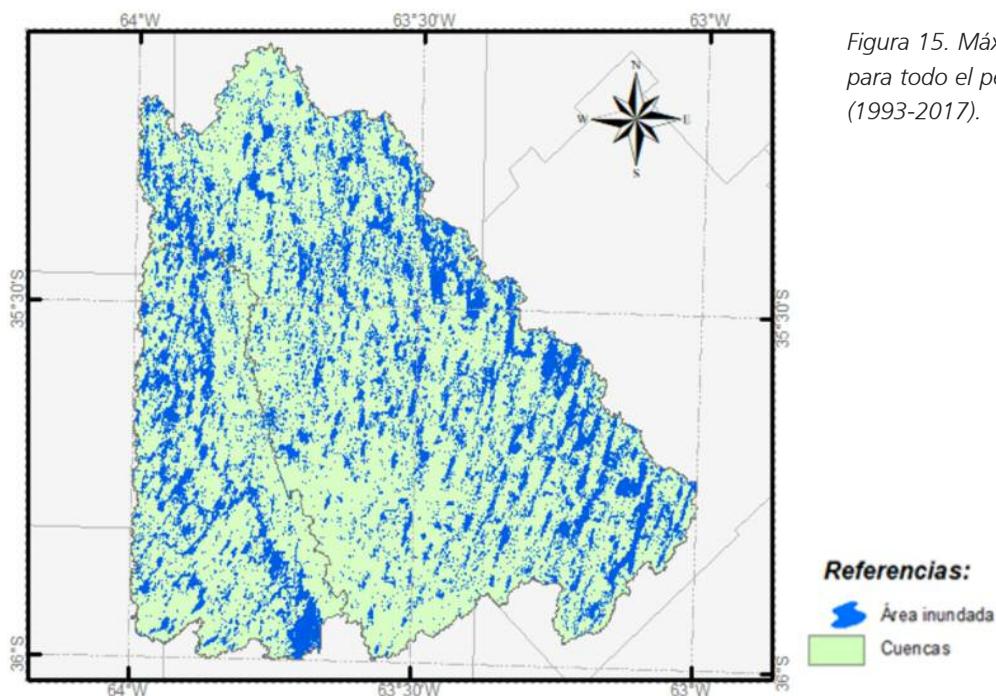


Figura 15. Máxima área inundada para todo el período de estudio (1993-2017).

afecta la infiltración, ya que el agua puede moverse sin ningún impedimento hasta dichos niveles. Por el contrario, en la Planicie con Tosca, la existencia de un nivel calcáreo muy cercano a la superficie (en muchos casos, a menos de 50 cm), impide o restringe el movimiento del agua a través del perfil, formando una “falsa freática”. La capa de tosca es una seria limitante en la exploración radicular y la recarga de acuíferos. Aun cuando estos suelos sean fértiles y muy productivos, la presencia de tosca condiciona seriamente la productividad.

Ahora bien, otro dato interesante que podemos obtener, es la máxima superficie inundada del período (se unen los shapes de área inundada de todas las fechas). En todos los casos la máxima superficie inundada presentó valores de alrededor del 27%, independientemente de la cuenca analizada (Figura 15).

Frecuencia de inundación (lote y título catastral rural)

Con la información obtenida en el punto anterior, se procedió a elaborar un mapa de riesgo de inundación, para identificar la frecuencia a nivel de lote catastral. El departamento Maracó pertenece a la Sección I, Fracción C, y abarca 25 lotes de una superficie aproximada de 10.000 has cada

uno. El máximo número de veces fue 38 porque esta es la cantidad de fechas de imágenes satelitales analizadas. En la Figura 16 se muestra con una gama de tonos azules, el mapa resultante (a medida que el color es más intenso, mayor es la frecuencia de inundación).

En la provincia de La Pampa, el fraccionamiento de los predios catastrales rurales se rige por la ley N 468 “Fijando Normas para el Fraccionamiento de Predios Rurales”. Según la misma, el fraccionamiento deberá responder a las normas de la Unidad Económica Agraria, entendiéndose por tal: *“el predio que por su superficie, calidad de la tierra, ubicación, mejoras y demás condiciones de producción, racionalmente trabajado por una familia agraria tipo, que aporte la mayor parte del trabajo y desarrolle las actividades corrientes de la zona, le permita alcanzar un nivel de vida digno y evolucionar favorablemente”* (es necesario aclarar que un productor puede tener más de un título catastral o incluso, la mitad de uno).

Para el departamento Maracó, la provincia fijó una magnitud base superficial para la unidad económica agraria de 250 hectáreas sin desperdicios. Teniendo en cuenta esto, el departamento Maracó está representado por 917 títulos catastrales rurales (TCR). El 31,3 % (287) se encuentra por encima de la unidad económica establecida

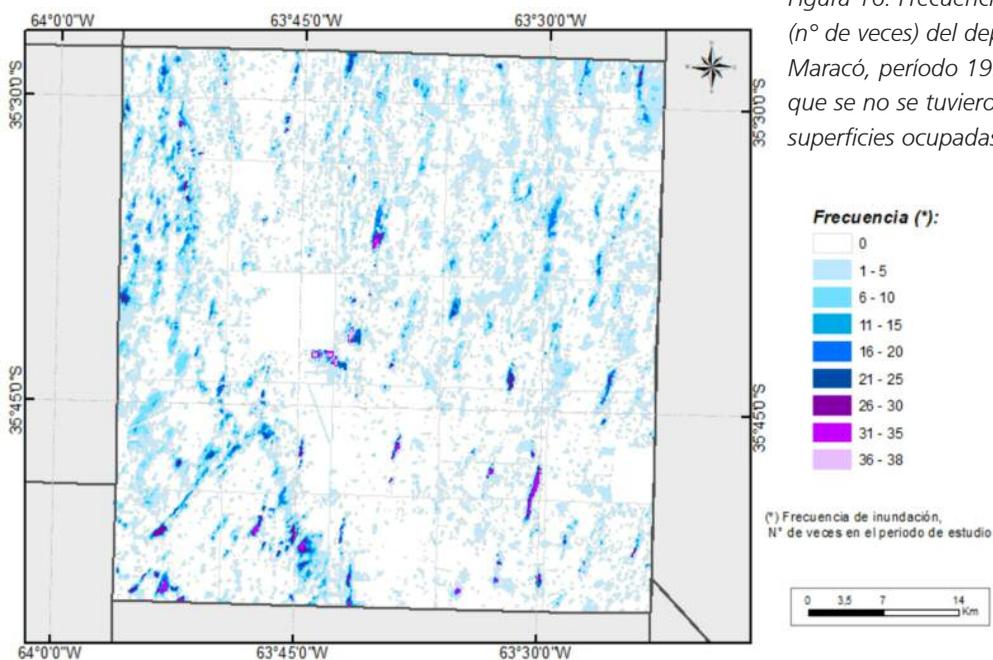


Figura 16. Frecuencia de inundación (n° de veces) del departamento Maracó, período 1993-2017. Nótese que se no se tuvieron en cuenta las superficies ocupadas por zona urbana.

