



Facultad de Agronomía
Universidad Nacional de La Pampa

**DINÁMICA DE AGUAS SUBSUPERFICIALES EN EL OESTE DE LA
PROVINCIA DE BUENOS AIRES**

Ing. Agr. Alejandra Macchiavello

Trabajo de Tesis para ser presentado como requisito parcial para optar al Título de
MAGISTER EN PRODUCCIÓN AGROPECUARIA EN REGIONES SEMIÁRIDAS
FACULTAD DE AGRONOMÍA
UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PAMPA

Santa Rosa, La Pampa, Argentina

2023



Facultad de Agronomía
Universidad Nacional de La Pampa

**DINÁMICA DE AGUA SUBSUPERFICIALES EN EL OESTE DE LA PROVINCIA
DE BUENOS AIRES**

Ing. Agr. Alejandra Macchiavello

.....

Dr. Cristián Álvarez

Director de Tesis

.....

Dra. Elke Noellemeyer

Co-Directora de Tesis

Integrantes de la Comisión de Seguimiento:

.....

Dr. Alberto Quiroga

.....

MSc. Horacio Videla Mensague

.....

Dr. Mauricio Farrell

DINÁMICA DE AGUA SUBSUPERFICIALES EN EL OESTE DE LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES

Ing. Agr. Alejandra Macchiavello

Aprobado por:

.....
Dr. Juan Cruz Colazo

.....
Dr. Raúl Rivas

.....
Dra. Adriana Gili

A mi hija Paulina:

“Ve siempre por tus sueños, despacio, pero nunca dejes de ir”

AGRADECIMIENTOS

A mi director, Dr. Cristian Álvarez, por su ayuda, por su paciencia, por su bondad, por su acompañamiento constante y por brindarme valiosos conocimientos.

A mi co-directora, Dra. Elke Noellemeyer, por recibirme como tesista y por brindarme sin reparos sus conocimientos científicos.

A mi corrector, MSc. Horacio Videla, por brindarme sus conocimientos sobre modelos y responder a mis innumerables consultas.

Al jurado de tesis, Dr. Juan Cruz Colazo, Dr. Raúl Rivas y Dra. Adriana Gili por sus valiosos aportes para mejorar mi trabajo de tesis.

A mi familia, que, con amor y paciencia, siempre me acompañan: Paulina y Gucho, mis papás y mis incondicionales hermanas.

A mi compañera de maestría, Ing. Agr. Nuria Khun, que con su energía y alegría me ayudo a transitar todo este camino.

A todas las personas que me alentaron en este periodo, aun sin entender concretamente que estaba haciendo: Lorena, Graciela, Ileana, Ezequiel, José y Marcos.

A la Facultad de Agronomía, UNLPam, y a su Escuela de Posgrado, gracias a cada uno de sus profesores y personal académico por su amabilidad y ayuda.

Al INTA, por permitirme lograr esta información.

Al Dr. Alberto Quiroga, por instarme a pensar en esta formación, por brindarme generosamente el aval de su proyecto y por compartir siempre su sabiduría conmigo.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	II
ÍNDICE GENERAL	III
ÍNDICE DE TABLAS	V
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VI
RESUMEN.....	VIII
ABSTRACT.....	X
INTRODUCCIÓN	1
Objetivos	3
Objetivo General.....	3
Objetivos Específicos.....	3
Hipótesis:	3
MATERIALES Y MÉTODOS.....	4
Área de Estudio.....	4
Muestreo de los niveles freáticos	8
Sitios de relevamiento de aguas subterráneas	8
Análisis de los datos.....	Error! Bookmark not defined.
Obtención y procesamiento de imágenes satelitales	Error! Bookmark not defined.
Modelos predictivos para modelizar el nivel de aguas subsuperficiales	Error! Bookmark not defined.
Modelo Estadístico	Error! Bookmark not defined.
Indicadores estadísticos en la calibración y validación del modelo	13
Coeficiente de determinación (R^2)	13
Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE)	14

Raíz del Error Cuadrático Medio Normalizado (RRMSE)	14
Índice de agregación de Willmott o estadístico “d”	14
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	15
Caracterización climática del período de estudio.....	15
Análisis de la variabilidad freática.....	15
Relación entre el nivel freático y la posición en el paisaje	16
Análisis de recurrencia de inundaciones	18
Modelos Predictivos	23
Ecuación de Regresión.....	23
Calibración del modelo	23
Validación del modelo.....	29
Relación entre nivel freático observado, precipitación, evapotranspiración y nivel freático simulado.....	29
Análisis entre la posición del paisaje, tipo de suelos y el nivel freático simulado.....	31
CONCLUSIONES	36
BIBLIOGRAFÍA.....	38
ANEXO	45

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Cuantificación del área inundada según tipos de suelos en General Villegas	22
Tabla 2. Resumen estadístico de la calidad predictiva de la ecuación de regresión para los diferentes sitios de General Villegas	28

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio, Partido de General Villegas, Buenos Aires, Argentina.....	4
Figura 2. Mapa altimétrico del partido de General Villegas y zonas aledañas.....	5
Figura 3. Esquema de la Unidad Fisiográfica de los Médanos Longitudinales de la Pampa Arenosa.....	7
Figura 4. Ubicación de los sitios de relevamiento de la información freática en el partido de General Villegas	9
Figura 5. Modelo estadístico calibrado en Solver en Excel, ejemplo de caso analizado	13
Figura 6. Valores mensuales de precipitación y evapotranspiración para General Villegas en el periodo 2000-2014	15
Figura 7. Valores mensuales de nivel freático en General Villegas para el período 2000-2014	16
Figura 8. Análisis del nivel freático mensual y la posición en el paisaje para el periodo de 2003-2014.....	18
Figura 9. Superficie anegada (%) en General Villegas en los años 2002 y 2003.....	19
Figura 10. Superficie anegada (%) en General Villegas en los años 2005, 2007 y 2013.....	20
Figura 11. Relación entre el nivel freático simulado y el nivel freático observado en el período 2000-2014.....	24
Figura 12. Relación entre el nivel freático simulado y el nivel freático observado en el período 2000-2004.....	24
Figura 13. Relación entre el nivel freático simulado y el nivel freático observado en el período 2005-2006.....	25

Figura 14 Relación entre el nivel freático simulado y el nivel freático observado en el período 2007-2008.....	25
Figura 15. Relación entre el nivel freático simulado y el nivel freático observado en el período 2009-2011.....	26
Figura 16. Relación entre el nivel freático simulado y el nivel freático observado en el período 2012-2014.....	26
Figura 17. Relación entre los valores promedios de los niveles freáticos simulados y los niveles freáticos observados, en General Villegas.....	29
Figura 18. Relación entre el nivel freático estimado y el nivel freático observado según modelo estadístico aplicado.....	30
Figura 19. Variabilidad de las estimaciones del nivel freático según tipo de suelo y posición en el relieve.....	33
Figura 20: Niveles freáticos estimados para un suelo Hapludol típico para distintas precipitaciones en General Villegas.....	34
Figura 21: Niveles freáticos estimados para un suelo Hapludol thapto árgico para distintas precipitaciones en General Villegas.....	34

RESUMEN

Gran parte de la llanura Pampeana presenta niveles freáticos cercanos a la superficie que, junto a los excesos hídricos, producen con frecuencia inundaciones provocando un fuerte impacto sobre los ecosistemas. El propósito de este estudio fue conocer la dinámica del nivel freático y su correlación con las precipitaciones en el oeste de la provincia de Buenos Aires, caracterizando eventos de inundación, identificando riesgos hídricos por el nivel freático cercano a la superficie, mediante el empleo de un modelo estadístico. Esta herramienta permitió el seguimiento e identificación de áreas afectadas por anegamiento e inundaciones. Se determinaron los alcances de los eventos para elaborar alertas tempranas con la finalidad de mitigar la incidencia de estos eventos extremos. Se recabó y compiló series temporales de datos de nivel freático a partir de la toma de datos de freatómetros distribuidos en General Villegas. Se encontró una correlación alta del nivel freático con la posición del paisaje (loma, media loma y bajo) en la serie de años analizada. General Villegas ha sufrido inundaciones con cierta periodicidad, provocadas principalmente por las precipitaciones y por el consecuente ascenso del nivel freático. Se estudió los efectos de las inundaciones, mediante el análisis de imágenes satelitales (Landsat 5,7,8) en el área y se observaron oscilaciones de la superficie cubierta por agua con valores extremos de 0,50 y 8,24%, apreciándose que el 46,6 % de los años evaluados presenta algún síntoma de anegamiento. Se calibró un modelo simple que relaciona precipitación, evapotranspiración potencial y porosidad drenable del suelo con la variación del nivel freático. Los valores medios de nivel freático simulado y observado fueron similares, lo respaldó la calibración y validación del modelo estadístico. En todos los sitios estudiados se presentaron altas consistencias, con valores promedios de RRMSE: 36,66 cm; RMSE: 36,97 % y $d=0,96$. En General Villegas el aumento en la frecuencia de eventos generalizados de excesos hídricos provocó consecuencias en los ecosistemas locales. La dinámica del área inundada y del nivel freático manifestaron un estrecho acoplamiento durante el período de estudio, siendo la precipitación la variable que mayor influencia presentó sobre los ciclos de inundación ($R^2=0,55$; $p<0,005$). Estos eventos, son el resultado combinado de diversos factores, como las precipitaciones, el nivel freático, la topografía y el tipo de suelo que caracteriza al paisaje. Es importante tener en cuenta que la dinámica de las inundaciones de General Villegas incrementó su frecuencia en los últimos años. Considerando la alta frecuencia y magnitud del fenómeno estudiado sería necesario implementar un sistema de alerta temprana para minimizar el impacto de las inundaciones y sus consecuencias en lo ambiental, productivo y social

Palabras claves: nivel freático, inundaciones, modelos estadísticos.

ABSTRACT

A large part of the Argentinean Pampas plain has groundwater levels close to the surface which, together with excess water, often produce floods, causing a strong impact on ecosystems. The purpose of this study was to understand the dynamics of the water table and its correlation with rainfall in the west of the province of Buenos Aires, characterizing flood events, identifying water risks due to the water table near the surface, using a statistical model. This tool allowed the monitoring and identification of areas affected by waterlogging and flooding. The scope of the flooding events was determined to develop an early warning system to mitigate the incidence of these extreme events. Time series of water table level data were collected and compiled from data taken from wells distributed in General Villegas. A high association of the water table with the position of the landscape (top, mid and foot slope) was determined in the series of years analyzed. General Villegas has suffered floods with a certain periodicity, caused by rainfall and the consequent rise in the water table. The effects of the floods were studied through the analysis of satellite images (Landsat 5,7,8) in the area and variations of the surface covered by water were found with extreme values of 0.50 and 8.24%, appreciating that 46.6% of the years evaluated presented some evidence of waterlogging. A simple model was calibrated that relates precipitation, potential evapotranspiration, and drainable porosity of the soil with the variation of the water table. The mean values of the simulated water table and observed water table were similar, supported by the calibration and validation of the statistical model. In all the studied sites, high consistencies were found, with average values of RRMSE: 36.66 cm; RMSE: 36.97% and $d = 0.96$. In General Villegas, the increase in the frequency of widespread events of excess water caused consequences in local ecosystems. The dynamics of the flooded area and the water table showed a close coupling during the study period, with precipitation being the variable that had the greatest influence on the flood cycles ($R^2=0,55$; $p<0,005$). These events are the combined result of various factors, such as rainfall, the water table, the topography, and the type of soil of each site. It is important to bear in mind that the dynamics of floods in General Villegas have increased in frequency in recent years. Considering this characteristic of the process, it would be important to implement a follow-up early warning system and minimize the unwanted impact of floods and its environmental, productive and social consequences.

INTRODUCCIÓN

Los paisajes llanos extensos se caracterizan por un bajo transporte de agua horizontal como resultado de una baja escorrentía superficial y flujos lentos de agua subterránea que pasan a estar dominados por trayectorias de flujo de escala local a intermedia (Tóth, 1963). En tanto que, el balance hídrico de estos sistemas está determinado principalmente por la precipitación y la evapotranspiración, mientras que los flujos de agua subterránea y su conexión con el agua superficial dependen en gran medida de la conductividad hidráulica y de la textura y porosidad de los suelos (Brunke y Gonser, 1997; Ferone y Devito, 2004; Kollet, 2009). Los excedentes hídricos se traducen naturalmente en aportes al nivel freático y su presencia se vuelve gradualmente más cercana a la superficie. En primer lugar, este flujo se da hacia las raíces profundas de vegetación perenne como bosques nativos o implantados, o pasturas de alfalfa, luego al de las raíces de cultivos anuales, y finalmente alimenta el flujo de evaporación directa del suelo. Este flujo puede contribuir a elevar la productividad de la vegetación, cuando el aporte de agua subsuperficial ayuda a suplir déficits en las precipitaciones, pero al superar ciertos umbrales puede causar problemas de salinización y anegamiento, provocando caída en los rendimientos y pérdidas de cultivos (Nosetto et al., 2009; Florio et al., 2014).

La llanura Pampeana es una planicie sedimentaria que abarca más de 600.000 km², con una escasa red de drenaje superficial hacia el océano y en las últimas décadas con un nivel freático cercano a la superficie que, junto a los excesos hídricos por precipitaciones, producen con frecuencia inundaciones. Los ciclos de sequía-inundación provocan cambios en la profundidad del nivel freático que ejercen una importante influencia sobre los ecosistemas naturales y cultivados (Aragón et al., 2010, Nosetto et al., 2009). En muchos ambientes de la región Pampeana, niveles freáticos cercanos a la superficie pueden convertirse en una fuente importante de agua para las plantas (Jobbágy y Jackson, 2004 ; Nosetto et al., 2009), una segunda oportunidad de usar el exceso de agua de lluvia almacenada en los suelos. Sin embargo, largos periodos de lluvias importantes pueden provocar que el nivel freático esté demasiado cerca de la superficie, afectando negativamente el crecimiento y el desarrollo de la vegetación a través de la saturación superficial (pérdida de oxígeno) y alto riesgo de salinización.

Disponer de información sistematizada de la profundidad del nivel freático en los sistemas que resultan influenciados por ellas, sumado al planteo de métodos de análisis de dichos datos para su caracterización permitirían obtener estrategias de adaptación y mitigación en

el territorio (Alsina et al, 2020). Esta información también es fundamental para alimentar y validar modelos hidrológicos para poder predecir el comportamiento del sistema hidrológico ante cambios climáticos (Videla Mensegue, 2018).

La información satelital se ha utilizado para estudiar cuestiones hidrológicas con diferentes objetivos, tales como análisis de riesgos de inundación, describir la evolución temporal de distintas variables relacionadas a los procesos de inundación como son la precipitación y/o evaporación, los cambios en la profundidad de los cuerpos de agua, la frecuencia y duración de los ciclos de inundación, entre otros. (Ballesteros, 2014). La teledetección proporciona información que permite la identificación geográfica de las áreas de inundación, aplicando un método sencillo de clasificación; y la combinación con datos de monitoreo del nivel freático local permiten conocer los impactos de las inundaciones.

La dinámica del nivel freático se puede modelar de varias maneras, desde modelos físicos y mecánicos complejos hasta modelos empíricos simples de series de tiempo y modelos estadísticos. Para la región de estudio, se calibró un modelo estadístico para estimar la fluctuación de la profundidad del nivel freático para suelos representativos de la región Pampeana. Este modelo estadístico propuesto por Cisneros et al. (1997) y ajustado por Videla Mensegue (2018) plantea que la oscilación del nivel freático puede ser caracterizado adecuadamente a través de datos de lluvia, evapotranspiración potencial y la porosidad drenable del suelo.

El propósito de este estudio fue conocer la dinámica del nivel freático, asociada principalmente a agroecosistemas agrícolas, topografía y su correlación con las precipitaciones en el oeste de la provincia de Buenos Aires, caracterizando eventos de inundación, identificar riesgos hídricos por el nivel freático cercano a la superficie, mediante el empleo de un modelo estadístico. Esta herramienta permite el seguimiento e identificación de áreas afectadas por anegamiento e inundaciones, y la frecuencia, época del año y el tiempo de duración de estos fenómenos. Permitiendo así, determinar los alcances de eventos de inundación y/o sequía, para elaborar alertas tempranas y/o planificar el uso de la tierra de dicho territorio para mitigar la incidencia de estos eventos extremos.

Objetivos

Objetivo General

Conocer el comportamiento temporal del nivel freático en la región oeste de Buenos Aires, considerando su interacción con los cuerpos de agua superficiales en eventos de inundaciones.

Objetivos Específicos

- Conocer la dinámica del nivel freático en función del comportamiento de las precipitaciones en el partido de General Villegas.
- Analizar la relación entre precipitaciones, variación del nivel freático y ocurrencia de inundaciones empleando información del territorio y el uso de sensores remotos.
- Calibrar y validar un modelo predictivo para simular en diferentes escalas espaciales (sitio y región) la ocurrencia de eventos de inundación.

Hipótesis:

La dinámica espaciotemporal del nivel freático está asociado principalmente al paisaje de la región y regulado por precipitaciones.

- La dinámica del nivel freático está asociadas al volumen de las precipitaciones en el oeste de la provincia de Buenos Aires
- La variación espaciotemporal del nivel freático está fuertemente condicionada por el paisaje.
- Cambios en el nivel freático y de las áreas inundadas podrán ser predichos con el uso de un modelo predictivo en General Villegas

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio

En Argentina, la llanura pampeana se subdivide según las características de sus suelos y de las precipitaciones en 5 subregiones: Pampa Ondulada, Pampa Central, Pampa Austral, Pampa Mesopotámica y Pampa Deprimida (Viglizzo et al., 2001). El área de estudio se encuentra en la Pampa Arenosa de la subregión Pampa Central, y está situada en el partido de General Villegas, Buenos Aires, Argentina (Fig.1). El área corresponde a la unidad geomorfológica de llanuras continentales, subunidad medanosa y de arenas finas (SAGYP-INTA, 1989; Zarate, 2003).



Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio, Partido de General Villegas, Buenos Aires, Argentina.

La región noroeste bonaerense es una extensa llanura con pendiente regional de oeste a este con un gradiente medio de 0,025 % (Zamolinski et al., 1994) (Fig. 2). El paisaje está constituido por lomas, planicies y cordones medanosos cubiertos por sedimentos de origen

eólico de reciente depositación sobre los que evolucionaron los suelos actuales. En la región, se describen cordones medanosos con orientación Sudoeste - Noreste que constituyen un obstáculo natural para el normal escurrimiento de las aguas superficiales (Damiano y Taboada, 2000). Esta área posee un bajo potencial hidráulico para la evacuación de los excedentes que se generan, fundamentalmente en su propio seno, con el agravante de recibir aportes de zonas ubicadas aguas arriba, (Paoli y Giacosa, 2003).

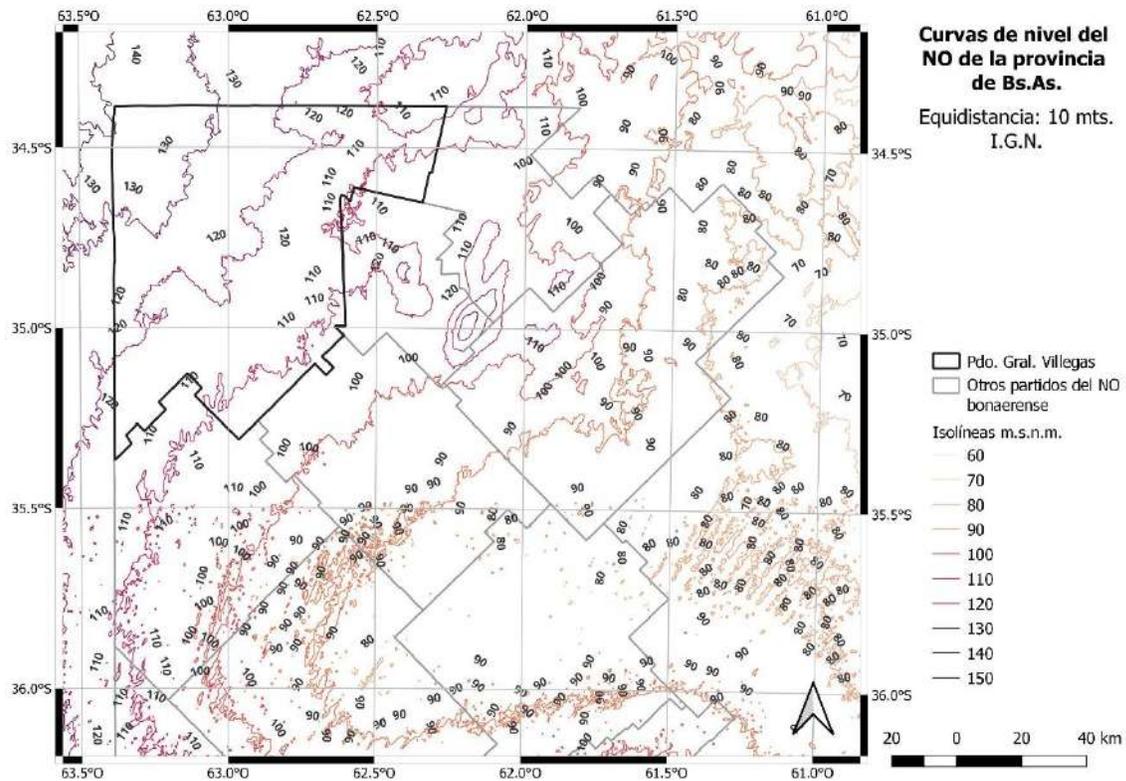


Figura 2. Mapa altimétrico del partido de General Villegas y zonas aledañas.

El clima es templado, con moderadas condiciones continentales hacia el oeste, sin grandes amplitudes térmicas diarias ni anuales. La temperatura media anual varía entre los 13°C y 16 °C de sur a norte, con medias durante el mes más cálido (enero), de entre 22 °C y 24 °C, y medias durante el mes más frío (julio) de entre 7 y 9 °C. Estas características permiten el desarrollo adecuado de especies forrajeras y de cosecha propias de regiones templadas (Díaz Zorita, 1998).

Las precipitaciones en términos generales decrecen de Noreste a Sureste, registrándose en el sector litoral más de 1000 mm año⁻¹ y en la zona más occidental menos de 500 mm año⁻¹ (Carta, 2016). La relación entre las precipitaciones y la demanda por

evapotranspiración determina un período seco desde julio a septiembre y una relación negativa entre noviembre y febrero (Díaz-Zorita et al., 2002).

Las precipitaciones del centro oeste bonaerense en el período 1918-2000, tienen un comportamiento cíclico (Pérez et al., 2003), en el cual se distinguen fases húmedas y secas separadas por fases de transición. La fase seca tuvo lugar desde mediados de la década de 1920 a fines de la década del 1940. La fase de transición seca/húmeda va desde comienzos de la década de 1950 a mediados de la década del 1970. Por último, una fase húmeda que se inicia en 1970 y continúa hasta la actualidad.

La zona se caracteriza por una incidencia cíclica de inundaciones y de sequías (Alconada Magliano et al., 2009). Períodos con elevadas precipitaciones en áreas de relieve plano y suelos con una capa de arcilla impermeable cercana a la superficie que dificulta la percolación del agua, producen inundaciones en forma de cubetas poco profundas. Estos fenómenos son exacerbados por efectos antrópicos tales como caminos, rutas y canales (Ghersa et al., 2002).

En la región Pampeana los suelos son en su mayoría del orden Molisol que se desarrollaron sobre sedimentos loésicos y con vegetación natural de pastizales, donde predominaron las especies gramíneas (Álvarez y Lavado, 1998; Ghersa et al., 2002). En la pampa arenosa los suelos son en su mayoría cultivables y algunos poseen limitaciones por susceptibilidad a la erosión eólica (Viglizzo et al., 2001).

En el partido de General Villegas (723.300 ha) la mayor parte de la superficie está ocupada por suelos Hapludoles típicos (38,5 %), Hapludoles thapto-nátricos (17,8 %), Hapludoles thapto-árgicos (16,0 %) y Hapludoles énticos (11,6 %) (Justo y Sueiro, 2013). Según la edición N°12 de Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 2014a) la nomenclatura de los suelos Hapludoles thapto-árgicos y Hapludoles thapto-nátricos antes mencionados, corresponderían a Argiudoles abrupticos y Natrudoles abrupticos, respectivamente (P. Imbellone, comunicación personal).

Los suelos se han desarrollado a partir de materiales arenosos recientes de espesor variable, asentados sobre limos arenosos de origen loésico y textura fina, poco permeables. El contacto entre ambos materiales constituye un obstáculo que retiene las aguas sub-superficiales con carácter de freática. La profundidad de este nivel freático depende del espesor del manto arenoso. Se mantiene lejos de la superficie en los suelos profundos y aflora donde la cobertura es delgada (Fig. 3).

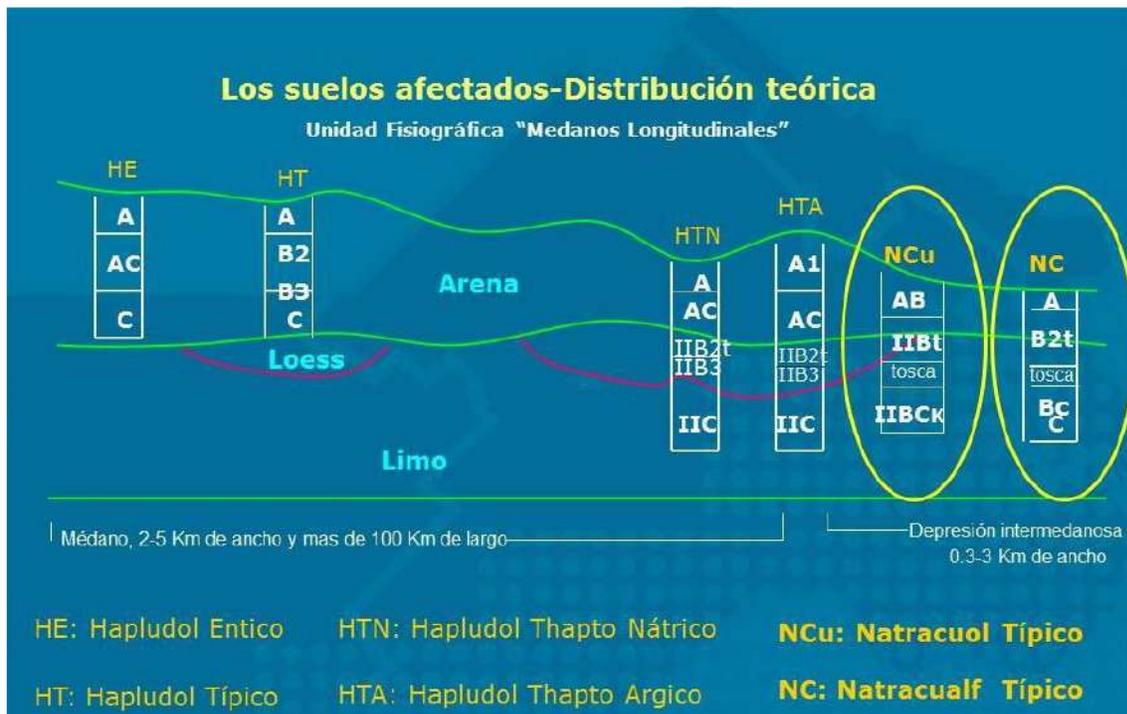


Figura 3. Esquema de la Unidad Fisiográfica de los Médanos Longitudinales de la Pampa Arenosa (Zamolinsky, 2001, comunicación personal).

Considerando la posición que ocupan en el relieve, se presenta en un paisaje característico de la región bajo estudio una representación de suelos principales y secuencias de horizontes modales. En las posiciones más altas (lomas), donde el espesor del manto arenoso es grande, se han desarrollado suelos de textura arenosa, reacción neutra a ácida, algo excesivamente drenados y baja retención de humedad (Hapludol éntico, HE). En las áreas ubicadas entre lomas, pero aun con relieve positivo, aparece un suelo con mayor cantidad de materiales finos, textura franco-arenosa, reacción neutra a ácida, mayor capacidad de retención de agua y bien drenado (Hapludol típico, HT). Cuando el relieve se hace suavemente ondulado y disminuye el espesor del manto arenoso aparecen suelos que presentan una marcada discontinuidad entre los horizontes. Hasta 40-50 cm de profundidad, el suelo es de textura franca, débilmente ácido y bajo en materia orgánica. Este material apoya en forma abrupta sobre depósitos minerales finos, franco-arcillo-limosos y moderadamente alcalinos (Hapludol thapto-árgicos, HTA). En sectores planos o ligeramente deprimidos se presenta un suelo similar en cuanto a la secuencia de horizontes, pero con el B2 fuertemente alcalino o sódico (Hapludol thapto-nátrico, HTN). Por último, en la posición más baja del relieve, constituyendo vías de escurrimiento

temporario, se han desarrollado suelos de drenaje pobre, elevada alcalinidad sódica, bajo contenido de materia orgánica y nivel freático alto (Natracualf típico, NC y Natralbol típico, NB). Estos suelos presentan perfiles con marcada discontinuidad en la permeabilidad de los materiales superiores y subyacentes, por lo que, en periodos de alta precipitación se produce la permanencia de un falso nivel freático que da origen a cementaciones (fragipanes) que impiden la infiltración del agua, la difusión del aire y la penetración radicular (Zamolinski,2001).

Los suelos del área generalmente se encuentran en asociaciones, consociaciones o complejos, mostrando variabilidad espacial que se manifiesta en forma de mosaico y son conocidos como “lotes overos”. En algunas áreas, independientemente del tipo de suelo y a profundidades variables, se observa la presencia de Duripanes de calcáreo (planchas de tosca) que limitan la profundidad explorable del perfil de suelo (SAGYP-INTA, 1989).

Muestreo de los niveles freáticos

Se recabaron y compilaron series temporales de datos de nivel freático a partir de la toma de datos de freatímetros distribuidos en establecimientos rurales del partido de General Villegas. El nivel freático se definió como la distancia vertical entre el nivel de agua libre en freatímetro y la superficie del terreno en el punto de medición. Las series temporales abarcaron un periodo de 15 años, entre los años 2000 y 2014.

La información recopilada se empleó para conformar series temporales de datos de acuerdo con características de la ubicación a fin de mejorar su posterior análisis. Para cada serie se incorporó su identificación, coordenadas geográficas, elevación, tipo de suelo y unidades de tiempo.

Sitios de relevamiento de aguas subterráneas

Se reunió información de veintitrés pozos de monitoreo, distribuidos en diferentes posiciones topográficas del partido de General Villegas (Fig. 4).

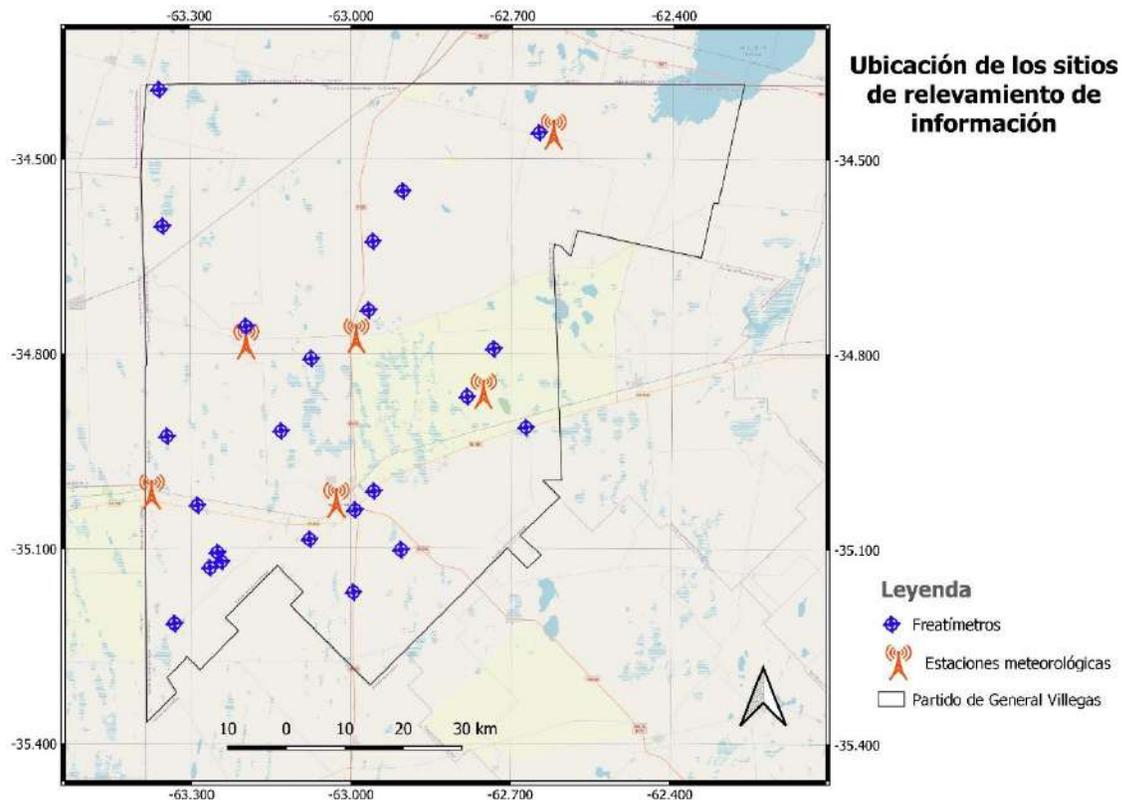


Figura 4. Ubicación de los sitios de relevamiento de la información freática en el partido de General Villegas.