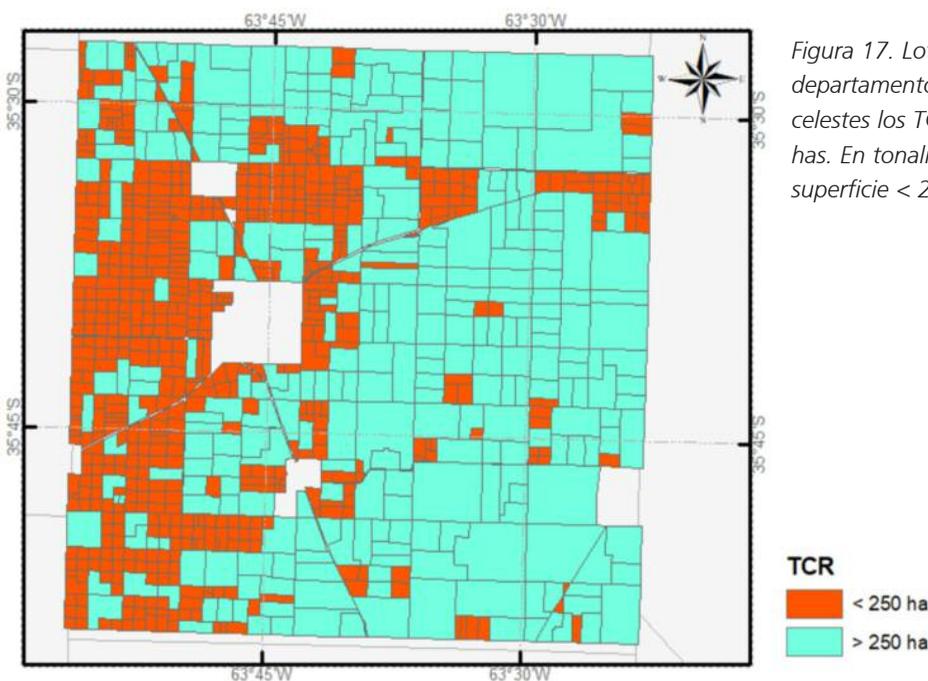


Figura 17. Lotes catastrales rurales del departamento Maracó. En tonalidad celestes los TCR con superficie > 250 has. En tonalidad naranja los TCR con superficie < 250 has.

por la ley, y el 68,7 % restante (630) por debajo (Figura 17). Esto implica que una reducción pequeña del área productiva, debido por ejemplo a una inundación, se traduzca en una situación económica desfavorable para el grupo familiar. Es por ello, que se consideró importante superponer los TCR a la máxima área inundada, para tener una noción de la máxima superficie afectada por título en todo el período.

Se observó que el 2,73 % de los TCR (25) nunca presentó zona inundada alguna, mientras que el 97,27 % restante sí vio afectada su producción, en algún momento del período estudiado. Posteriormente, se clasificaron los TCR en 5 categorías, según el grado de afectación: a) < 20,0 %, b) 20,1 a 40,0 %, c) 40,1 a 60,0 %, d) 60,1 a 80,0 % y, e) > 80,0 %. Así fue posible analizar la magnitud del evento (Figura 18).

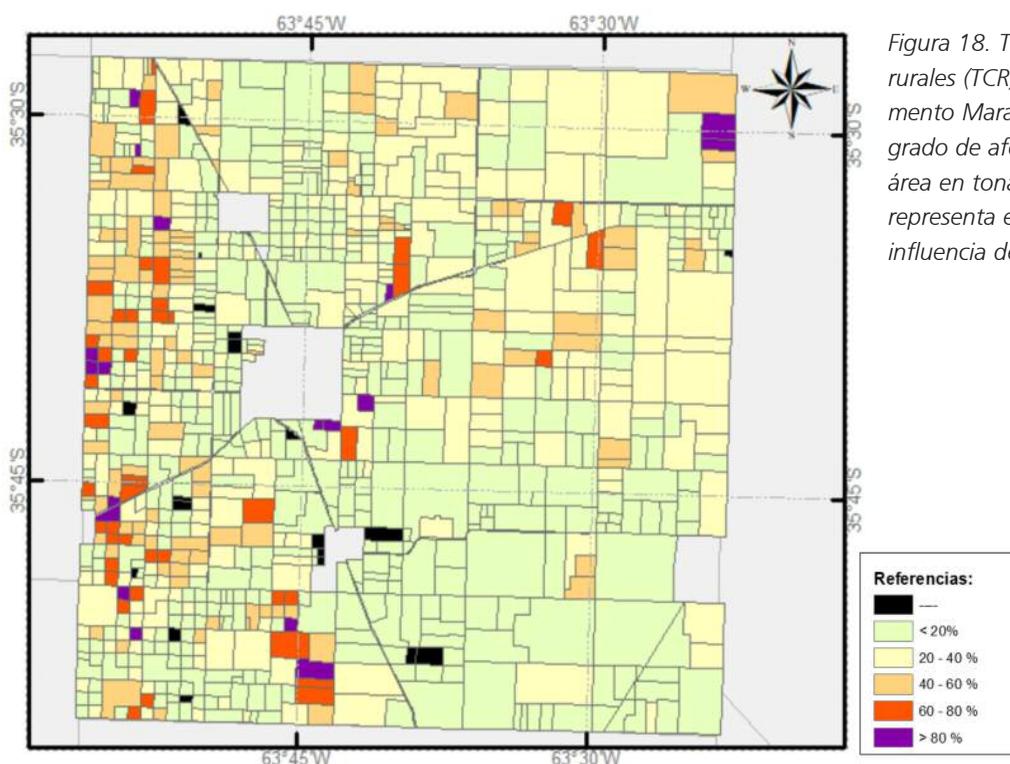


Figura 18. Títulos catastrales rurales (TCR) del departamento Maracó según el grado de afectación (%). El área en tonalidad blanca representa el área de influencia de la zona urbana.

La caracterización de los TCR según el área afectada, presentó los siguientes resultados:

- 1) 452 TCR (49,29 %), con un área afectada máxima < 20 %
- 2) 264 TCR (28,79 %), con un área afectada máxima entre 20,1 y 40,0 %
- 3) 113 TCR (12,32 %), con un área afectada máxima entre 40,1 y 60,0 %
- 4) 45 TCR (4,91 %), con un área afectada máxima entre 60,1 y 80,0 %
- 5) 18 TCR (1,96 %), con un área afectada máxima > 80 %

En la provincia, la ley N 1785 "Emergencia Agropecuaria" en su artículo 2 declara: "El Poder Ejecutivo Provincial podrá declarar por un tiempo determinado en estado de Emergencia Agropecuaria a una región delimitada catastralmente, cuando por factores de origen climático, meteorológico, telúrico, físico o biológico no previsibles o inevitables e inimputables al productor, resulte afectada la producción o la capacidad productiva de las parcelas agropecuarias de dicha región, en por lo menos un cincuenta por ciento (50%)." Mientras que el

artículo 3 de dicha ley establece: "Cuando la producción o la capacidad productiva afectada por las causales mencionadas en el artículo anterior superara el ochenta por ciento (80%), la autoridad de aplicación declarará a la región en Estado de Desastre Agropecuario por tiempo determinado". En el primer caso el beneficio al propietario consiste en una prórroga de 150 días para el pago del impuesto inmobiliario rural, mientras que, en el segundo caso, la prórroga se extiende a 240 días. Además, los propietarios afectados pueden acceder a créditos especiales y otro tipo de asistencia.

Teniendo en cuenta lo anterior, se realizó una caracterización con dichos límites porcentuales para determinar cuántos TCR presentaron alguna de esas dos situaciones, en el período estudiado. El 10,25% de los títulos (94), estuvieron alguna vez en situación de emergencia agropecuaria, mientras que 18 títulos (1,96%), se encontraron en situación de desastre agropecuario, alguna vez durante el período 1993-2017. Esto no es un dato menor si tenemos en cuenta que aproximadamente el 70% de los TCR del departamento se encuentran por debajo de la unidad económica.

Precipitaciones

Para el análisis de las precipitaciones de la zona de estudio, se diferenciaron las localidades ubicadas dentro de la cuenca "Oeste" de aquellas presentes en la cuenca "Este". Se creó un buffer o zona de amortiguamiento de 30 km, y aquellas localidades que estaban por fuera de ese buffer, no se tuvieron en cuenta en el análisis. Esto tiene que ver con la distancia a partir de la cual la estación meteorológica ya no tiene influencia sobre el dato registrado. Por lo tanto, las localidades de Dorila, General Pico, Metileo y Speluzzi, se agruparon como cuenca "Oeste" y, Agustoni, Ceballos, Intendente Alvear, Ojeda, Trebolares y Vertiz, por su parte, se agruparon como cuenca "Este".

La Figura 19 presenta las precipitaciones anuales de las localidades de la cuenca "Oeste", la cuenca "Este" y el área de estudio total (1993-2017). Una primera observación del gráfico diferencia dos situaciones: en el período de inundación 1999-2002 la cuenca "Este" es la que presentó los mayores valores de precipitación, mientras que en el período 2016-2017, las lluvias de la cuenca "Oeste" fueron mayores (situación contraria a la que siguió la superficie inundada, expresada en %). La cuenca "Este" presentó valores anuales de precipitación mayores que la cuenca "Oeste" hasta aproximadamente el año 2008, donde se invierte la situación.

La cuenca total presentó un valor promedio de 778,1 mm ($\pm 254,6$ mm), con un mínimo de 324,8

mm (año 2015) y un máximo de 1332,8 mm (año 1999). Para la cuenca "Oeste" el valor promedio anual fue de 783,3 mm ($\pm 228,8$ mm), con un mínimo de 395,4 mm (año 2015) y un máximo de 1254,2 mm (año 1999). Por último, la cuenca "Este" presentó un valor promedio anual de 774,6 mm ($\pm 285,1$ mm), con un mínimo de 277,7 mm (año 2015) y un máximo de 1385,2 mm (año 1999).

La Figura 20 muestra la relación entre la lluvia caída 15, 30, 60 y 90 días antes de la fecha de la imagen satelital (eje y) y, la superficie inundada (eje x). Los coeficientes de determinación fueron: 15 días ($R=0,05$); 30 días ($R=0,20$); 60 días ($R=0,28$) y 90 días ($R=0,18$). Es decir, la línea de mejor ajuste corresponde a la lluvia acumulada de 60 días, explicando un poco más del 25% de la ocurrencia de inundaciones. Esta información por un lado es útil para determinar umbrales que dan a conocer la cantidad de lluvia que debe acumularse en un período de tiempo, por ej, 60 días, para que una cierta extensión de tierras distribuidas en las cuencas sea afectada por anegamientos. Por otra parte, también podría ser utilizada para simular cómo se distribuye espacialmente el avance del área inundada en función de las precipitaciones que se acumulan a distintos intervalos de tiempo. Sin embargo, consideramos que es necesario complementar los datos generados en este trabajo para lograr acrecentar la fiabilidad de las previsiones y consolidar el "sistema de prevención".

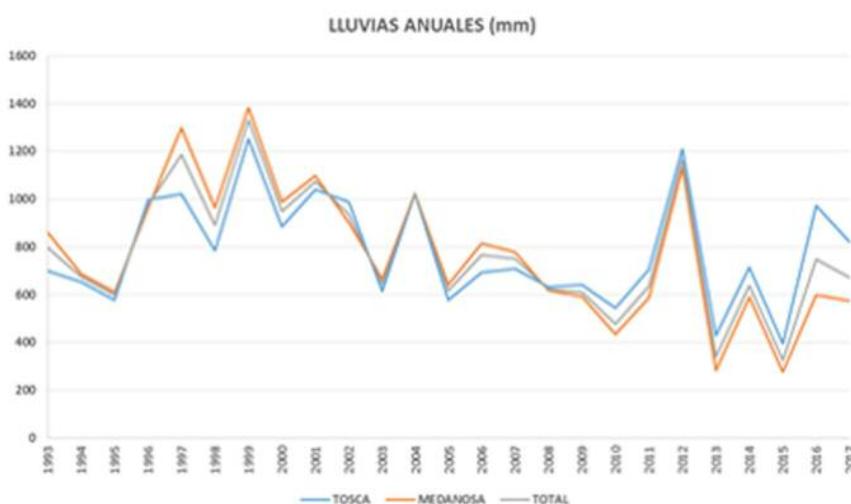


Figura 19. Precipitaciones anuales (mm) para las localidades de la cuenca "Oeste" (color azul), cuenca "Este" (color naranja) y la cuenca total (color gris). Período 1993-2017.

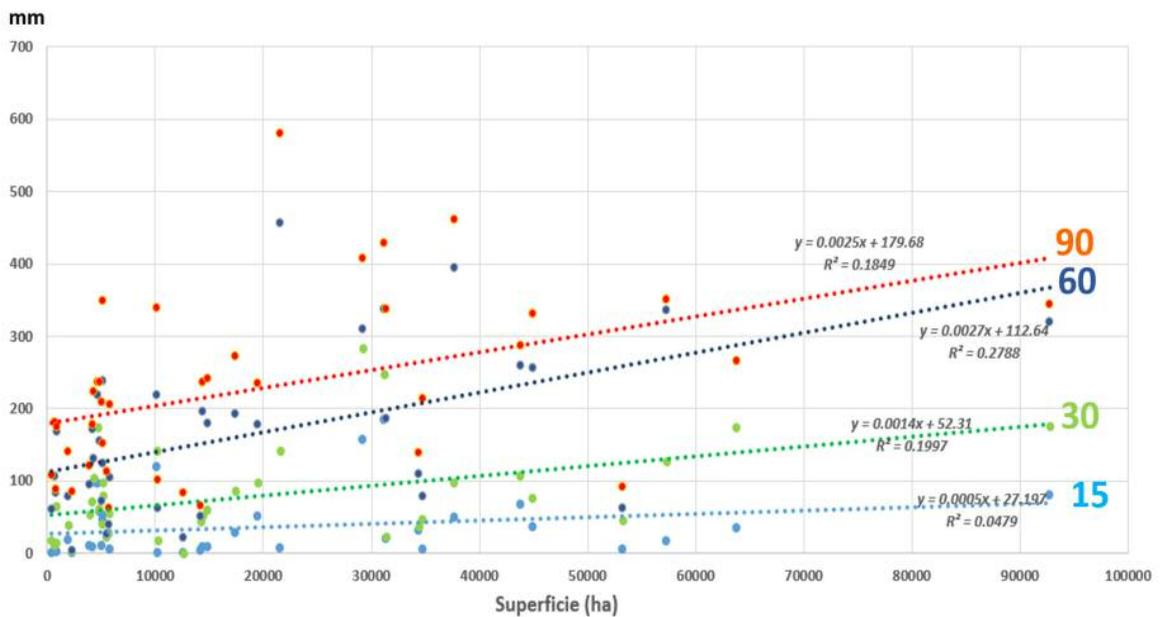


Figura 20. Relación entre la lluvia acumulada 15, 30, 60 y 90 días antes de la fecha de la imagen satelital y, la superficie inundada de esa fecha. Se presentan las distintas regresiones lineales con su respectiva ecuación y valor de coeficiente de determinación R^2 .