Los pozos de relevamiento son tuberías de PVC (diámetro exterior de 10 cm), que se extienden 12 m de profundidad y 0,5 m por encima de la superficie del suelo. La abertura de la tubería superior se tapó con una tapa de PVC. En la sección inferior de 0,5 m de la tubería, los caños se ranuraron. Para evitar que el agua de lluvia baje por la pared de la tubería, la tubería de PVC a nivel del suelo se cementó y encamisó. Se midió el nivel freático una vez al mes durante 15 años. La elevación absoluta de la posición de cada pozo se determinó con un GPS diferencial (Trimble 4600 LS, Trimble Navigation Ltd., Sunnyvale, CA, EE. UU.; precisión estática horizontal = 5 mm; precisión estática vertical = 10 mm). Además, se relevó la información de precipitaciones de estaciones meteorológicas distribuidas en distintos puntos del partido de General Villegas. Esta información, relevada de manera automática permitió constatar la consistencia de los datos relevados manualmente en cada sitio donde están ubicados los freáticos.

Análisis de los datos

Para estudiar la variabilidad de los parámetros se realizó un análisis de la distribución de frecuencias y de los estadísticos descriptivos: media, mínimo, máximo y coeficiente de variación (CV). Para este análisis se utilizó el software Infostat (Di Rienzo et al, 2017). Con el fin de analizar la relación entre la profundidad del agua subsuperficial y su vinculación con el paisaje se realizó un análisis de componentes principales, considerando los datos desde el año 2003 al 2015 para lograr series balanceadas.

Las posibles relaciones entre la dinámica de aguas subsuperficiales fueron evaluadas a través del coeficiente de correlación lineal de Pearson entre pares de variables para igual año, y del mismo modo entre las variables climáticas y la posición del terreno. Para cada punto de relevamiento de nivel freático se evaluó posibles diferencias en las condiciones climáticas y la posición del paisaje en cada zona a través de la prueba F de Fisher. Para evaluar la existencia de diferencias en el nivel freático medio de acuerdo a la posición del relieve, el año considerado y la interacción entre ambos se ajustaron modelos mixtos (Pinheiro & Bates, 2000), estos permitieron considerar la correlación existente entre las mediciones a lo largo de los años en cada punto de muestreo. Para modelar la matriz de correlación se consideró la estructura autoregresiva (AR1) y la desestructurada. Los distintos modelos ajustados se compararon a través del criterio de Akaike (AIC), seleccionando como óptimo el modelo que menor AIC presentó. Se utilizó el programa estadístico InfoStat (Di Rienzo et al., 2017) y su vínculo con R (R Core Team, 2018). Las pruebas de diferencias de medias se realizaron a través de la prueba LSD de Fisher con corrección de Bonferroni.

Obtención y procesamiento de imágenes satelitales

Para estudiar los efectos de las inundaciones se procedió a obtener las imágenes satelitales correspondientes al área de estudio para el periodo comprendido entre 2000-2015. Se analizaron imágenes del satélite Landsat 5, Landsat 7 TM y Landsat 8 OLI/TIRS, comprendiendo siempre que fuera posible, el mes de febrero de cada año. Se seleccionó este mes porque la situación encontrada va a definir el impacto en los sistemas del partido. La imagen utilizada corresponde al path & row 228/84 porque contiene el partido de General Villegas en su totalidad.

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 imágenes del servidor gratuito del Servicio Geológico de los Estados Unidos- USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov/>).

- Reproyección: las imágenes satelitales fueron reproyectadas al sistema de referencia de coordenadas planas Gauss Krüger, faja 3, utilizando el software libre y gratuito QGIS (versión ejecutable 3.2). La reproyección se realizó mediante el comando transformaciones geográficas/reproyectar capa, donde se pasó de la proyección UTM zona 20 S (código: 32720) a Gauss Krüger faja 3 (código 22183). A continuación, cada imagen satelital fue ajustada con una imagen

ortorectificada del área en cuestión (path/row 228-84) obtenida previamente del servidor de la NASA.

- Recorte del área de estudio: el recorte del área de interés se hizo a través de Herramientas básicas para capas raster: cortar capa raster con capa de polígono del partido de General Villegas.

- Cálculo y evolución 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 de las imágenes con Herramientas de análisis para capas raster/clasificación no supervisada (clustering). En la clasificación se trabajó con la composición multi-banda en falso color compuesto de los canales RGB 453 del Landsat 5 TM, RGB 453 del Landsat 7ETM+ y RGB 564 para Landsat 8 OLI/TIRS. Estas combinaciones de bandas permiten una visualización de los sectores ocupados por agua (zonas inundadas), en distintas tonalidades que van del azul al negro, lo que facilita distinguir claramente el agua del resto de las cubiertas naturales.

Los raster obtenidos en cada clasificación fueron convertidos al sistema vectorial a través del comando vectorización/sectorizar capa raster (polígonos). El resultado del proceso de clasificación, correspondiente a la clase agua se procedió a guardarla, mediante el comando capa/exportar a/SHP. Luego en cada tabla de atributos de cada capa, se calculó la superficie de cada polígono a través del comando capa/agregar información

geométrica/área. De esta forma quedaron constituidos 15 shapefiles de superficie inundada del área de estudio.

Modelos predictivos para modelizar el nivel de aguas subsuperficiales

Modelo Estadístico

Las series de datos recabadas se analizaron por un modelo estadístico desarrollado por Cisneros et al. (1997). Es una ecuación de primer grado que relaciona la precipitación (P, mm), la evapotranspiración potencial (ETP, mm) y porosidad drenable del suelo (μ) con la variación del nivel freático (ΔNF , cm) en un período de tiempo mensual. La ecuación tiene la siguiente forma:

$$\Delta NF_{t_2-t_1} = \frac{0,1}{\mu} * (PPT - ETP)_{t_2-t_1} + e$$

Dónde:

$\Delta NF_{t_1-t_2}$ = Variación del nivel freático en el período t_1-t_2 (cm)

μ = porosidad drenable (agua entre saturación y capacidad de campo)

$PPT-ETP_{t_2-t_1}$ = diferencia entre precipitación y evapotranspiración en el mismo período t_1-t (mm, el valor del coeficiente 0,1 resulta del paso de mm a cm)

e = coeficiente de error

Para el cálculo del balance hídrico se utilizaron las precipitaciones registradas por los campos y el dato de evapotranspiración de referencia tomado de estaciones meteorológicas automáticas cercanas a los campos. La calibración óptima de los parámetros del modelo se realizó para cada freatómetro mediante el uso de Solver en Excel (Fig. 5), en donde se ajustaron los valores μ y e para cada freatómetro, dejando como parámetros de carga los valores de precipitación y evapotranspiración para estimar la variación en el nivel freático.



Figura 5. Modelo estadístico calibrado en Solver en Excel, ejemplo de caso analizado.

Indicadores estadísticos en la calibración y validación del modelo

El modelo calcula el nivel freático en centímetros, a partir del nivel freático observado, las precipitaciones y la evapotranspiración, en una fracción de tiempo mensual. La calibración fue realizada con grupos de datos seleccionados al azar ($n= 2830$), los mismos se agruparon en series de tiempo según los eventos climáticos ocurridos. Para la validación, se utilizaron datos del nivel freático con un total ($n= 1220$) con el mismo criterio de agrupamiento de series de tiempo.

Se utilizó el software IRENE (Fila et al., 2003) para evaluar el rendimiento del modelo con varios indicadores estadísticos: coeficiente de determinación, índice de concordancia (d, Willmott, 1982), error cuadrático medio (RMSE), desviación estándar general (GSD, %, Jørgensen et al., 1986), variación cuadrática media (MSV, %, Kobayashi y Salam, 2000) y sesgo (SB, %, Kobayashi y Salam, 2000). El sesgo y el MSV se derivan de la partición del error cuadrático medio y, en consecuencia, son complementarios.

Coeficiente de determinación (R^2)

El coeficiente de determinación (R^2) es definido como el valor al cuadrado del coeficiente de correlación de Pearson. R^2 puede ser también interpretado como la magnitud de la varianza explicada por el modelo comparado con la varianza total observada. El rango de valores que puede tomar se encuentra entre 0 y 1. Cuando R^2 es cercano a 1 indica una

buena agregación de los resultados del modelo con los datos observados y, normalmente, valores por encima de 0,5 son considerados como aceptable en las simulaciones (Moriasi et al., 2007).

Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE)

Es uno de los indicadores estadísticos más utilizados (Jacovides y Kontoyiannis, 1995). Esta variable tiene como ventaja que mide la magnitud media de la diferencia entre los valores observados y los simulados en las mismas unidades, aplicándose para evaluar el rendimiento del modelo. Toma valores desde 0 hasta $+\infty$, indicando un buen ajuste con el primer valor y pobre con el segundo. Sin embargo, no diferencia entre sobrestimaciones y subestimaciones. El criterio impuesto de que la calibración y validación del modelo cumplen en cuanto a este estadístico, se establece, como límite superior, en un $\pm 20\%$ del valor máximo observado de la variable que se analice.

Raíz del Error Cuadrático Medio Normalizado (RRMSE)

Debido a que RMSE es expresado en las unidades de la variable de estudio, esto no permite que el modelo sea comprobado bajo un amplio rango de condiciones climáticas (Jacovides y Kontoyiannis, 1995). Por tanto, RMSE puede ser normalizado usando el valor medio de la variable observada. RRMSE se expresa como porcentaje y es una indicación de la diferencia relativa entre los datos obtenidos por el modelo y las observaciones. Un RRMSE inferior al 10% puede ser considerada como excelente, buena si se encuentra entre un 10% y un 20%, aceptable para un porcentaje entre un 20% y 30% y mala si es mayor de un 30% (Bannayan y Hoogenbom, 2009; Raes et al., 2012).

Índice de agregación de Willmott o estadístico “d”

Este estadístico representa la relación entre el error cuadrático medio y el error potencial (Willmott, 1982). El rango de este estadístico se encuentra entre 0 y 1, donde 0 indica que no se tiene ajuste alguno y 1 indica un ajuste perfecto entre los datos observados y los predichos por el modelo. La desventaja que ofrece este estadístico es que se pueden obtener valores relativamente altos (sobre 0,65) incluso cuando la robustez del modelo es pobre. Así mismo, este índice no es muy sensible a las sobrestimaciones o subestimaciones sistemáticas (Krause et al., 2005). En este sentido, el criterio establecido es de obtener valores superiores a 0,65 en la calibración y validación de los modelos.

Con el fin de evaluar el desempeño del modelo al considerar las condiciones particulares de la región, los datos se separaron en distintas secuencias de años de acuerdo con la precipitación de cada periodo. Por lo tanto, esta categorización de datos permite la evaluación del desempeño del modelo bajo condiciones contrastantes de variabilidad de lluvia en el área.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización climática del período de estudio

Para el período 2000-2014 se estimó una precipitación media de 830 mm año⁻¹ con un desvío estándar de 240 mm año⁻¹. Se registraron precipitaciones mínimas en el área de estudio cercanas a los 448 mm año⁻¹ (año 2009) y precipitaciones máximas que llegaron a 1169 mm año⁻¹ (año 2012). La evapotranspiración potencial promedio fue de 1194 mm año⁻¹ con un desvío estándar menor al de la precipitación (94 mm año⁻¹) y los valores mínimos y máximos registrados variaron entre 1060 y 1380 mm año⁻¹ (Fig. 6). En promedio para todo el período de estudio, el cociente entre precipitación y evapotranspiración fue de 0,70, lo que correspondió a un déficit climático medio de 364 mm año⁻¹. Además, se observó que la precipitación superó a la evapotranspiración el 22 % de los años. El análisis de correlación mostró una relación inversa ($r=-0,69$; $p < 0,05$) entre la PPT y ETP, lo que sugiere que la situación de excesos hídricos de años lluviosos, con el consecuente ascenso de los niveles freáticos es exacerbada por la menor demanda atmosférica de vapor.

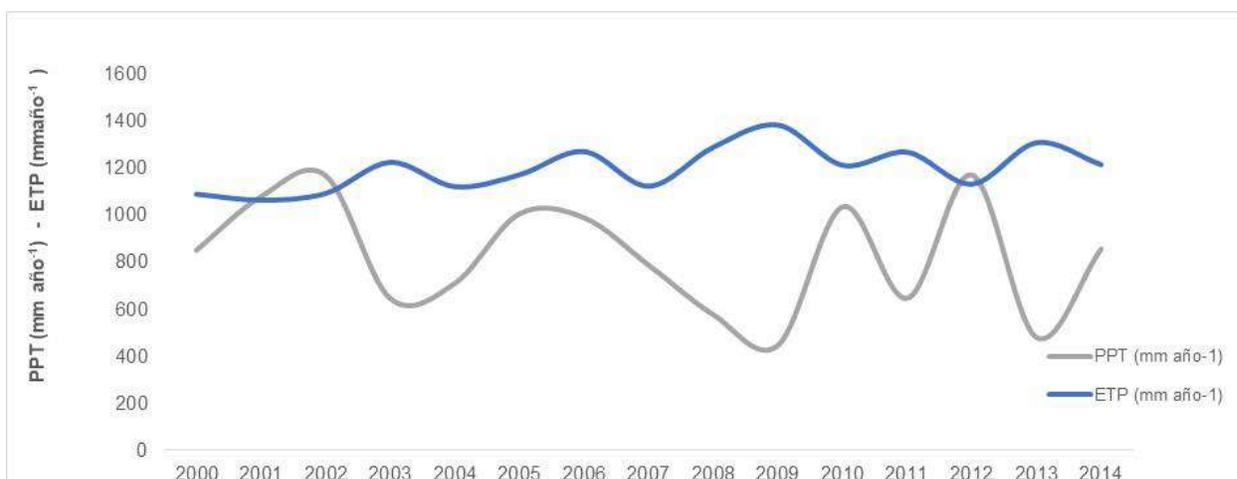


Figura 6. Valores mensuales de precipitación y evapotranspiración para General Villegas en el periodo 2000-2014.

Análisis de la variabilidad freática

La base de datos cuenta con 23 estaciones de medición del nivel freático con 14 años de datos permitiendo el análisis de una serie de largo plazo.

La profundidad del nivel freático medio estimada para el período de análisis (2000 -2014) fue de 237 cm. Los valores mínimos y máximos medios de la región de estudio fueron 18 (en el año 2001) y 506 cm (en el año 2011), respectivamente, lo que indica un rango de variación máximo de 488 cm.

Las variaciones del nivel freático a lo largo del año muestran cierta estacionalidad, permitiendo identificar períodos de recarga y descarga freática. Los meses invernales son los más estables, con escasas variaciones y con una muy baja variabilidad entre años.

En los años 2000, 2001 y 2002, el nivel freático medio fue de 149 cm, 171 cm y 173 cm, respectivamente. Las máximas tasas de ascenso de nivel ocurrieron en septiembre 2000, octubre 2001, febrero 2002 y agosto 2002 con valores entre 4,9 a 11,4 cm mes⁻¹, mientras que las máximas tasas de descenso de nivel fueron en julio 2009 y marzo del 2011, con valores de entre 4,5 y 6,5 cm mes⁻¹ Esto nos indica que el nivel freático tiende a ascender hacia la superficie a tasas más veloces que a las que se profundiza y sugiere un comportamiento de tipo pulso (Fig. 7).