Excesos hídricos

Se calculó el balance hídrico diario seriado mediante el software "AgroAgua", lo que dio como resultado el exceso hídrico diario. Se ejecutó el programa para las 4 localidades del área de estudio que poseían datos de niveles freáticos históricos continuos (General Pico, Ceballos, Speluzzi y Dorila), durante el período 1963-2018.

La Tabla 2 muestra un resumen de esta información. Hay que aclarar que si bien el período

estudiado corresponde a 1993-2017, la Tabla muestra un período un poco más amplio para los excesos (comienza un par de años antes), para evaluar que venía ocurriendo con la humedad del suelo. Para el período completo de análisis (1990-2017), todas las localidades presentaron valores de exceso total entre los 3.413-3.853 mm, con valores promedios anuales entre 148-168 mm. Los excesos mínimos anuales fueron entre 1-18 mm, mientras que los máximos anuales entre 471-614 mm. Por su parte el exceso promedio diario estu-

Tabla 2. Análisis de excesos hídricos, en mm, para el período 1990-2017 (Dorila, General Pico, Speluzzi y Ceballos). Para cada localidad se presenta la sumatoria de excesos para todo el período, el número de días con excesos distinto de cero, y los siguientes valores: promedio anual, mínimo y máximo anual (con su respectivo año de ocurrencia), promedio diario y máximo diario (con fecha de ocurrencia).

1990-2017	DORILA	GRAL PICO	SPELUZZI	CEBALLOS
Exceso total	3413,0	3853,0	3361,0	3539,5
Promedio anual	148,4	167,5	160,0	153,9
Minimo anual	12,3 (1994)	2,0 (2005)	17,9 (2008)	1,1 (2011)
Maximo anual	485,2 (1999)	470,5 (2012)	512,8 (1992)	513,5 (1997)
Promedio diario	22	19,3	20,1	20,5
Maximo diario	127,6 (12/03/2012)	122,2 (16/01/2011)	111,2 (09/03/1990)	129,2 (14/12/1997)
N^{ro} días con excesos	155	200	157	173

EXCESOS	1990-2003				2004-2017			
	DORILA	GRAL PICO	SPELUZZI	CEBALLOS	DORILA	GRAL PICO	SPELUZZI	CEBALLOS
Promedio	21,0	18,7	22,2	21,5	24,2	19,9	17,1	18,4
Desvío estándar	19,5	15,6	21,9	24,0	25,6	23,6	19,8	21,0
Mínimo	0,3	0,1	0,2	0,4	0,5	0,2	0,1	0,3
Máximo	115,7	85,3	111,2	129,2	127,8	122,2	86,1	93,3

Tabla 3. Estadística descriptiva de los excesos diarios de cada localidad para ambos períodos (1990-2003 y 2004-2017).

vo entre los 19 y 22 mm, mientras que el exceso máximo diario entre 111 y 129 mm. El número de días con excesos fue de entre 155 y 200 días para las 4 localidades. Si dividimos ese número por los 37 años que abarca el período de estudio, tenemos entre 4 y 5 días con excesos al año para todas las localidades. Igual situación sucede en el caso del análisis de los datos de niveles freáticos.

La Tabla 3 muestra los excesos diarios de las 4 localidades, pero donde al período total de 28 años se lo dividió en dos períodos iguales de 14 años cada uno. Nótese el distinto comportamiento de Dorila y General Pico (localidades más al Sur), comparado con las localidades del Norte (Speluzzi y Ceballos). En las localidades ubicadas hacia el norte de la cuenca, el segundo período (2004-2017) parece haber tenido valores más importantes de excesos diarios que el primero (1990-2003). Por el contrario, en las localidades ubicadas hacia el sur, la situación se invierte, y los excesos diarios del primer período parecen ser, en promedio más importantes. Los máximos de Dorila y Pico subieron en el segundo período, mientras que en Speluzzi y Ceballos disminuyeron.

Otro dato, es que la estación del año con mayores excesos fue el otoño (marzo y abril, con valores entre 866 y 1.098 mm), mientras que la de menores excesos fue el invierno (junio a agosto, con valores entre 0 y 17 mm).

Niveles freáticos

En la provincia, la toma de datos de niveles freáticos es muy irregular y heterogénea, es decir hoy se registra un dato y el próximo puede registrarse al mes siguiente en algún año o, incluso varios meses después en el caso de otros años. Por ejemplo, el año 2003, carece de registros de profundidad de los niveles freáticos. Esto dificulta mucho el análisis del comportamiento de esta variable a través del tiempo, porque se desconoce

qué sucedió entre la fecha de toma de un registro y el siguiente.

Si bien se cuenta con información histórica de profundidad del nivel freático (Subsecretaría de Recursos Hídricos-APA) para pozos de las localidades de General Pico, Ceballos, Speluzzi y Dorila, en el caso de la primera de ellas, ocurre una situación particular: existen pozos cuya ubicación sigue una orientación N-S (los pozos del N poseen una mayor altura que los ubicados al S), y pozos con una orientación E-O. Es por ello que se seleccionaron los 4 pozos de General Pico: uno ubicado al N (I-5: 138,7), otro al S (II-3: 136,6 m), uno al E (I-11: 126,9 m) y otro al O (I-1: 134,0 m).

En la Figura 21 se presenta la profundidad media mensual de cada pozo para el período 1990-2017. La línea roja a 1,5 metros representa la zona de influencia de los niveles freáticos sobre las raíces de los cultivos. Una primera mirada revela que aproximadamente en la primera mitad del período, las líneas están más juntas entre sí, pero a partir de cierto punto de quiebre estas parecieran separarse, indicando dos períodos distintos que podrían ser: 1990-2003 y 2004-2017. Tal situación es aún más evidente en los pozos I-5 y II-3 que son los ubicados a mayor altitud. A su vez estos pozos poseen niveles freáticos más profundos que los dos restantes localizados a menores altitudes del terreno.

La Tabla 4 resume la información de profundidad y variación de profundidad del nivel freático para los cuatro pozos analizados. Se presentan los valores promedio, desvío estándar, valor mínimo y valor máximo, para el período completo (1990-2017), y para 1990-2003 y 2004-2017. Contrariamente a lo que se pensaba, en el segundo período los niveles freáticos, en promedio, se profundizaron en todos los pozos. Lo que se puede observar comparando el primer período con el segundo, es que los niveles freáticos de todos los pozos en promedio, se profundizaron

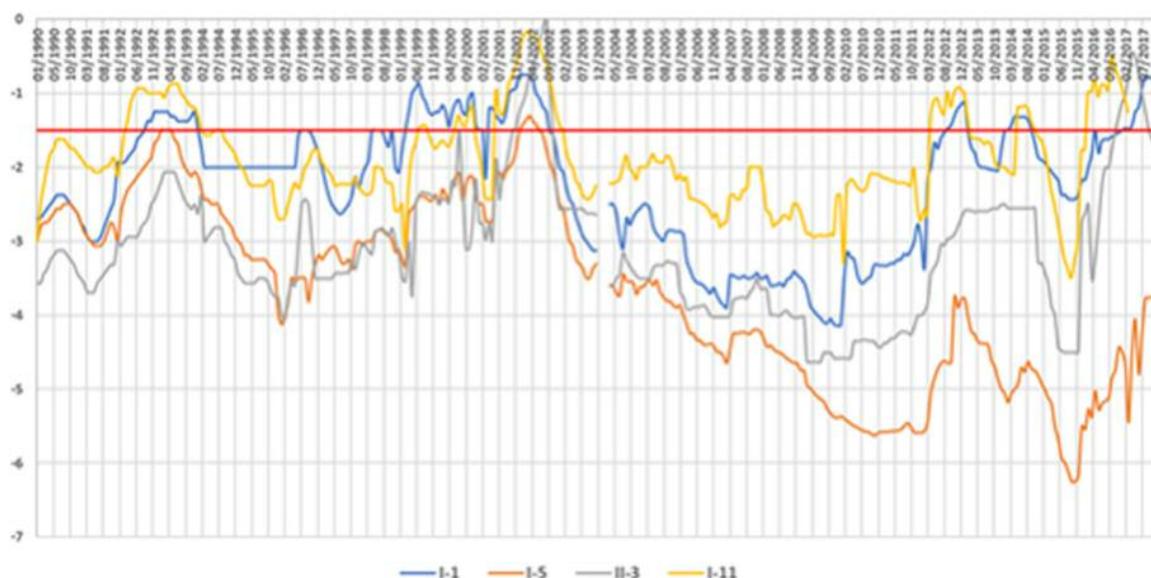


Figura 21. Profundidad mensual de los niveles freáticos (m), donde la línea que marca el valor cero del eje y indica la superficie del terreno (período 1990-2017). La línea roja a 1,5 m indica la zona de influencia de las raíces.

Tabla 4. Valores de promedio, desvío estándar, mínimo y máximo para los 4 pozos y los 3 periodos analizados (1990-2017, 1990-2003 y 2004-2017).

PERIODO	POZOS	profundidad (m)				variación profundidad (m)			
		I-1	I-5	II-3	I-11	I-1	I-5	II-3	I-11
1990-2017	promedio	2.23	3.67	3.09	1.89	0.00	0.00	0.00	0.01
	desvío estándar	0.88	1.22	0.93	0.64	0.17	0.17	0.25	0.22
	mínimo	0.75	1.31	0.00	0.18	-0.65	-0.77	-1.00	-0.92
	máximo	4.14	6.25	4.63	3.50	1.19	0.95	1.75	1.45
1990-2003	promedio	1.83	2.65	2.79	1.72	0.00	0.00	0.01	0.00
	desvío estándar	0.60	0.61	0.77	0.60	0.16	0.15	0.27	0.20
	mínimo	0.75	1.31	0.00	0.18	-0.65	-0.56	-0.85	-0.61
	máximo	3.13	4.13	4.06	3.11	0.95	0.70	1.24	1.45
2004-2017	promedio	2.63	4.71	3.41	2.07	0.01	0.00	0.00	0.01
	desvío estándar	0.93	0.69	0.97	0.64	0.17	0.19	0.23	0.25
	mínimo	0.76	3.45	0.45	0.50	-0.41	-0.77	-1.00	-0.92
	máximo	4.14	6.25	4.63	3.50	1.19	0.95	1.75	1.33

con el tiempo. Sin embargo, si tenemos en cuenta el cambio en el uso del suelo (menos pasturas y más cultivos anuales en el segundo período), se esperaría la situación contraria. Esto aportaría evidencias de que el comportamiento del nivel freático es muy complejo y responde más a una situación regional de cuenca. Es decir, las precipitaciones y el uso del suelo local, no alcanzan a explicar la respuesta en la variación del nivel freático.

La Figura 22 representa gráficamente y para cada año de estudio (1990-2017), los niveles freáticos y las precipitaciones de los 4 pozos. El nivel freático anual muestra cierta correspondencia con la magnitud de las precipitaciones. Los promedios

anuales fueron similares al comienzo y al final del período de estudio, excepto para el pozo I-5 que fue profundizando sus niveles marcadamente desde la finalización del período de inundación 1999-2002 hasta 2016-2017.

La Figura 23 muestra las precipitaciones y niveles freáticos medios de cada estación del año (período 1990-2003). Marca una tendencia general de ascenso del nivel freático en el período, con valores > 2 metros al comienzo, y valores < 2 metros hacia el final del mismo.

La Figura 24 muestra las precipitaciones y niveles freáticos medios de cada estación del año (período 2004-2017). Se evidencia igual tendencia

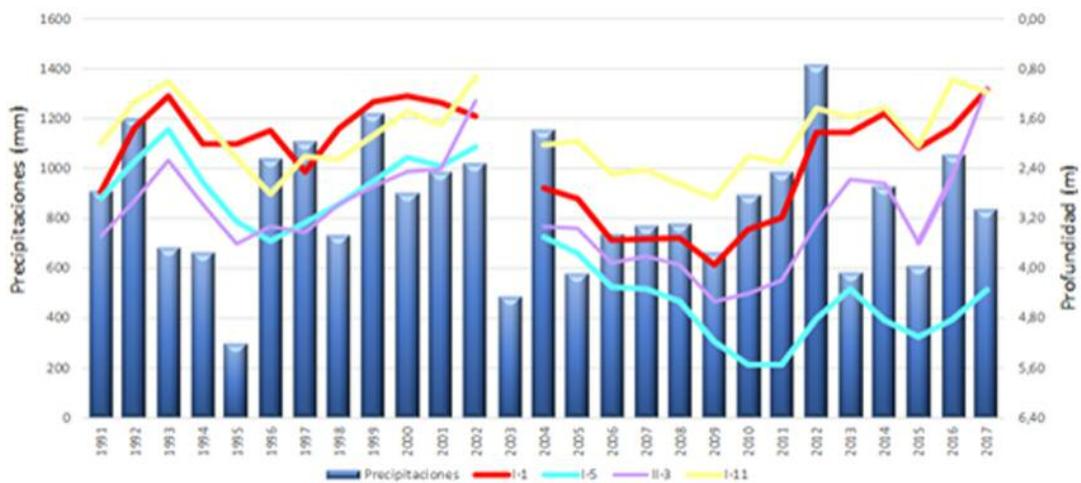


Figura 22. Precipitaciones medias anuales (barras) y profundidad del nivel freático anual (líneas) de los cuatro pozos analizados. Periodo 1990-2017.