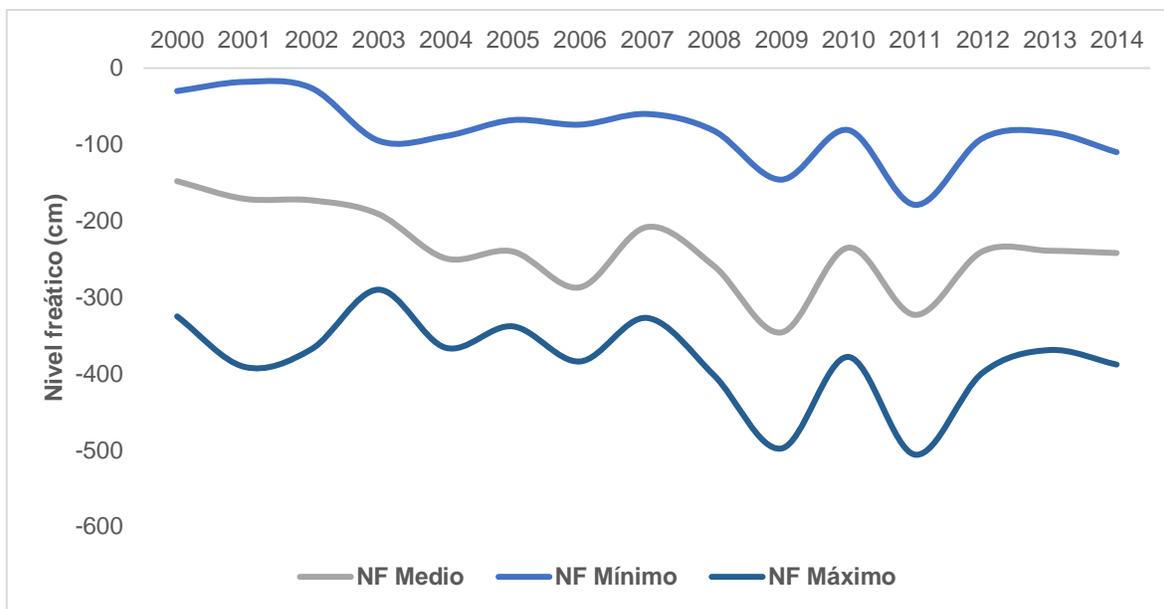


Figura 7. Valores mensuales de nivel freático en General Villegas para el período 2000-2014.

Relación entre el nivel freático y la posición en el paisaje

El nivel freático mostró una asociación alta con la posición del paisaje (loma, media lona y bajo) en la serie de 11 años analizada. (Fig. 8) El valor promedio del nivel freático para la posición alta del paisaje fue de 327 cm (CV= 13,90), para la posición de media loma fue de 252 cm (CV= 17,66) y para la posición baja fue de 195 cm (CV= 30,38).

Si bien ambas variables control no son independientes entre sí, reflejando una manifestación de los excesos hídricos en distintas escalas temporales, es útil analizarlas en forma separada para reconocer su grado de influencia y temporalidad, a lo que se suma el hecho de que el uso de la tierra y las obras de drenaje pueden desacoplarlas.

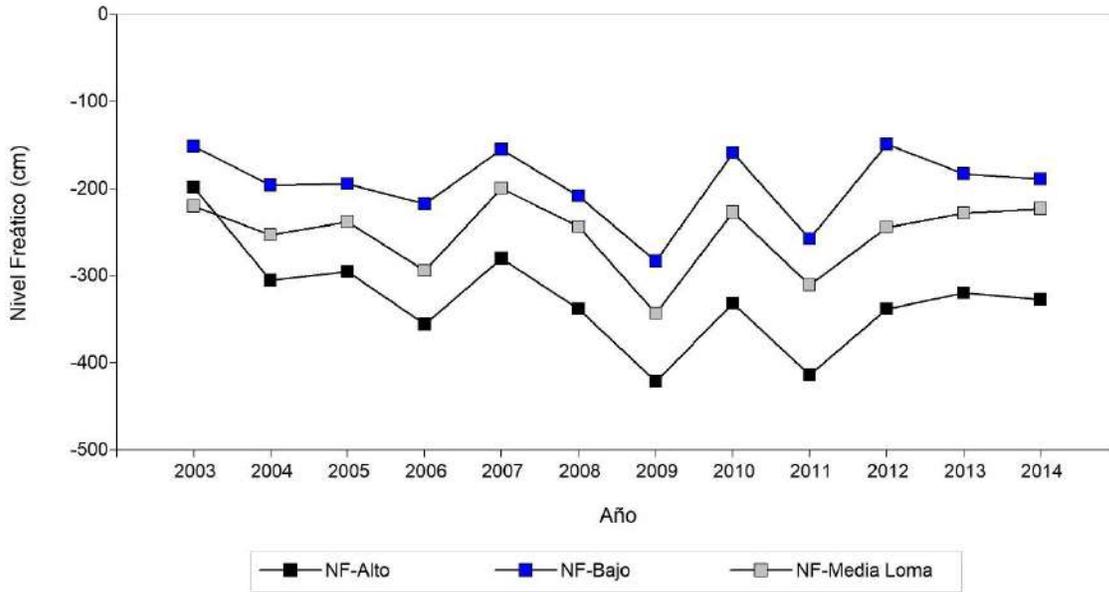


Figura 8. Análisis del nivel freático mensual y la posición en el paisaje para el periodo de 2003-2014 ($p < 0,05$).

Análisis de recurrencia de inundaciones

General Villegas ha sufrido inundaciones con cierta periodicidad, provocadas por las precipitaciones y por el consecuente ascenso del nivel freático que se produce. El área de estudio mostró algunas oscilaciones de la superficie cubierta por agua a lo largo del período de 15 años de estudio con valores extremos de 0,50 y 8,24%.

Para describir la frecuencia de anegamientos entre 2000 y 2015 se utilizó imágenes del satélite Landsat (5 a 8) (Anexo: Fig1 a Fig.10). En esta secuencia de imágenes se puede apreciar que el 46,6 % de los años evaluados presenta valores de superficie anegadas citadas en el párrafo anterior.

En este período, se lograron apreciar claramente varias etapas de suelos encharcados. Los mismos tuvieron sus máximos de afectación durante los años 2002 y 2003, llegando el área inundada a cubrir el 8,24 y 7,13 % del paisaje respectivamente (Fig. 9).

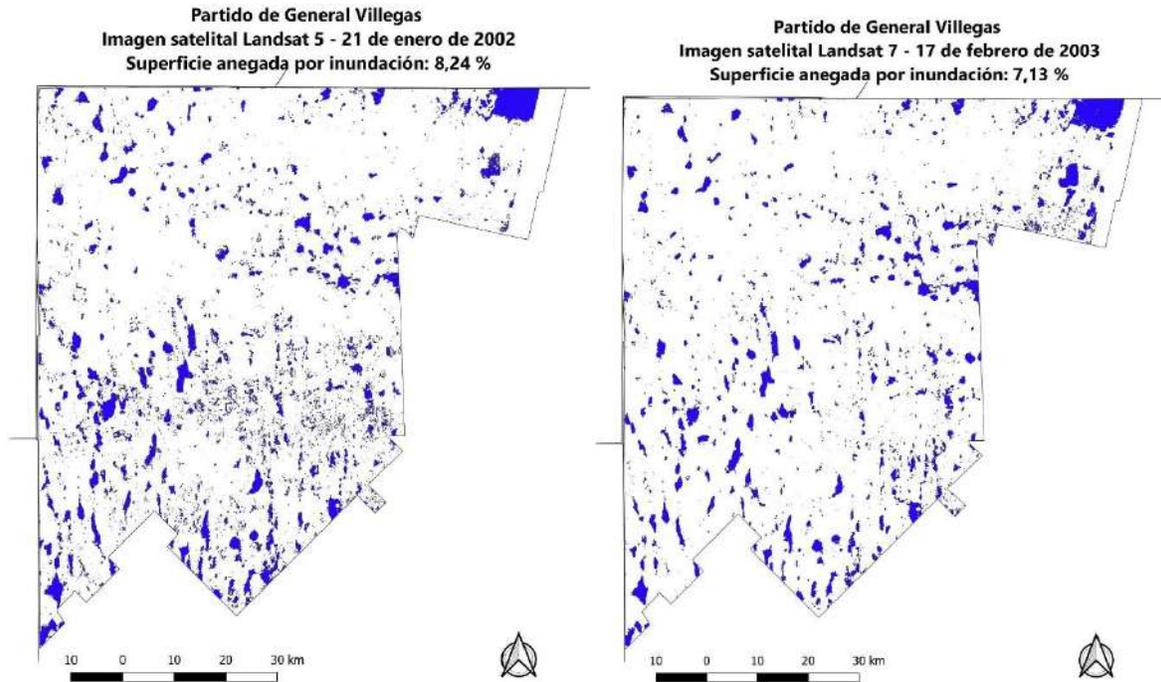


Figura 9. Superficie anegada (%) en General Villegas en los años 2002 y 2003.

Se identificaron también, otros eventos que impactaron en la superficie anegada del territorio, aunque no superaron el 4,16 %. Estos eventos ocurrieron en los años 2005, 2007 y 2013 (Fig. 10).



Figura 10. Superficie anegada (%) en General Villegas en los años 2005, 2007 y 2013.

Se estudió el comportamiento del nivel freático frente el área inundada (%) y se observó que estuvieron relacionados de manera similar en ambos períodos. Los sitios del paisaje que presentan niveles freáticos más profundos (> 250 cm), los ascensos del nivel

manifiestan aumentos del área inundada en menores superficies. En cambio, los lugares que registran niveles más superficiales, los mismos cambios de nivel manifiestan mayores aumentos del área inundada. Se observó una relación negativa entre el nivel freático y el área inundada (R^2 0,55 y $p < 0,005$).

Los resultados obtenidos con el análisis de la información del partido de General Villegas permiten confirmar que las precipitaciones, cantidad y estacionalidad, afectan la dinámica del nivel freático. Si los promedios anuales de lluvias están por encima de los valores normales, se evidencian los máximos ascensos y la ocurrencia de áreas inundadas. Las diferentes posiciones del paisaje, muestran un mayor o menor grado de afectación de estas condiciones, según la posición sea de bajo, media loma o loma. Los suelos del área de estudio, también son un factor de impacto, ya que la presencia de capas de lenta o rápida permeabilidad subsuperficial como por ejemplo los horizontes B texturales afectan la dinámica mencionada.

Según Álvarez (2018) las situaciones de anegamiento en la región tienen dos componentes: a) uno interno propio del suelo, influenciado por la permeabilidad y relaciones con el nivel freático, y b) otro externo, dependiente de la configuración de la pendiente. No obstante, debe tenerse en cuenta el origen del agua inundante (superficial o freático), la periodicidad con que ocurre este fenómeno, así como, su duración. Por esto, el balance hídrico de estos sistemas está impulsado principalmente por la precipitación y la evapotranspiración, mientras que los flujos de aguas subterráneas y su conexión con aguas superficiales son altamente dependientes de la conductividad hidráulica y textura/porosidad de los suelos (Brunke y Gonser, 1997; Ferone y Devito, 2004; Kollet, 2009).

Los suelos de la región bajo estudio presentan perfiles con superposición de diferentes materiales. Son comunes los horizontes B, endurecidos, que provocan y dificultan el drenaje interno, áreas deprimidas con suelos sódicos, y a veces también salinos. La cuantificación del área inundada (Tabla 1) permitió identificar que los mayores porcentajes inundados correspondían a suelos con este tipo de características (INTA, 2010), siendo las más comunes las series Cañada Seca (Cse, Hapludoles thapto árgico), series Lazzarino (Lz) y Pichincha (Pch, Hapludoles thapto nátricos), serie Drable (Dr, Natracuoles típicos) y serie Balbín (Bb, Natracuol dúricos). La serie Lincoln (Ln) también presenta un alto grado de afectación, ya que comparte las características físicas con las anteriormente descriptas por ser una asociación de series de suelo.

Tabla 1. Cuantificación del área inundada según tipos de suelos en General Villegas

Unidad Cartográfica	Superficie	Tipo de suelos
Pichincha (Pch)	8610 ha	Hapludol thapto nátrico
Cañada Seca(Cse)	6510 ha	Hapludol thapto árgico
Lincoln (Ln)	6500 ha	Arguidol típico
Lazzarino (Lz)	3825 ha	Hapludol thapto nátrico
Drable (Dr)	2840 ha	Natracuol típico
Balbín (Bb)	1522 ha	Natracuol dúrico

La región en estudio mostró momentos con importantes aumentos del nivel freático e inundaciones con diferente magnitud en cuanto a superficie afectada. Las posiciones del paisaje, altas o bajas, mostraron diferente nivel de afectación. Según Aragón (2010) los contrastes consistentes entre los sitios de las tierras altas y las tierras bajas se hicieron evidentes. El área inundada promedio y máxima aumentó hacia los sitios de baja elevación y, paralelamente a esta tendencia, los niveles de agua subterránea estaban más cerca de la superficie. En este estudio encontramos que en el periodo 2000 al 2003, unas 61.000 hectáreas permanecieron cubiertas por cuerpos de agua, que es una de las zonas más productivas de Argentina. Esta situación, sin duda, abre desafíos y conflictos para los productores de la tierra, que intentan equilibrar los beneficios de las profundidades intermedias del nivel freático que maximiza el rendimiento de los cultivos (Nosetto et al., 2009) frente a niveles poco profundos que provocan el anegamiento y daños a los cultivos. (Lavado y Taboada, 1988; Viglizzo y Frank, 2006).

Los niveles freáticos alcanzados en General Villegas, plantean la existencia de un nuevo escenario hidrológico para la región, que incluye mayor vulnerabilidad de la infraestructura y logística rural y urbana a inundaciones y una influencia más intensa del nivel freático sobre los cultivos, tanto positivas (aportes), como negativas (anegamiento) (García, 2019; Alsina 2020). El hecho de que los ciclos de inundación se desarrollen gradualmente hasta que se alcancen los umbrales críticos exige implementar sistemas de alerta temprana, para las partes involucradas en la gestión de la tierra. Es importante tener en cuenta que cuando el clima emerge como uno de los principales impulsores de los ciclos de inundación, su interacción con la cobertura del suelo y las decisiones sobre el uso del suelo pueden ser igualmente importantes para dar forma a la hidrología de las partes más planas de la región pampeana (Nosetto et al., 2008, 2009; Viglizzo et al., 2009). Por lo tanto, un sistema de monitoreo apropiado en las áreas del territorio donde sus características de suelo presentan

mayor vulnerabilidad, junto a información sobre los niveles freáticos, además de otros datos climáticos como precipitación y evapotranspiración, sirven como herramientas apropiadas para diseñar alertas tempranas en General Villegas y generar cartografías de vulnerabilidad que permita identificar las áreas problemáticas del territorio.

Modelos Predictivos

Ecuación de Regresión

Las variaciones estacionales e interanuales de las condiciones climáticas de la región en estudio influyen en la dinámica de aguas subsuperficiales. Contar con herramientas que permitan poder predecir escenarios de nivel freático y los posibles futuros comportamientos de las variables que pueden afectar positiva o negativamente al mismo es muy importante para General Villegas. Teniendo en cuenta la complejidad de estas relaciones, la mejor forma de analizarlas es a través de modelos de simulación. En esta tesis se ajustó la dinámica de agua subsuperficial a través de una ecuación de regresión simple. Este modelo permite analizar algunos de los procesos dinámicos naturales que ocurren en el ecosistema. Como fue mencionado, este modelo estadístico utiliza la ecuación original de Cisneros et al. (1997) como punto de partida para calcular la dinámica del nivel freático, en base a los registros de nivel freático observado, de precipitación, y de evapotranspiración.

Calibración del modelo

Para la calibración del modelo se utilizaron los datos de nivel freático diferenciados por distintos sitios y en años secos, húmedos y normales, en el partido de General Villegas. Se ajustaron ciertos parámetros del modelo (Nivel freático, precipitación y evapotranspiración) para obtener una buena relación entre los valores obtenidos.

La relación entre condiciones hidrológicas y meteorológicas se realizó considerando múltiples escalas temporales. Se encontró una fuerte asociación entre las variables estudiadas, cuyas máximas correlaciones se obtuvieron para periodos de integración de 24 y 48 meses, perdiendo peso dicho análisis en periodos más extensos (Fig.11). Se estudió el comportamiento del nivel freático particionando en distintos periodos de tiempo: 2000-2004, (Fig.12), 2005-2006 (Fig. 13), 2007-2008 (Fig.14), 2009-2011 (Fig.15) y 2012-2014 (Fig. 16), con el fin de evaluar si en cada periodo las diferencias en el registro de precipitaciones afectaron directamente el resultado de la ecuación. La dinámica del nivel

freático depende fundamentalmente del agua de lluvia que se infiltra migrando a la zona de saturación. Como consecuencia de las lluvias el nivel asciende (años 2000, 2001, 2002, 2007 y 2010), y caso contrario ocurre cuando existen períodos de escasas precipitaciones (2009 y 2011). Las oscilaciones del nivel freático tomado como promedio anual del período 2000-2015 evidencia un ascenso en el período.