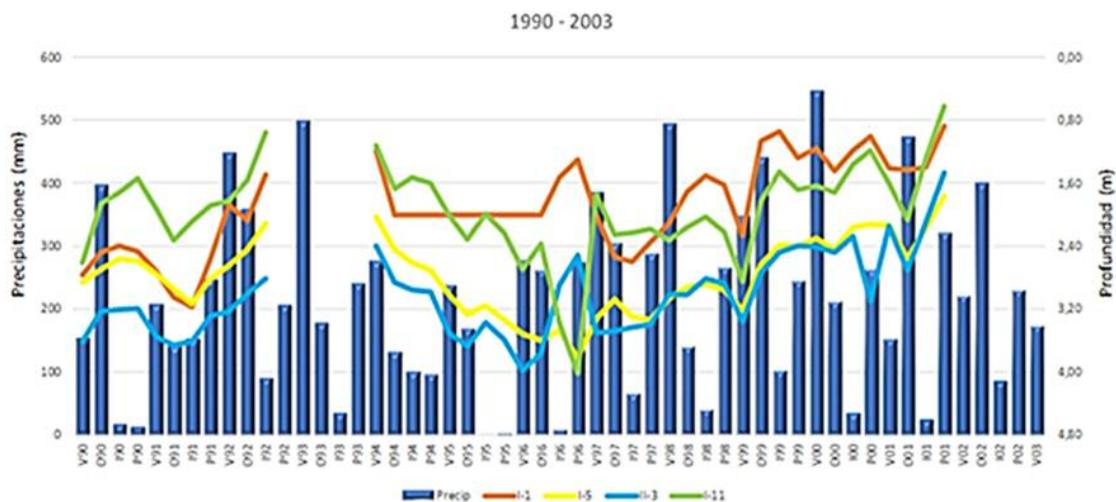


Figura 23. Precipitaciones medias (barras) y profundidad del nivel freático (líneas), de los cuatro pozos analizados, para las cuatro estaciones del año: verano, otoño, invierno y primavera. Periodo 1990-2003.

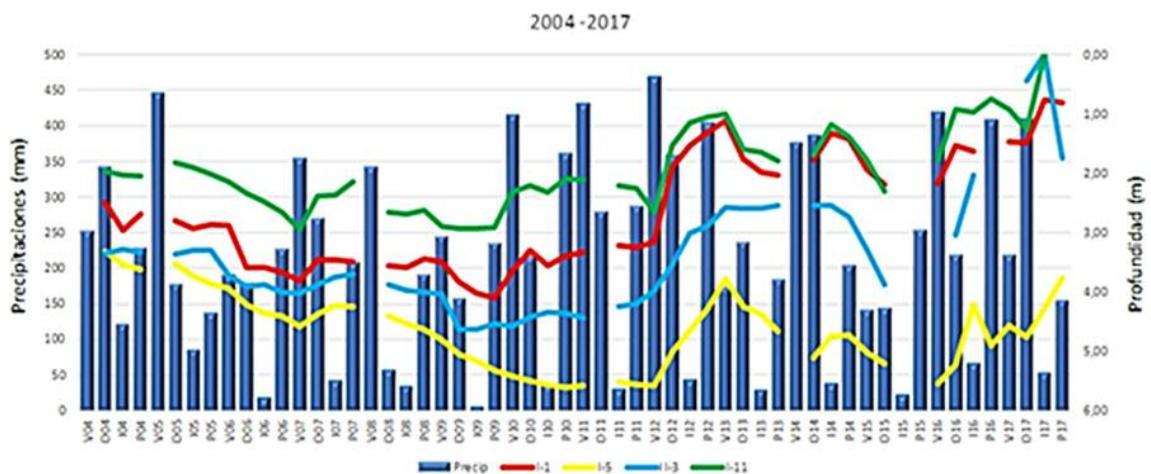


Figura 24. Precipitaciones medias (barras) y profundidad del nivel freático (líneas), de los cuatro pozos analizados, para las cuatro estaciones del año: verano, otoño, invierno y primavera. Periodo 2004-2017.

que en la Figura 23, excepto para el pozo I-5 que profundiza sus niveles hacia el final del período.

Uso de la tierra

La Figura 25 presenta el caso de las pasturas y los cultivos, donde la tendencia lineal resultó la de mejor ajuste en todos los casos (igual o superior al 75%). Se evidencia una situación de aumento de la superficie sembrada con cultivos ($R = 0,75$ para "Este" y $0,78$ para "Oeste") y una disminución de la superficie sembrada con pasturas ($R = 0,79$ "Este" y $0,80$ para "Oeste"). Si bien la tendencia es parecida en ambas cuencas, en la cuenca "Este" la superficie de cultivos es mayor que en la "Oeste". En el caso de las pasturas, las superficies son más similares en ambas cuencas, pero al inicio del período la cuenca "Este" presentaba mayor

superficie hasta que aproximadamente a mitad del período la situación se invierte. Nótese que la pendiente de las líneas de cultivos es ascendente, mientras que la de las pasturas es descendente.

Por su parte en la Figura 26 se presenta la tendencia para la superficie de cosecha fina y cosecha gruesa para ambas cuencas de estudio. Vemos que mientras la superficie con cosecha gruesa fue aumentando en ambas cuencas ($R = 0,77$ para "Este" y $0,75$ para "Oeste"), la de cosecha fina se mantuvo o disminuyó levemente ($R = 0,29$ "Este" y $0,02$ "Oeste"). Sin embargo, el ajuste lineal de la cosecha gruesa es muy bueno (igual o superior al 75%), mientras que para la cosecha fina resultó menor al 30%. Además, las pendientes de las rectas de cosecha gruesa son muy superiores a la de cosecha fina.

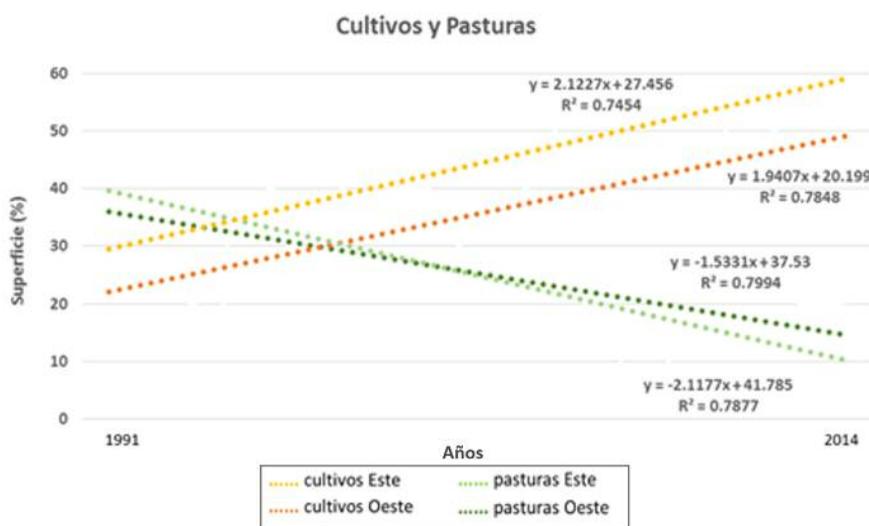


Figura 25. Tendencia de uso de la tierra para ambas cuencas (período 1991-2014). Se discrimina superficie de cultivos y pasturas para cuencas "Este" y "Oeste", con sus respectivas ecuaciones de ajustes y valores de R^2 .

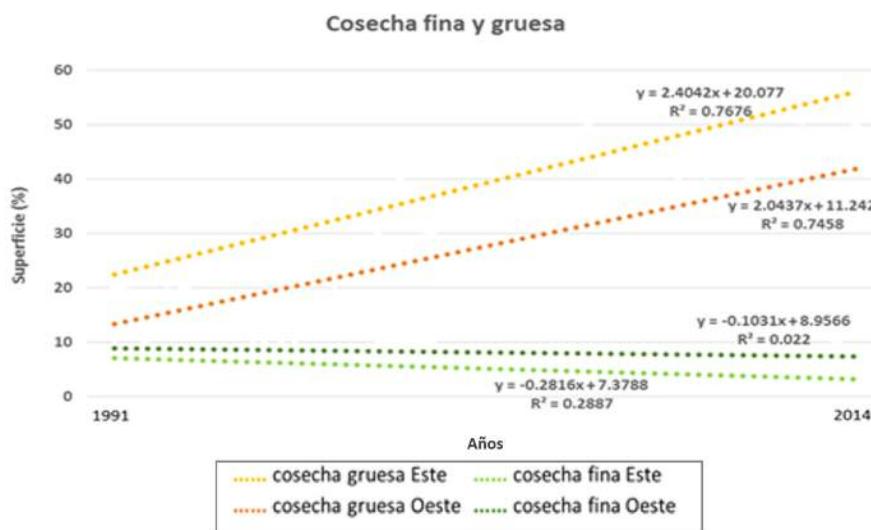


Figura 26. Tendencia de uso de la tierra para ambas cuencas (período 1991-2014), para la superficie con cosecha fina y cosecha gruesa.

Uso consuntivo

Al analizar el uso consuntivo anual que realiza la vegetación del agua del suelo para los distintos patrones de uso de la tierra para cada cuenca, se puede observar que hubo una tendencia de disminución para ambas, al comparar dos períodos: 1991-2002 y 2003-2014 (Figura 27). A pesar de que ambos ajustes de la función polinómica son estadísticamente significativos, tuvieron un mejor valor de R^2 para el caso de la cuenca "Este".

La Figura 28 presenta el uso consuntivo promedio anual (mm año^{-1}) para la alfalfa, girasol, maíz, sorgo, soja y trigo. Mientras la pastura posee un uso consuntivo promedio anual de 1141 mm, este valor es mucho menor en el caso de los cultivos. Si ordenamos los cultivos en orden decreciente de uso consuntivo, quedarían de la siguiente manera: maíz (681 mm), sorgo (661 mm), trigo (713 mm), soja (542 mm) y girasol (561 mm). Estos datos aportarían evidencia de que el reemplazo de pasturas perennes (que evapotranspiran

mayor cantidad de agua debido a sus raíces profundas y un ciclo vegetativo relativamente largo), por cultivos anuales (cuyas raíces están menos desarrolladas y con un ciclo vegetativo de unos pocos meses, que evapotranspiran menor cantidad de agua), llevan a una disminución del uso consuntivo. De aquí que es esperable que el reemplazo de plantas permanentes o perennes por cultivos anuales, reduzca las tasas de evapotranspiración y, eventualmente ascienda el nivel freático debido a un acortamiento del período de crecimiento. Esta situación junto a intensas precipitaciones, suelos secos, niveles freáticos someros y la escasa pendiente del terreno, agrega un factor de riesgo más para un posible anegamiento del terreno.

Por último, se determinó el uso consuntivo anual por hectárea del departamento Maracó para el período 1990-2015 (Figura 29). Esto, junto con las tendencias halladas en la Figuras de uso de la tierra, podría ser un indicio de que el cambio en el uso de la tierra en los últimos años hacia especies que evapotranspiran menor cantidad de agua

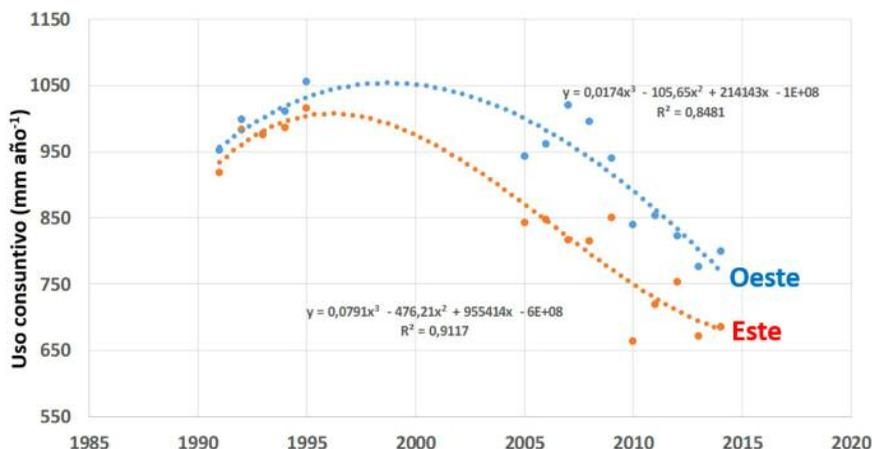


Figura 27. Uso consuntivo de los distintos patrones de uso de la tierra para las cuencas "Este" y "Oeste", para ambos períodos (1991-2002 y 2003-2014). En la tabla se presenta un resumen de ambos períodos.



Figura 28. Uso consuntivo promedio anual para el período estudiado (mm año^{-1}), para alfalfa, girasol, maíz, sorgo, soja y trigo.

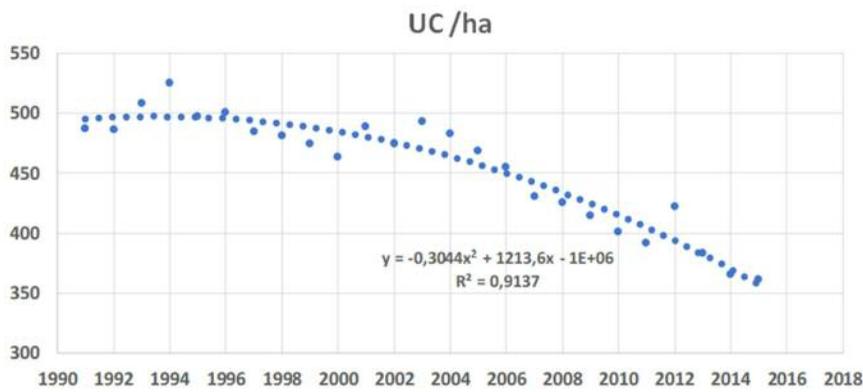


Figura 29. Uso consuntivo anual por hectárea para el departamento Maracó (período 1990-2015).

dejando, por lo tanto, un volumen mayor disponible en el perfil del suelo, facilitan la posterior ocurrencia de inundaciones cuando se manifiestan las precipitaciones. Sin embargo, esto no se ve reflejado en el comportamiento del nivel freático.

Evidentemente esta variable tiene un comportamiento regional a nivel de gran cuenca, y el análisis de su influencia excede los objetivos del presente trabajo.

Consideraciones Finales

- A pesar de que la máxima superficie inundada en ambas cuencas ocurrió en la primavera del año 2001, un dato que proporciona el presente estudio es que, al relativizar el área inundada en función de la superficie de las cuencas, en el "Oeste" (cuenca con tosca) la proporción de tierras afectadas fue superior en casi todo el período 1999-2002, situación que se revierte en el período 2016-2017. Este resultado evidencia que en ambos períodos fue diferente el curso de las inundaciones.

- Las tasas de crecida y recuperación de la cuenca "Este" duplican a las de la cuenca "Oeste", por lo tanto, los suelos en el "Este" se inundan y recuperan más rápidamente que en el "Oeste". Al menos dos variables edáficas permiten argumentar la diferente estancia del agua en la superficie de los suelos: textura/estructura del horizonte y profundidad de la tosca.