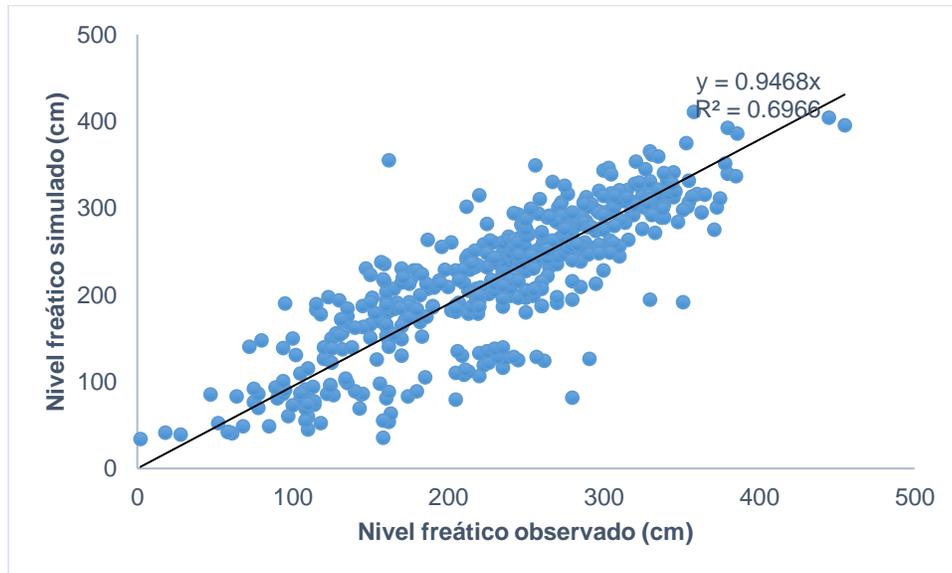


Figura 11. Relación entre el nivel freático simulado y el nivel freático observado en el período 2000-2014

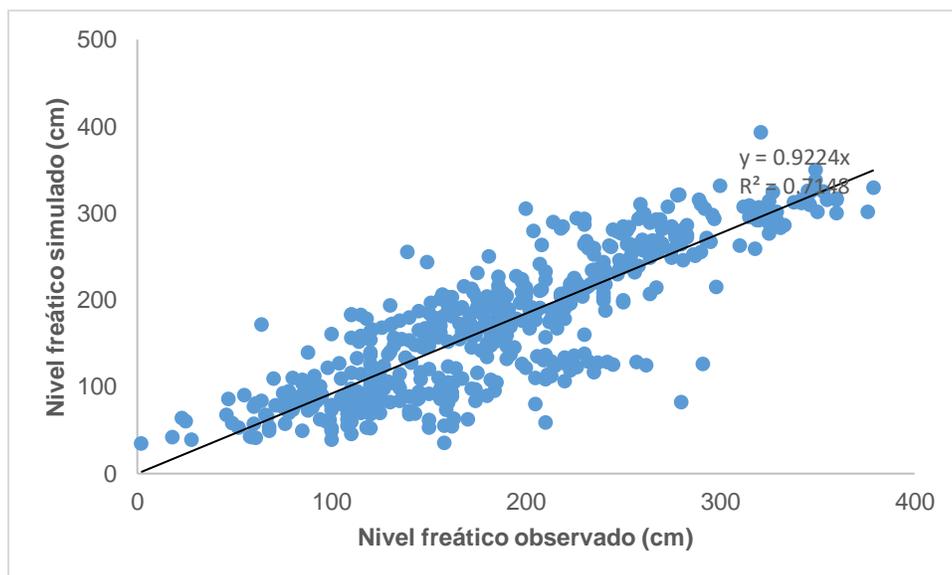


Figura 12. Relación entre el nivel freático simulado y el nivel freático observado en el período 2000-2004

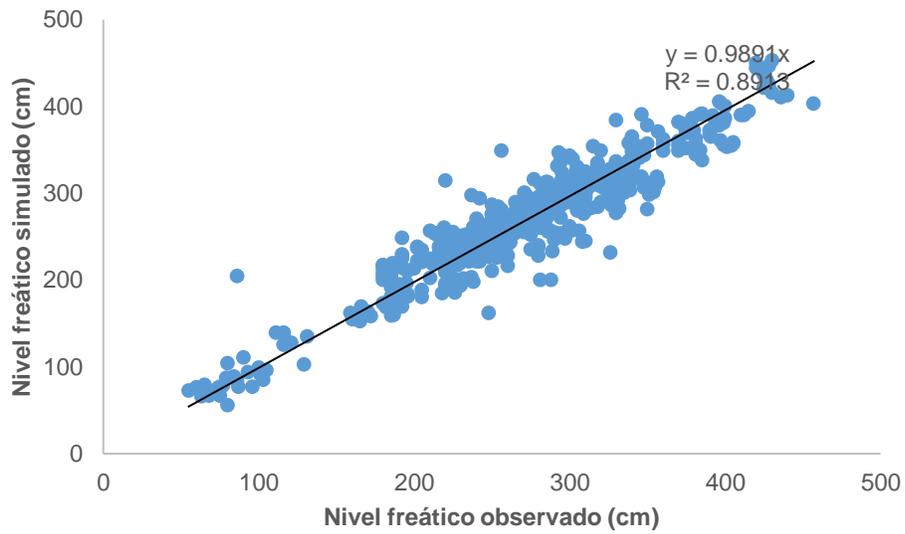


Figura 13. Relación entre el nivel freático simulado y el nivel freático observado en el período 2005-2006

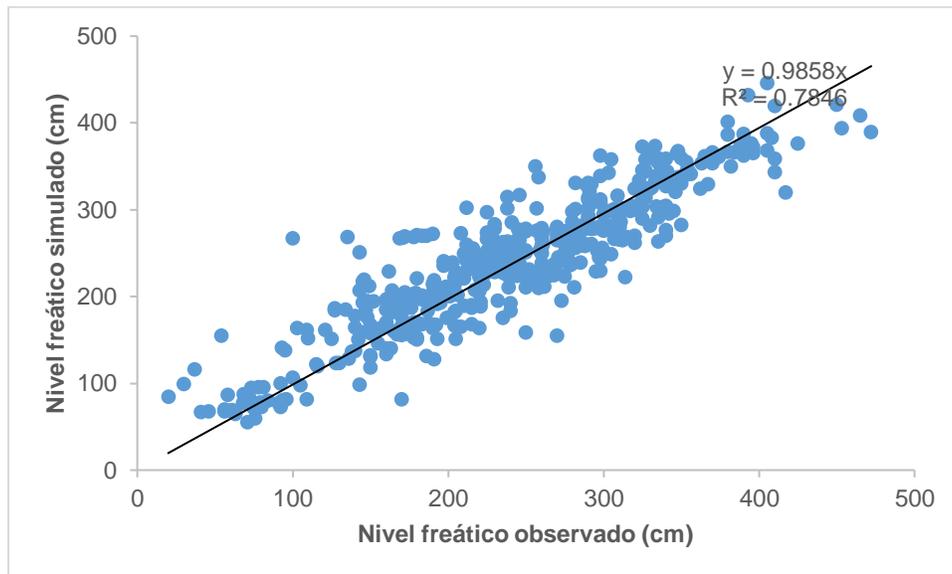


Figura 14 Relación entre el nivel freático simulado y el nivel freático observado en el período 2007-2008

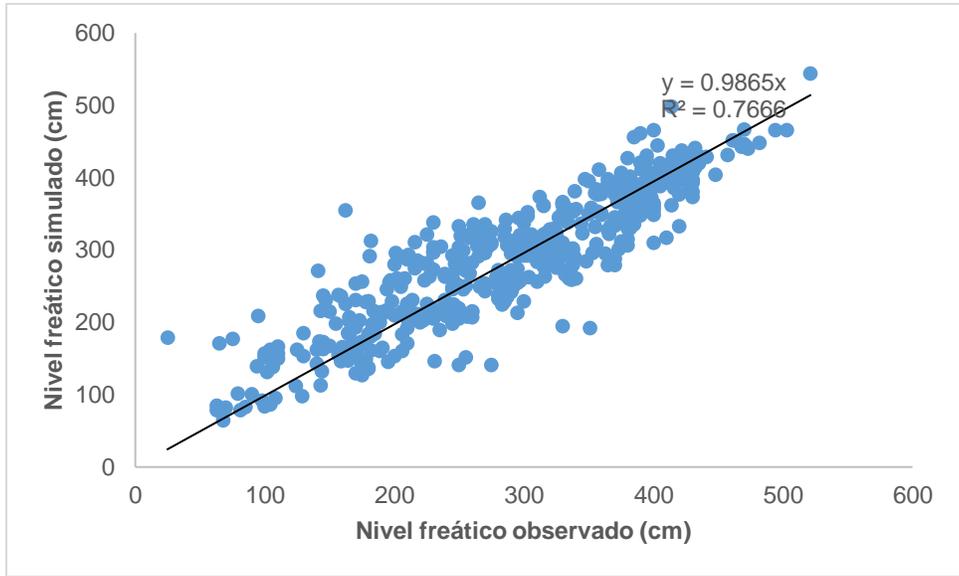


Figura 15. Relación entre el nivel freático simulado y el nivel freático observado en el período 2009-2011

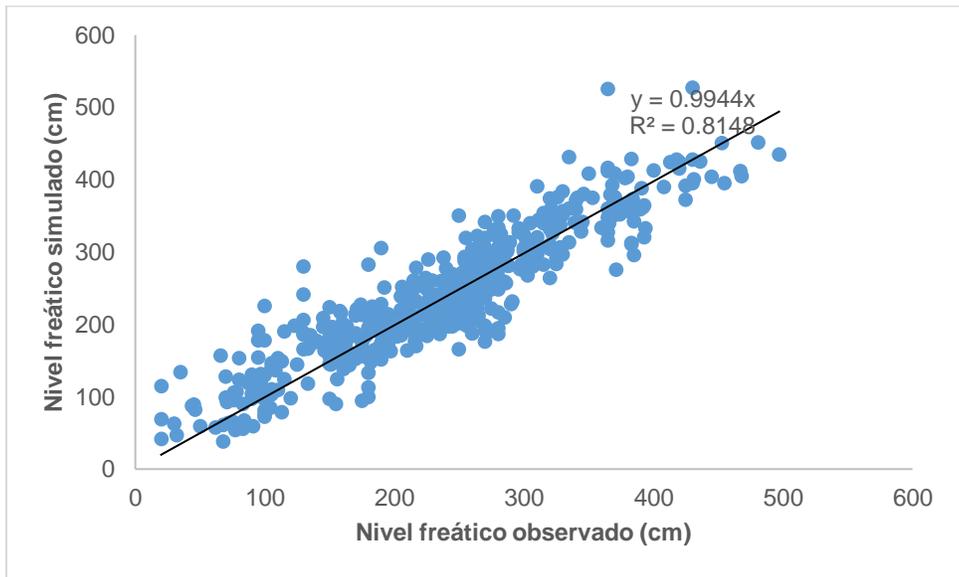


Figura 16. Relación entre el nivel freático simulado y el nivel freático observado en el período 2012-2014.

Con respecto a los indicadores estadísticos, el coeficiente de determinación (R^2), resultante de relacionar linealmente los valores simulados y observados, fueron buenos con valores mínimos de 0,69 y valores máximos de 0,90. En general, analizando cada unidad de origen y pendiente en la recta de regresión, podemos decir que los datos ingresados y los modelados son consistentes en la relación.

Los valores de estimación de RRMSE obtenidos en las simulaciones analizadas variaron en el rango de 25 a 51,8 %, expresando simulaciones buenas y muy buenas, respectivamente. El RMSE proporcionó resultados adecuados en diferentes sitios simulados, en todas las calibraciones osciló, en general, entre 19,9 y 52,7 cm. Finalmente, el índice de concordancia (d) fue de 0,91, medida del error relativo del modelo, al aproximarse a 1 evidencia que los valores simulados y observados son idénticos. En líneas generales, el análisis de los resultados estadísticos utilizados en la calibración, pueden ser suficientes para que este tipo de modelo tenga un nivel de aproximación adecuado para evaluar el comportamiento de los mismos. No obstante, cada uno tiene sus propias fortalezas y debilidades; cuantificación de la dispersión de los datos, la sensibilidad a los valores extremos o la percepción a la sobre estimación o sub estimación; lo que significa que es necesario el uso de un conjunto de diferentes indicadores para evaluar suficientemente el modelo.

Todos los resultados demuestran que este modelo estadístico explica adecuadamente el nivel freático evaluado bajo las condiciones ambientales y edáficas del partido de General Villegas (Tabla 2).

Tabla 2: Resumen estadístico de la calidad predictiva de la ecuación de regresión para los diferentes sitios de General Villegas.

Sitios	μ	e	Prom. Simulado	Prom. Observ	Precipitación (mm)	Evapotranspiración	RRMSE (%)	RMSE (cm)	d (adim)	Residuos	Unidad Cartográfica	Posición en el paisaje
Sitio 1	0,2370	19,292	282	281	75	155	30,74	30,75	0,929	-0,70	Hapludol éntico	Media Loma
Sitio 2	0,26	21,538	276	277	70	155	31,00	31,00	0,916	0,60	Hapludol thapto árgico	Media Loma
Sitio 3	0,16	12,121	217	236	73	169	49,16	52,76	0,862	19,10	Argiudol típico	Media Loma
Sitio 4	0,195	15,265	173	183	68	154	46,54	47,62	0,863	10,10	Argiudol típico	Bajo
Sitio 5	0,302	24,067	239	241	76	154	51,06	51,08	0,907	1,70	Hapludol thapto árgico	Bajo
Sitio 6	0,195	16,098	359	363	66	158	27,53	27,79	0,931	3,80	Hapludol éntico	Media Loma
Sitio 7	0,207	18,117	97	98	66	158	19,91	19,93	0,930	0,90	Hapludol éntico	Bajo
Sitio 8	0,354	18,061	187	189	66	158	35,54	35,65	0,899	2,80	Hapludol típico	Alto
Sitio 9	0,188	14,6110	160	158	79	154	51,81	51,84	0,821	-1,90	Hapludol típico	Bajo
Sitio 10	0,237	20,05	311	311	67	154	34,98	34,98	0,940	-0,50	Hapludol típico	Alto
Sitio 11	0,172	13,097	293	292	68	157	25,39	25,40	0,979	-0,80	Hapludol típico	Alto
Sitio 12	0,165	13,527	202	207	65	154	37,96	38,28	0,889	5,00	Hapludol éntico	Bajo
Sitio 13	0,341	28,592	251	250	73	154	34,08	34,11	0,909	-1,40	Hapludol thapto árgico	Media Loma
Sitio 14	0,295	23,309	259	263	75	157	40,06	40,26	0,920	4,10	Argiudol típico	Media Loma
Sitio 15	0,282	23,824	298	296	72	154	41,31	41,35	0,889	-1,80	Hapludol thapto árgico	Alto
Sitio 16	0,275	22,067	300	301	74	154	35,08	35,09	0,925	1,00	Argiudol típico	Alto
Sitio 17	0,125	9,6819	366	369	75	153	29,40	29,59	0,863	3,30	Hapludol típico	Media Loma
Sitio 18	0,22	14,997	210	213	80	155	35,33	35,50	0,946	3,40	Hapludol thapto árgico	Bajo
Sitio 19	0,209	17,297	238	241	74	154	38,08	38,25	0,961	3,60	Hapludol típico	Media Loma
Sitio 20	0,244	19,741	241	237	76	154	32,39	32,62	0,904	-3,90	Argiudol típico	Media Loma
Sitio 21	0,237	20,973	183	186	67	154,2	40,70	40,78	0,925	2,60	Hapludol thapto árgico	Bajo
Sitio 22	0,28	11,4	349	349	81	154	35,90	35,90	0,966	-0,50	Hapludol típico	Bajo
Sitio 23	0,132	10,928	251	244	68	154	39,17	39,85	0,902	-7,30	Hapludol típico	Media Loma
PROM.	0,2309	17,767	250	251	72	156	36,66	36,97	0,91			

Los valores de porosidad drenable calculada a partir del modelo son, en muchos casos, superiores a los esperados para estas texturas. Los suelos de General Villegas presentan texturas que van de francas a arenosas francas, por lo que los valores estimados de porosidad drenable deberían variar entre 0,25 y 0,37 (Tabla 3, Anexo). Considerando los valores calculados por el modelo, se encontró que los valores de porosidad drenable decayeron, variando entre 0,1322 y 0,3539. Esta situación indicaría que existen otros factores que están influyendo en la variación de la napa además de los considerados por este modelo. Videla Mensegue (2018), obtuvo resultados similares al emplear este modelo, la diferencia entre valores observados y estimados para la predicción de la profundidad del nivel freático tiene un buen ajuste. Sin embargo, la importante anisotropía que presentan los suelos en sus propiedades físicas es evidenciada en la variabilidad de la porosidad drenable real de sus horizontes (afectadas posiblemente por tipos de cultivos/raíces en la secuencia/intensificación de sistemas/fertilización de cultivos/cobertura superficial, posiblemente también aportes significativos de sales solubles y pocos solubles, consecuencias del paisaje y la movilidad de agua en los paisajes de la región).

Validación del modelo

Los parámetros calibrados del modelo estadístico se mantuvieron y para analizar la robustez de estos resultados generales se graficaron y compararon los niveles freáticos para cada sitio entre los años 2000-2014 donde el modelo estadístico permitió una estimación adecuada del nivel freático para los distintos lugares (Anexo: Fig.11 a Fig. 33).

Los valores medios de nivel freático simulado y observado fueron similares (Fig. 17), tal como lo respaldó la calibración y validación en el modelo estadístico. En general, en todos los sitios estudiados se presentaron altas consistencias, con valores promedios de RRMSE: 36,66 cm; RMSE: 36,97 % y $d= 0,96$.

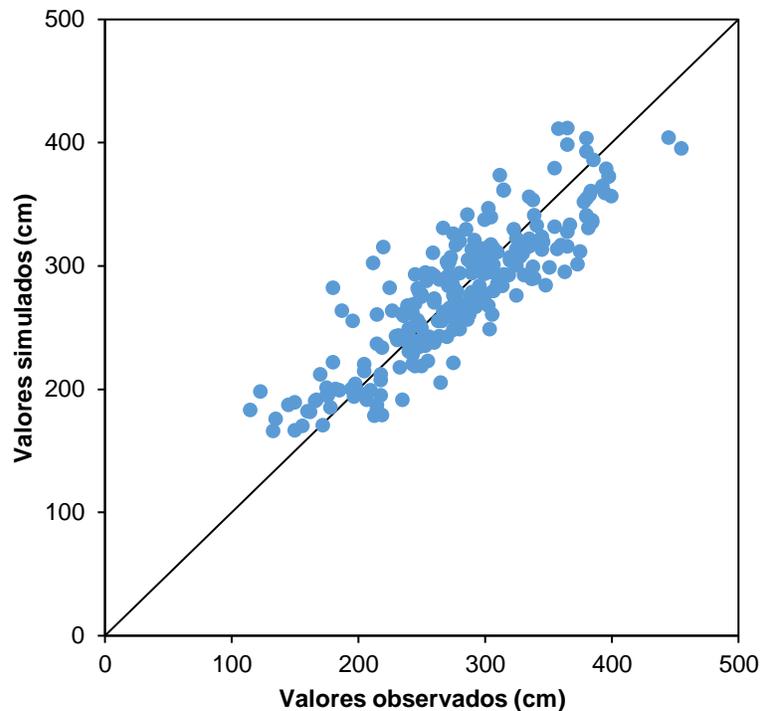


Figura 17. Relación entre los valores promedios de los niveles freáticos simulados y los niveles freáticos observados, en la región en estudio.

Relación entre nivel freático observado, precipitación, evapotranspiración y nivel freático simulado

En general, la diferencia entre valores estimados por el modelo y los valores observados mensualmente tienen un buen ajuste (RRMSE: 36,66, RMSE: 36,97 cm y $d= 0,91$) . Según

los criterios definidos anteriormente, el ajuste de RRMSE, RMSE y d fue bueno a muy bueno para la mayoría de los sitios. Para considerar una perspectiva de análisis distinta, se representa un diagrama de dispersión para corroborar visualmente la relación entre nivel freático observado y sus estimaciones. Se pueden identificar algunos patrones de comportamiento si se analizan la totalidad de los puntos recabados entre el nivel freático observado y los residuos del modelo empleado (Fig.18). Con niveles de residuos por encima de 100 cm, el modelo presenta sobre o subestimaciones en los valores de nivel freático. Con valores residuales entre 0 y 100 cm tienden a estabilizarse las diferencias. Se observan, en general, una mejor estimación del modelo cuando los valores simulados se acercan a los valores observados.

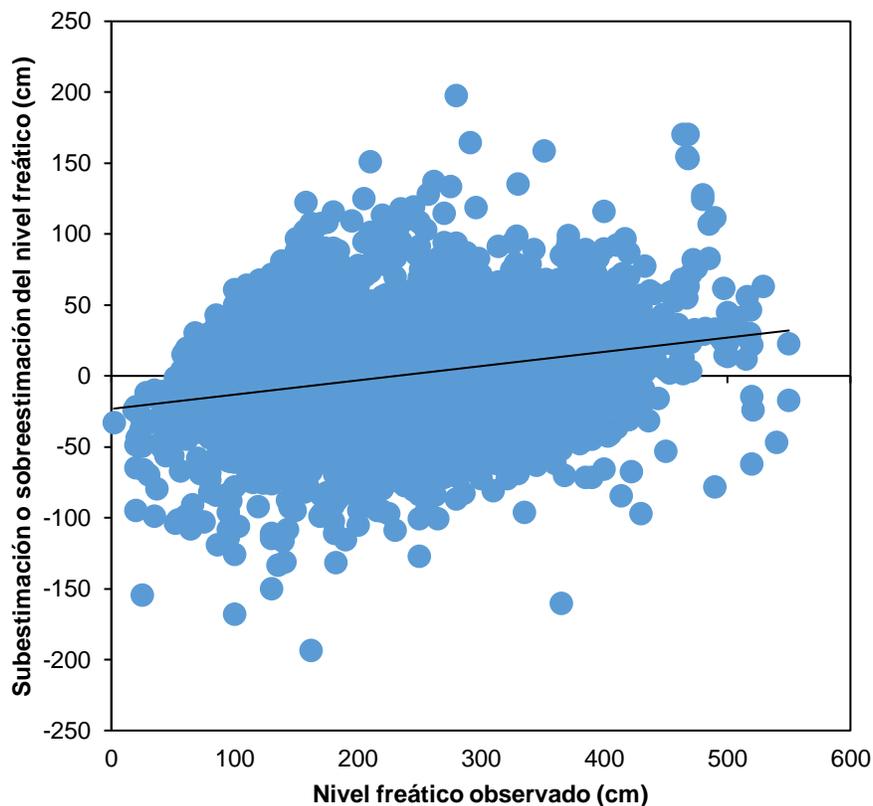


Figura 18. Relación entre el nivel freático estimado y el nivel freático observado según modelo estadístico aplicado.

Se considera que los movimientos verticales (evaporación, transpiración, infiltración, intercambios en la zona no saturada y el nivel freático), prevalecen sobre los movimientos horizontales (superficial y subterráneo), adquiriendo importancia las variaciones de

almacenamiento superficial y subterráneo. Así, la zona de ascenso y descenso del nivel freático, se relacionaría a las fluctuaciones climáticas (excesos y déficit en las precipitaciones) y a las condiciones texturales de la matriz edáfica (Kruse y Zimmermann, 2002; Degioanni et al, 2006 y Cisneros et al., 2011).

Análisis entre la posición del paisaje, tipo de suelos y el nivel freático simulado

El paisaje de General Villegas presenta diferentes tipos de suelos, según la posición que ocupan en el relieve y como fueron descriptos en la figura 3 (Zamolinski, 2001). Los paisajes de lomas están ocupados por suelos profundos, Hapludoles énticos y Arguidoles típicos, en las posiciones intermedias se ubican los suelos Hapludoles típicos y/o suelos con alguna discontinuidad de horizontes, como los suelos Hapludoles thaptos árgicos y Hapludoles thapto nátricos; y en las posiciones bajas del paisaje se identifican los suelos Natracuoles típicos y dúricos. El nivel freático desarrollo una dinámica, a lo largo de los años estudiados, acorde con las características y posición de los distintos sitios estudiados. Las posiciones altas del paisaje, mantuvieron niveles freáticos profundos y ante eventos extremos no mostraron situaciones de anegamiento o inundación. Las posiciones de media loma, mostraron un ascenso de nivel freático mayor y los suelos con discontinuidad de horizontes evidenciaron problemas ante excesos de lluvias. Las posiciones de bajo, presentan un nivel freático cercano a la superficie y con problemas de anegamiento casi de forma permanente.

La base de datos construida para analizar la dinámica de aguas subsuperficiales en General Villegas permitió identificar cuatro tipos de suelos predominantes del lugar: Argiudol típico, Hapludol típico, Hapudol éntico y Hapludol thapto árgico; y tres posiciones diferentes de relieve: loma, media loma y bajo. Los ajustes RRMSE, RMSE y d fueron muy buenos para cada situación analizada.

Para los suelos Arguidoles típicos los valores promedios de RRMSE= 40,65 cm, RMSE= 41,67 % y d= 0,895. Los Hapludoles énticos tuvieron valores promedios de RRMSE= 29,04 cm, RMSE= 29,19 % y d= 0,92. Los Hapludoles thapto árgico tuvieron valores promedios de RRMSE= 38,91 cm, RMSE= 38,97 % y d= 0,915. Por último, los suelos Hapludoles típicos tuvieron valores promedios de RRMSE= 36,28 cm, RMSE= 36,43 % y d= 0,916. Con respecto a las posiciones del paisaje, todas las situaciones presentaron un buen nivel de ajuste. Para la posición de loma, los valores promedios fueron RRMSE= 34,46 cm, RMSE= 34 % ,5 y d=0.926. La posición de media loma, tuvo valores promedio de RRMSE= 35,16

cm, RMSE= 35,7 % y $d= 0,91$. La posición de bajo, tuvo valores promedios de RRMSE= 39,9 cm, RMSE= 40,16 % y $d= 0,906$.

Esta ecuación de regresión registró muy buenos ajustes en todas las situaciones estudiadas, captando las variaciones del nivel freático ocurrida en suelos con diferentes tipos de características y de la posición del paisaje. Los resultados de este estudio mostraron que el modelo estadístico empleado parece ser una herramienta adecuada para el estudio de la oscilación del nivel freático ante diferentes condiciones climáticas y en distintos sitios que cuenten con niveles altimétricos diferentes y posean suelos con distintas características. Sin embargo, la calidad de las predicciones tuvo importantes diferencias entre los distintos tipos de suelos, ya que se encontraron importantes variaciones en la sobre o subestimación de los niveles freáticos según tipo de suelo y posición en el relieve (Fig. 19), lo cual explica que existen otros factores que afectan la dinámica hidrológica regional tales como cobertura del suelo, tipo de cultivos - rotaciones y uso del suelo. La dinámica del nivel freático es explicada por las diferentes propiedades físicas en cada suelo relacionadas a la variabilidad en la porosidad de los horizontes. Tal porosidad determina la mayor o menor facilidad para que ocurran los flujos hídricos entre horizontes (drenaje y ascenso capilar). Aquellos con textura franco o franco arcillosos tendrían mayor ascenso capilar por aporte del nivel freático respecto a suelos arenosos (Raes et al., 2006). En el caso de las texturas muy arcillosas, el ascenso capilar se vería impedido (reducida la conductividad hidráulica). El comportamiento del nivel freático es dinámico y complejo, aunque el modelo utilizado detectó respuestas aceptables a la variabilidad en los aportes que realiza en el perfil del suelo.

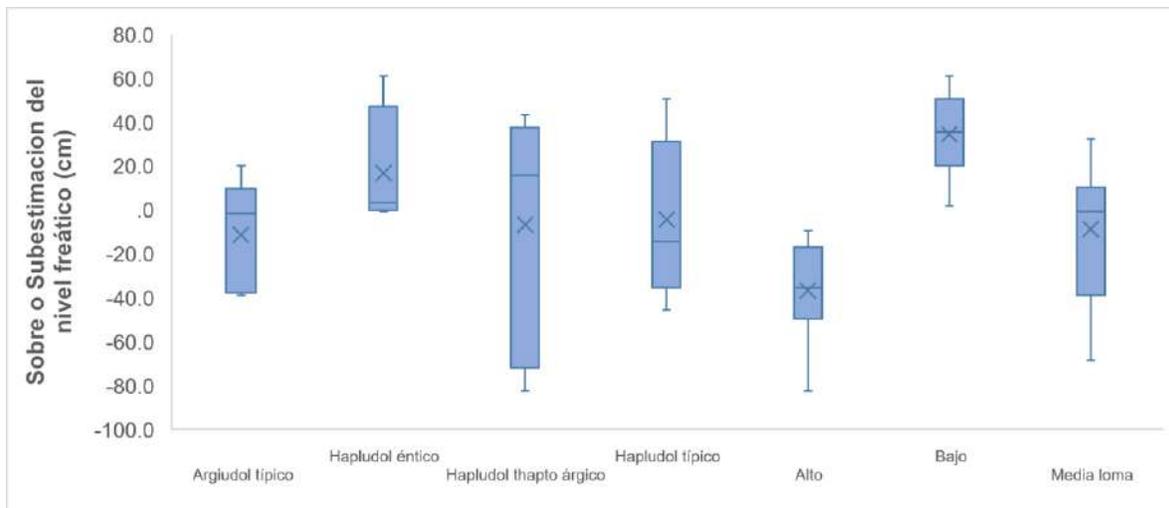


Figura 19. Variabilidad de las estimaciones del nivel freático según tipo de suelo y posición en el relieve.

Mediante el empleo del mismo modelo estadístico en otras zonas, Videla (2016) concluyó que es una herramienta aceptablemente para simular la profundidad del nivel freático para el rango de textura franco arenosas, francas y franco limosas y para un rango de variaciones del nivel freático entre 0 a 350 cm.

Con el objetivo de anticipar la dinámica del nivel freático para campañas futuras se plantearon simulaciones en dos ambientes contrastantes y representativos de General Villegas (Fig. 20 y Fig. 21) con tres escenarios climáticos (húmedo, normal y seco según percentiles 25, 50 y 75 de la base de datos de precipitaciones del lugar). El nivel inicial de la napa fue de 230 cm, tomando como referencia el promedio de nivel de todos los registros.