- En cuanto al análisis de regresión entre la lluvia caída 15, 30, 60 y 90 días antes de la fecha de la imagen satelital y la superficie inundada, la línea de mejor ajuste corresponde a la lluvia acumulada de 60 días, explicando un poco más del 25% de la ocurrencia de las inundaciones. Los factores que podrían estar influyendo serían entre otros, las características geomorfológicas del sitio, siendo la textura/estructura y la profundidad de la tosca, las variables que condicionan la infiltración del agua en superficie. La temperatura, la velocidad del viento, la evaporación, la evapotranspiración, la cobertura vegetal, el laboreo de las tierras, son variables que también hay que considerar a la hora de analizar la superficie inundada.

- En la provincia el registro de los datos de niveles freáticos es muy irregular, lo que dificulta el análisis del curso de la variable a través del tiempo. No obstante, si se considera que los datos de la localidad de General Pico evidencian en promedio una profundización de los niveles freáticos hacia el final del período de estudio, esto no concuerda con lo esperado. Este resultado no es suficiente

para explicar las variaciones de nivel freático, cuestión que evidentemente resulta mucho más compleja.

- El análisis de los datos del REPAGRO (Registro Provincial Agropecuario) para el período 1991-2014, muestra una clara tendencia de aumento de la superficie destinada a cultivos, acompañada de una disminución de la superficie destinada a pasturas para ambas cuencas (Este y Oeste). Hay que destacar igualmente, que la superficie destinada a cultivos de la cuenca Este es superior a la de la cuenca Oeste, ya que, en esta última, la presencia de tosca en el perfil del suelo limita el desarrollo de los cultivos.

- Al analizar el uso consuntivo anual que realiza la vegetación a partir de los distintos patrones de uso de la tierra, en ambas cuencas se registró una tendencia decreciente en los consumos demandados. Esto, conjuntamente con la tendencia hallada en el punto anterior, es un indicio de que el cambio en el uso de la tierra hacia especies que evapotranspiran menos cantidad de agua estaría repercutiendo sobre la vulnerabilidad, provocando un mayor riesgo de anegamiento frente a la amenaza de precipitaciones extraordinarias.

- Existen razones de índole climática, geomorfológica y edafológica que contribuyen a la ocurrencia de inundaciones. De acuerdo a los datos analizados, se evidencia la alternancia de excesos y déficit hídricos que demuestran la dinámica cambiante de los ecosistemas y el grado de incertidumbre que eso significa.

- Relacionado con lo anterior, sería de gran importancia e interés profundizar en la explicación física y la influencia (como y en qué proporción), de cada factor que pudiera estar incidiendo en la relación precipitación y superficie inundada, temática que excede los alcances del presente estudio.

- Es necesario reconocer las oportunidades que brinda el agua subterránea a la producción de cultivos, así como las amenazas que puede presentar su elevación en el perfil del suelo y los posibles episodios de anegamiento y salinización que esto puede generar. Es por ello que se alienta a instituciones públicas y privadas para que incorporen y mantengan mediciones necesarias para estudiar la dinámica hidrológica de esta región.
- La interacción del clima con la cobertura del terreno y las decisiones de uso de la tierra resultan particularmente importantes en la hidrología de estos sistemas de llanura. Debe tenerse en cuenta que con una adecuada red freaticométrica, datos meteorológicos regionales, registros de niveles en cursos y lagunas, se podría analizar la evolución de las inundaciones e incluso efectuar pronósticos fiables a fin de minimizar los impactos socio-económicos potencialmente adversos causados por las inundaciones.
- Si tenemos en cuenta que aproximadamente el 70% de los TCR del departamento Maracó (área central de estudio) se encuentran por debajo de la unidad económica, promover el tipo de estudio del presente trabajo, resulta prioritario para lograr interpretar el comportamiento de la zona frente a las inundaciones.

Bibliografía

- Administración Provincial del Agua (APA). 2020. Estaciones meteorológicas online. Datos de lluvia. Ministerio de Obras y Servicios Públicos - Gobierno de La Pampa. Recuperado de: <https://apa.lapampa.gob.ar/metereologias/19-meteorologia/42-datos-historicos-de-lluvia.html>
- Aragon R., Jobbágy E.G., Viglizzo E. (2010). Surface and groundwater dynamics in the sedimentary plains of the Western Pampas (Argentina). *Ecohydrol.* DOI: 10.1002/eco.149
- Asociación gvSIG. (2009) gvSIG 2.5. [Software]. Recuperado de <http://www.gvsig.com/es/productos/gvsig-desktop/descargas>
- Blaney H.F., Criddle W.D. (1950). Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data. USDA Servicio de Conservación de Suelos. SCS-TP96. 44 pp.
- Dirección General de Estadística y Censos (s.f.). REPAGRO. Registro Provincial de producción Agropecuaria: manual de ayuda. Ministerio de Producción. Gobierno de la Pampa. Recuperado de: https://repagro.lapampa.gob.ar/imagenes/Manual_de_REPAGRO.pdf
- Forte Lay J., Aiello J., Kuba J. (1996). "Software Agroagua Versión 4.3". CONICET. Bs. As.
- Fuschini Mejía M.C. (1994). El Agua en las Llanuras. UNESCO, Oficina Regional de Ciencia y Tecnología para América Latina y el Caribe, Montevideo, 59 pp.
- Instituto Geográfico Nacional (IGN). (s.f.) Herramientas de búsqueda. Modelos digitales de elevación. Ministerio de Asuntos Agrarios. Argentina. Recuperado de <https://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/Geodesia/ModeloDigitalElevaciones/Busqueda>
- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). (2017). Catálogo de imagens Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. Brasil. Recuperado de: <http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA); Universidad Nacional de La Pampa Provincia de La Pampa (UNLPam). (1980). "Inventario Integrado de los Recursos Naturales de la Provincia de La Pampa": clima, geomorfología, suelo y vegetación. INTA: Buenos Aires. 493p.
- Martínez Uncal C. (2015). Monitoreo de tierras anegadas al Noreste de la provincia de La Pampa, Argentina. Tesis de Maestría en Análisis y Procesamiento de Imágenes. Universidad Nacional de Córdoba. 102 pp.
- Moncaut C.A. (2001). Inundaciones y Sequías en la Pampa Bonaerense 1576-2001. Editorial El Aljibe, City Bell (Argentina), 102 pp.
- Oficina de Riesgo Agropecuario (ORA). (s.f.). Riesgo climático. Fenología de los cultivos monitoreados. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. Argentina. Recuperado de: http://www.ora.gob.ar/riesgo_fenologia.php
- Roberto Z.E., Martínez Uncal M.C. (2012). Bases para el ordenamiento territorial. Publicación Técnica N 87 / Mayo 2012. ISSN 0325-2132. DVD Rom. Ediciones INTA.
- U.S. Geological Survey (USGS). (s.f.). Earth explorer. Recuperado el (18 de julio de 2020) de <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- Vázquez, P. (2017). Emergencia agropecuaria en la provincia de La Pampa. Inundaciones periodo 19 de abril-21 de mayo 2017. Informe Técnico. Recuperado de: https://inta.gob.ar/sites/default/files/informe_inundaciones_20170521.pdf