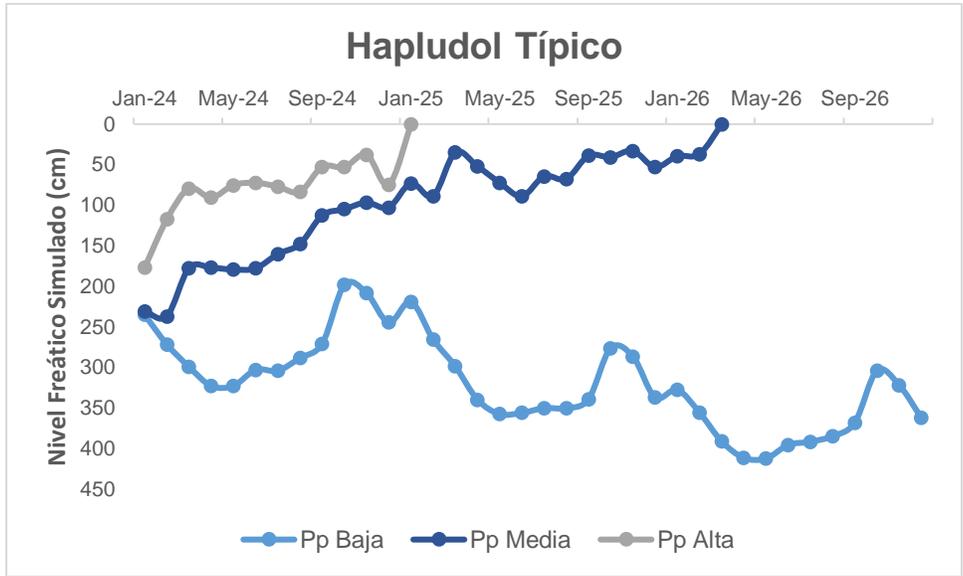


Figura 20: Niveles freáticos estimados para un suelo Hapludol típico para distintas precipitaciones en General Villegas

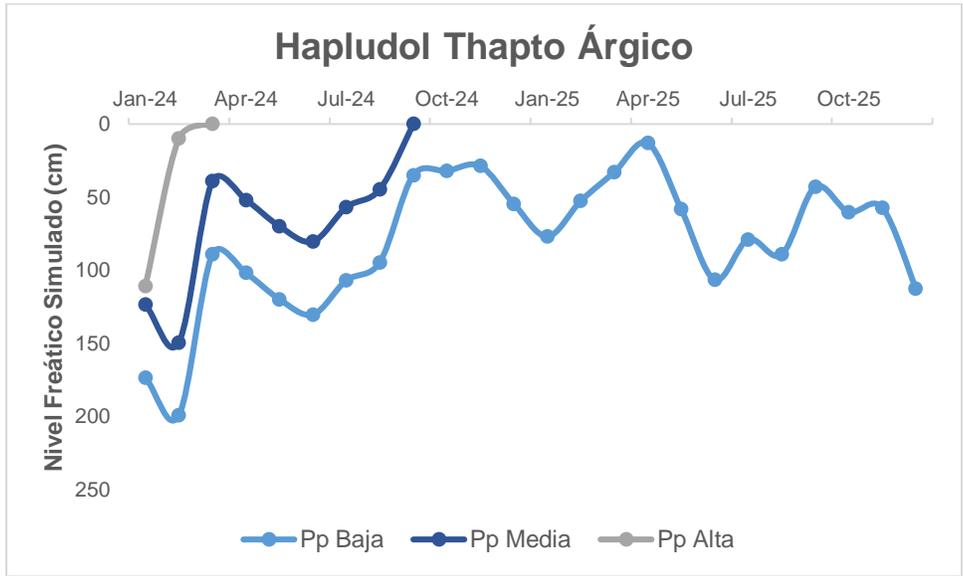


Figura 21: Niveles freáticos estimados para un suelo Hapludol thapto árgico para distintas precipitaciones en General Villegas

Según el modelo ajustado para cada lugar, un suelo Hapludol típico ante un escenario de precipitaciones normales (920 mm) el nivel freático tendría una tendencia de ascenso y de persistir en el tiempo estos valores de precipitaciones, se manifestaría una situación de anegamiento. Para un escenario de precipitaciones bajas (647 mm), en nivel freático

evidencia un marcado descenso y en caso de persistir estos valores de precipitaciones, el nivel alcanzado deja de tener importancia agronómica porque no puede ser aprovechado por ningún cultivo. Para un escenario de altas precipitaciones (1015 mm) la tendencia al ascenso se acelera y se evidencian situaciones de anegamiento en menor plazo de tiempo. Un suelo Hapludol thapto árgico, muestra una dinámica de nivel freático mucho más abrupta, rápidamente se observan situaciones de anegamiento ante precipitaciones normales e intensas, considerando que sus niveles son más superficiales en general. Ante escenarios de precipitaciones bajas (642 mm), estos suelos muestran una dinámica de pulso, respondiendo el nivel freático al evento puntual de precipitación.

Este tipo de simulaciones, permite de manera sencilla conocer la tendencia del nivel freático ante posibles escenarios climáticos de la región. Sus resultados, pueden emplearse para la toma de decisiones en el diseño de las estrategias productivas llevadas a cabo en General Villegas. No obstante, el comportamiento del nivel freático es sistémico, dinámico y complejo, el modelo detectó respuestas buenas en los aportes que realiza en el perfil del suelo. Es trascendental considerar el conocimiento de estas interacciones y compatibilizar estrategias agrícolas con estrategias de ordenamiento hidrológico en la llanura Pampeana.

CONCLUSIONES

Con la realización de este trabajo se logró conocer el comportamiento del nivel freático en el oeste de Buenos Aires y su vínculo con los eventos de inundaciones, siendo las precipitaciones la variable de mayor impacto. Se logró calibrar un modelo sencillo para el área, el cual permitió comprender la dinámica del mismo

Los resultados obtenidos permitieron aceptar las hipótesis planteadas. La dinámica del nivel freático mostró un estrecho acoplamiento con las precipitaciones en General Villegas lo cual quedó evidenciado a través de la cuantificación de la superficie anegada y los modelos estadísticos utilizados. El paisaje afecta el nivel freático siendo la topografía y el tipo de suelo los principales factores. El modelo estadístico empleado permite establecer escenarios para efectuar sistemas de alerta temprana, ya que es una herramienta válida y calibrada para el área.

Es importante tener en cuenta que la dinámica de las inundaciones de General Villegas incrementó su frecuencia en los últimos veinte años. Considerando ésta característica del proceso, sería importante implementar un sistema de alerta temprana de seguimiento y minimizar el impacto sobre los ejes productividad/producción, ambiental y social en contexto de cambio climático.

Es necesario reconocer la relevancia adquirida por el nivel freático en la producción de cultivos, así como las amenazas que puede presentar su elevación en el perfil del suelo y los posibles episodios de anegamiento que esto puede generar. Tener en cuenta que con una adecuada red freaticométrica y datos meteorológicos regionales, se podría analizar la evolución de distintas situaciones e incluso efectuar pronósticos más seguros a fin de minimizar los impactos socio-económicos potencialmente adversos causados por las inundaciones.

Este tipo de estudio permitirá además de avances en la interpretación del comportamiento frente a los principales factores que lo modifican en sus registros de anegamiento y sequía, poder ser un insumo muy valioso para poder reconocer otros procesos que son muy relevantes en este contexto de cambio climático como son las sales aportadas (solubles e insolubles) por las fluctuaciones del nivel freático en el paisaje y tipos de suelos asociados que caracterizan la región. Estos sistemas de alerta serán posibles insumos para políticas de uso y gestión de recursos naturales que impactan sobre la sostenibilidad de la zona en

sus tres ejes ambiental, social y productivo; generando menor riesgo de conflicto entre estos últimos dos ejes.

BIBLIOGRAFÍA

Alconada Magliano M.M., A. Bussoni, R. Rosa & J.J. Carrillo Rivera. 2009. El bio-drenaje para el control del exceso hídrico en Pampa Arenosa, Buenos Aires, Argentina. *Investigaciones Geográficas*. 68:50-72.

Alsina, S., Nosetto, M. Jobagyy, E.2020. Base de datos “NAPA”: Primera síntesis de la dinámica freática pampeana desde 1950 al presente. *Ciencias Suelo* [online]. 2020, vol.38, n.2, pp.262-273. ISSN 1850-2067.

Álvarez, C. 2018. Tesis Doctoral en Ciencias Geológicas “Evaluación de la variabilidad espacial de las propiedades físicas del suelo del área oriental de la Región Semiárida Pampeana”. Facultad de Ciencias Exactas, Fisico-Químicas y Naturales. Repositorio Institucional. UNRC.

Álvarez R. & R.S. Lavado. 1998. Climate, organic matter and clay content relationships in the Pampa and Chaco soils, Argentina. *Geoderma*. 83:127-141.

Aragón, R., E.G Jobbágy, y E.F Viglizzo. 2010. Surface and groundwater dynamics in the sedimentary plains of the Western Pampas (Argentina). *Ecohydrology*, DOI: 10.1002/eco.149.

Ballesteros, S. 2005. Trabajo final presentado para la Especialización en Teledetección y Sistemas de Información Geográfica Aplicados al Estudio de los Recursos Naturales y la Producción Agropecuaria “Inundaciones y su relación con el clima y la hidrología subterránea en el Noroeste de Buenos Aires (1980-2010): Aplicación de percepción remota.”. Facultad de Agronomía. Repositorio Universitario. Universidad de Buenos Aires.

“Bannayan, M. and Hoogenboo, G. 2009. Using pattern recognition for estimating cultivar coefficients of a crop simulation model *Field Crops Research* 111: 290–302

Brunke, M., Gonser, T. 1997, The ecological significance of exchange processes between rivers and groundwater, *Freshwater Biol.*, 37(1), 1–33, doi:10.1046/j.1365–2427.1997.00143.

Carta. H. G. 2016. Análisis de 115 años de precipitaciones (primera parte). *RTA / Vol. 10 / Nº 32*. Pág. 40-43.

Cisneros, J.M.; J.J. Cantero & A. Cantero G. 1997. Relaciones entre la fluctuación del nivel freático, su salinidad y el balance hídrico, en suelos salino-sódicos del centro de Argentina. *Revista UNRC* 17:23-35.

Cisneros, J. M.; Degioanni, A.; Cantero, G. A. y Videla Mensegue, H. 2011. Modelos de comportamiento de la napa freática en ambientes afectados por sales. En: Segunda Reunión de la Red Argentina de Salinidad RASTUC 2011. San Miguel de Tucumán, Argentina. p 81.

Damiano F. & M.A. Taboada. 2000. Predicciones de agua disponible usando funciones de pedotransferencia en suelos agrícolas de la Región Pampeana. *Ci. Suelo*. 18(2):77-88.

Degioanni, A.; J. Cisneros; A. Cantero G. & H. Videla. 2006. Modelo de simulación del balance hídrico en suelos con freática poco profunda. *Ciencia del Suelo*, 24(1), 29-38.

Díaz-Zorita M., M.L. Pepi, & G.A. Grosso. 1998. Estudio de las precipitaciones en el Oeste Bonaerense. Ediciones INTA. General Villegas. Publicación técnica N°23. 15 pp.

Díaz-Zorita M., G.A. Duarte & J.H. Grove. 2002. A review of no-till systems and soil management for sustainable crop production in the subhumid and semiarid Pampas of Argentina. *Soil Till. Res.* 65:1-18.

Di Rienzo J.A., F. Casanoves, M.G. Balzarini, L. Gonzalez, M. Tablada & C.W. Robledo. InfoStat versión 2017. Grupo InfoStat. FCA. Universidad Nacional de Córdoba. Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>.

Ferone JM, Devito KJ. 2004. Shallow groundwater-surface water interactions in pond peatland complexes along a Boreal Plains topographic gradient. *Journal of Hydrology* 292: 75–95.

Fila, G., Bellocchi, G., Acutis, M., Donatelli, M., 2003. IRENE: a software to evaluate model performance. *Eur. J. Agron.* 18, 369–372. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00129-6](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00129-6).

Florio, EL; JL Mercau; EG Jobbágy & MD Nosoetto. 2014. Interactive effects of water-table depth, rainfall variation, and sowing date on maize production in the Western Pampas. *Agric. Water Manage.* 146: 75-83.

García, GA; PE García; SL Rovere; FE Bert; F Schmidt; ÁN Menéndez; MD Nosoetto; A Verdin; B Rajagopalan; P Arora & GP Podestá. 2019. A linked modelling framework to

explore interactions among climate, soil water, and land use decisions in the Argentine Pampas. *Environmental Modelling & Software* 111: 459-471

Ghersa C.M., D.O. Ferraro, M. Omacini, M.A. Martínez-Ghersa, S. Perelman, E.H. Satorre & A. Soriano. 2002. Farm and landscape level variables as indicators of sustainable land-use in the Argentine Inland-Pampa. *Agric. Ecosyst. Environ.* 93:279-293.

INTA. 1986. Carta de Suelos de la Provincia de Buenos Aires. Escala 1:50.000. Version digital. 2010.

Jacovides, C. P. and Kontoyiannis, H., 1995. Statistical procedures for the evaluation of evapotranspiration computing models, *Agricultural Water Management*, Elsevier, vol. 27(3-4): 365-371.

Jobbágy, E. G. and Jackson, R. B. 2004. Groundwater use and salinization with grassland afforestation. *Global Change Biology* 10, 1299–1312.

Jobbágy, E. G., Aragón, R. y Noretto, M. D. 2007. Los cultivos y la napa freática en la llanura pampeana. *Agromercado*. Nº 268 agosto 2007. Pp. 810

Jobbágy, E.G., Noretto, M.D., Santoni, C., y G. Baldi. 2008. El desafío ecohidrológico de las transiciones entre sistemas leñosos y herbáceos en la llanura ChacoPampeana. *Ecología Austral – Sección Especial "Problemas Ambientales"*, 18:305-322.

Justo C. & N. Sueiro. 2013. Suelos predominantes en el Noroeste Bonaerense. En: Mendez, D. & A. Otero (Eds.). *Memoria técnica 2012-2013*. Estación Experimental Agropecuaria General Villegas. Ediciones Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Buenos Aires. Capítulo Producción Agrícola, pp. 141- 143.

Kobayashi, K., Salam, M.U., 2000. Comparing simulated and measured values using mean squared deviation and its components. *Agron. J.* 92, 345/352.

Kollet, S. 2009. Influence of soil heterogeneity on evapotranspiration under shallow water table conditions: Transient stochastic simulations, *Environ. Res. Lett.*, 4(3), 035007, doi:10.1088/1748–9326/4/3/035007.

Krause, P., Boyle, D. P. and Bäse, F. 2005. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Adv. Geosci.* 5: 89-97

Kruse, E. y Zimmermann, E. 2002 Hidrogeología de Grandes Llanuras. Particularidades en la Llanura Pampeana (Argentina). Workshop. Groundwater and Human Development. XXXII IAH Congress. Publicación Workshop: Hidrogeología de Grandes Llanuras: 2025-2038.

Lavado, R.S. y Taboada, M.A. 1988. Soil water, salts, and sodium dynamics in a Natraquoll of Argentina. *Catena* 15: 577-594.

Morasi, D. N.; Arnold, J. G.; Liew, M. W. V.; Bingner, R. L.; Harmel, R. D. and Veith, T. L. 2007. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations, *Transactions of the ASABE*, 50(3): 885-900.

Nosetto, M.D., E.G. Jobbágy, R.B. Jackson, y G.A. Sznaider. 2009. Reciprocal influence of crops and shallow ground water in sandy landscapes of the Inland Pampas. *Field Crop Research* 113: 138–148. DOI: 10.1016/j.fcr.2009.04.016.

Nosetto, MD; EG Jobbágy; J Mercau. 2010. Ambientación y aplicación variable de insumos en áreas con influencia freática. AAPRESID. Revista Técnica Especial. Agricultura de precisión y manejo por ambientes: 15-20.

Nosetto, MD; EG Jobbágy; AB Brizuela; RB Jackson. 2012. The hydrologic consequences of land cover change in central Argentina. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 154: 2-11.

Nosetto, MD; R Páez; SI Ballesteros; EG Jobbágy. 2015. Higher water-table levels and flooding risk under grain vs. livestock production systems in the subhumid plains of the Pampas. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 206:60-70.

Paoli C. & R. Giacosa. 2003. Características hidrológicas de la llanura pampeana central oeste (áreas de derrame del Río Quinto y arroyos del sur de Córdoba En: Inundaciones en la región pampeana. (O. Maiola, N. A. Gabellone & M.A. Hernandez Editores). 1° Edición. ISBN 950-34-0246-8. EDULP. La Plata. Pág. 87-122.

Perez S, E. Sierra, G. Casagrande; G. Vergara & F. Bernai. 2003. Comportamiento de las precipitaciones (1918/2000) en el centro este de la provincia de Buenos Aires (Argentina) *Revista de la Fac. Agronomía. UNLPam* ISSN 0526-6184 Vol. 14 Pág. 39-46.

SAGYP-INTA. 1989. Mapa de Suelos de la Provincia de Buenos Aires. Escala 1:500.000. Proyecto PNUD ARG 85/019, editado por Secretaría de agricultura, Ganadería y Pesca,

Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. CIRN. Instituto de Evaluación de Tierras. 472 pp.

Sobral R., A. Vignale, A. Alfieri & C. Pecorari. 1993. Suelos overos del Noroeste Bonaerense. Antecedentes, descripción, evaluación y conclusiones. En: Boletín de Divulgación Técnica S/N. INTA. Buenos Aires. 27 pp.

Soil Survey Staff. 2014a. Keys to Soil Taxonomy, 12th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.

Soil Survey Staff. 2014b. Soil Survey Field and Laboratory Methods Manual. Soil Survey Investigations Report No. 51, Version 2.0. R. Burt and Soil Survey Staff (Ed.). U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.

Raes, D.; Deproost, P. 2003. Model to assess water movement from a shallow water table to the root zone. *Agricultural Water Management* 62(2):79-91

Raes, D.; Geerts, S.; Kipkorir, E.; Wellens, J. and, Sahli, A. 2006. Simulation of yield decline as a result of water stress with a robust soil water balance model. *Agric. Water Manage.* 81:335 – 357.

Raes, D.; Steduto, P.; Hsiao, T. C. and Fereres, E. 2012. Reference Manual AquaCrop (Version 4.0). AquaCrop Website Disponible en <http://www.fao.org/nr/water/aquacrop.html> (consultado en marzo de 2018)

Toth, J. 1963. A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. *J. Geophys. Res.*, 68(16), 4795–4812, doi:10.1029/ jz068i016p04795.

U.S. Geological Survey (USGS). (s.f.). Earth explorer. Recuperado el (18 de julio de 2020) de <https://earthexplorer.usgs.gov/>.

Videla Mensegue, H.; J. Marcos; A. Degioanni & E. Bonadeo. 2016. Modelo de simulación de sistemas de cultivo SWB-Rot (Soil Water Balance): calibración y validación para la región pampeana Argentina. 8º Congreso Argentino de Agrolnformática. 45 JAIIO-CAI. CABA. Argentina.

- Videla Mensegue, H., Degioanni A., y Cisneros J. 2018. Calibración de un modelo para predecir la variación de la profundidad de la napa freática. En actas del XXVI Congreso Argentino de la Ciencias del Suelo. San Miguel de Tucumán, Argentina
- Viglizzo E.F., F. Lertora, A.J. Pordomingo, J.N. Bernardos, Z.E. Roberto & H. Del Valle. 2001. Ecological lessons and applications from one century of low external-input farming in the pampas of Argentina. *Agric. Ecosyst. Environ.* 83:65-81.
- Viglizzo, EF; EG Jobbágy; LV Carreño; FC Frank; RM Aragón; L De Oro; VS Salvador. 2009. The dynamics of cultivation and floods in arable lands of central Argentina. *Hydrology and Earth System Sciences* 13: 491-502.
- Viglizzo, EF; FC Frank; LV Carreño; EG Jobbágy; H Pereyra; J Clatt; D Pincén; MF Ricard, M.F. 2011. Ecological and environmental footprint of 50 years of agricultural expansion in Argentina. *Global Change Biology.* 17:959-973.
- Willmott, C. J. 1982. Some comments on the evolution of model performance. *Bulletin of American Meteorology Society*, 63(11): 1309-1369.
- Zamolinski A., R. Casas, & A. Pittaluga. 1994. Manejo de suelos salinos en el Noroeste de la Provincia de Buenos Aires. En: *Publicación Técnica N°15*. EEA INTA General Villegas. Buenos Aires. pp. 28.
- Zamolinsky, A. 2001. Experiencias en recuperación de suelos salinizados. General Villegas: Ediciones INTA. *Publicación Técnica N° 31*. Pág. 16.
- Zarate M.A. 2003. Loess of southern South America. *Quat. Sci. Rev.* 22:1987-2006.

ANEXO

Evaluación de la superficie inundada en General Villegas entre los años 2000 y 2015.

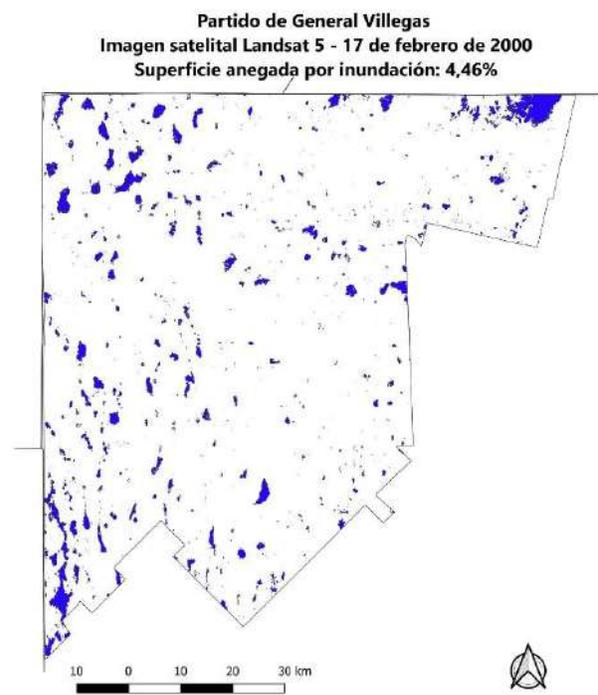


Figura1. Superficie Anegada (%) en General Villegas en el año 2000.

Partido de General Villegas
Imagen satelital Landsat 5 - 11 de enero de 2004
Superficie anegada por inundación: 2,35 %

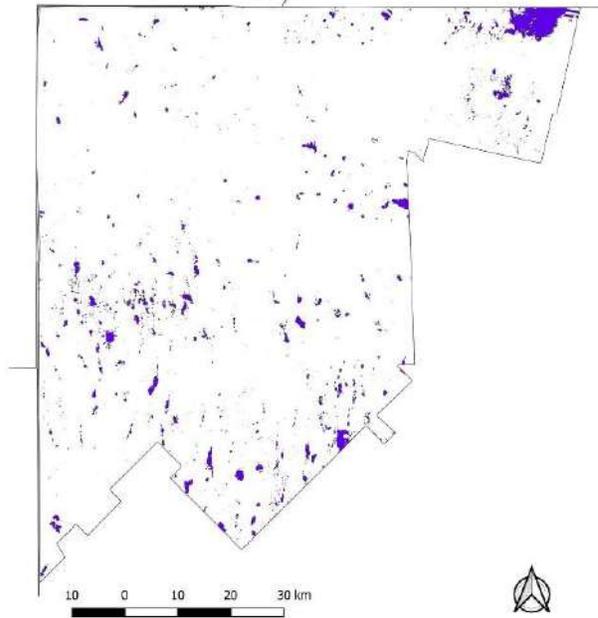


Figura 2. Superficie Anegada (%) en General Villegas en el año 2004.

Partido de General Villegas
Imagen satelital Landsat 5 - 5 de marzo de 2006
Superficie anegada por inundación: 0,93 %

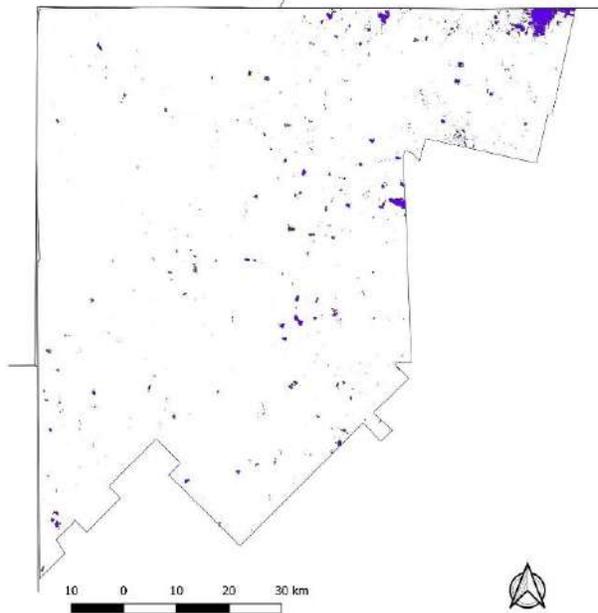


Figura 3. Superficie Anegada (%) en General Villegas en el año 2006.

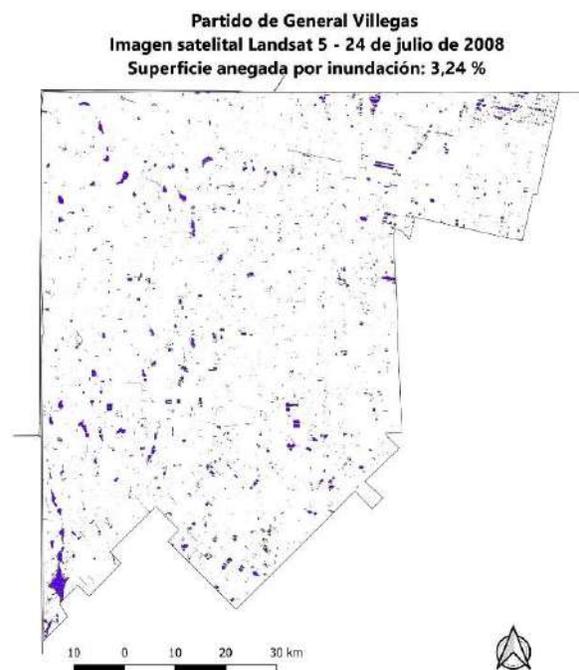


Figura 4. Superficie Anegada (%) en General Villegas en el año 2008.

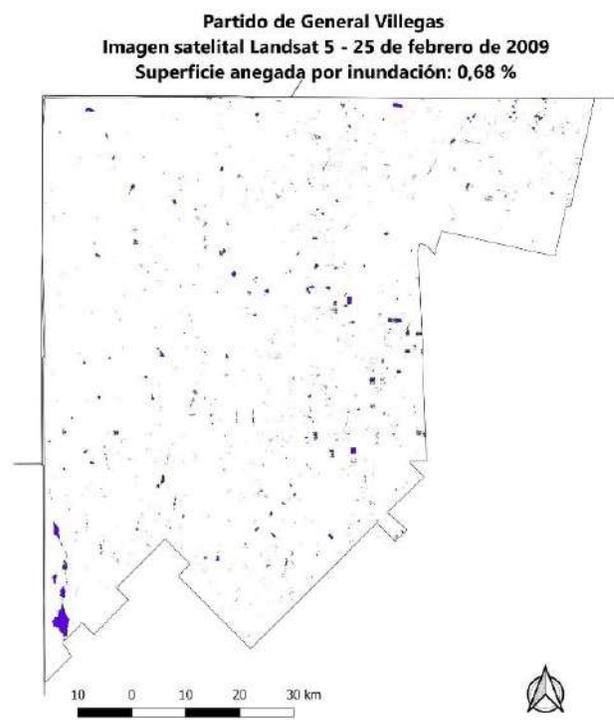


Figura 5. Superficie Anegada (%) en General Villegas en el año 2009.

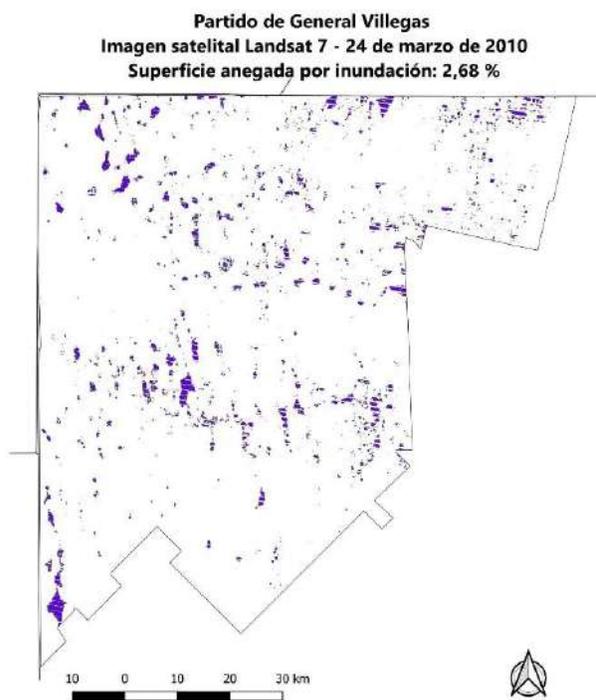


Figura 6. Superficie Anegada (%) en General Villegas en el año 2010.

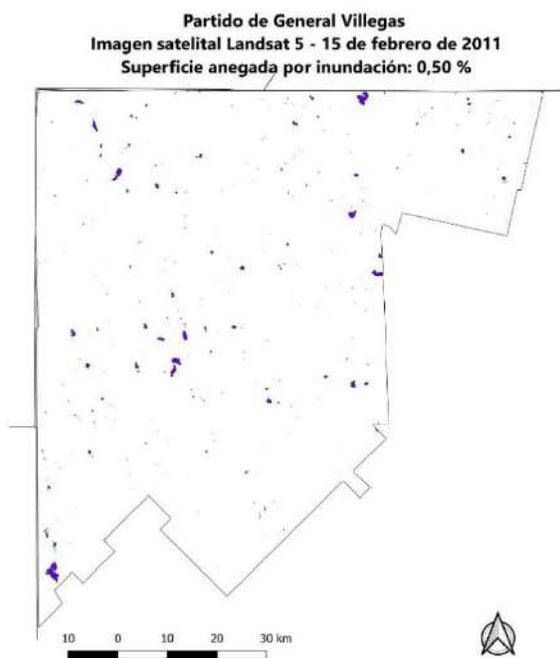


Figura 7. Superficie Anegada (%) en General Villegas en el año 2011.

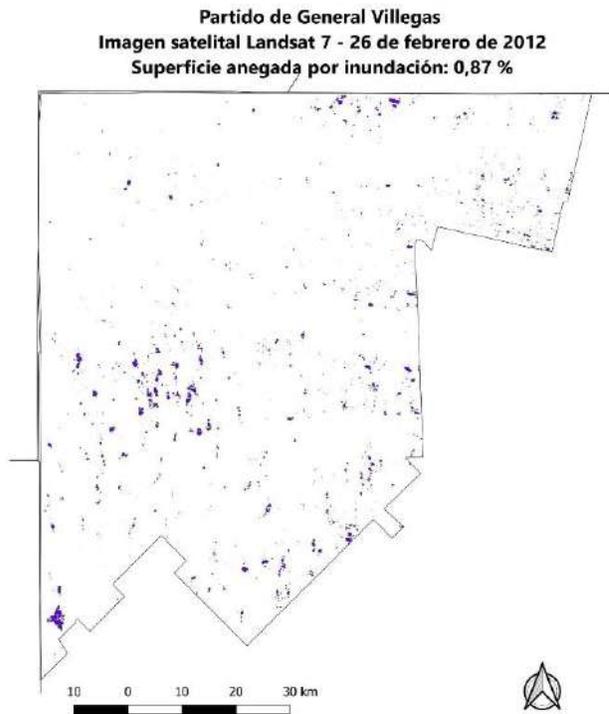


Figura 8. Superficie Anegada (%) en General Villegas en el año 2012.

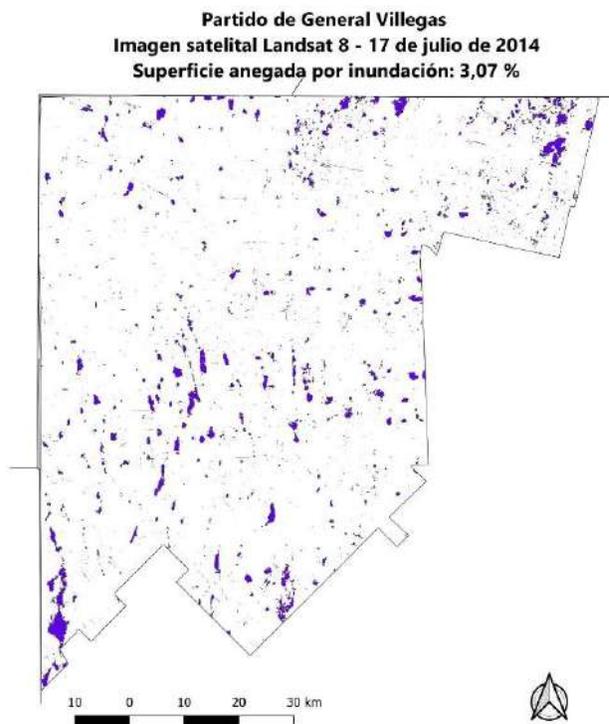


Figura 9. Superficie Anegada (%) en General Villegas en el año 2014.

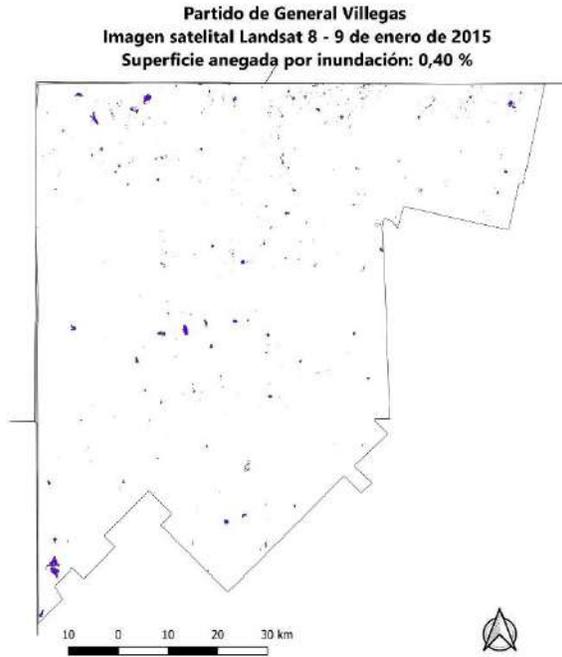


Figura 10. Superficie Anegada (%) en General Villegas en el año 2015.

Sitios validados mediante el modelo estadístico

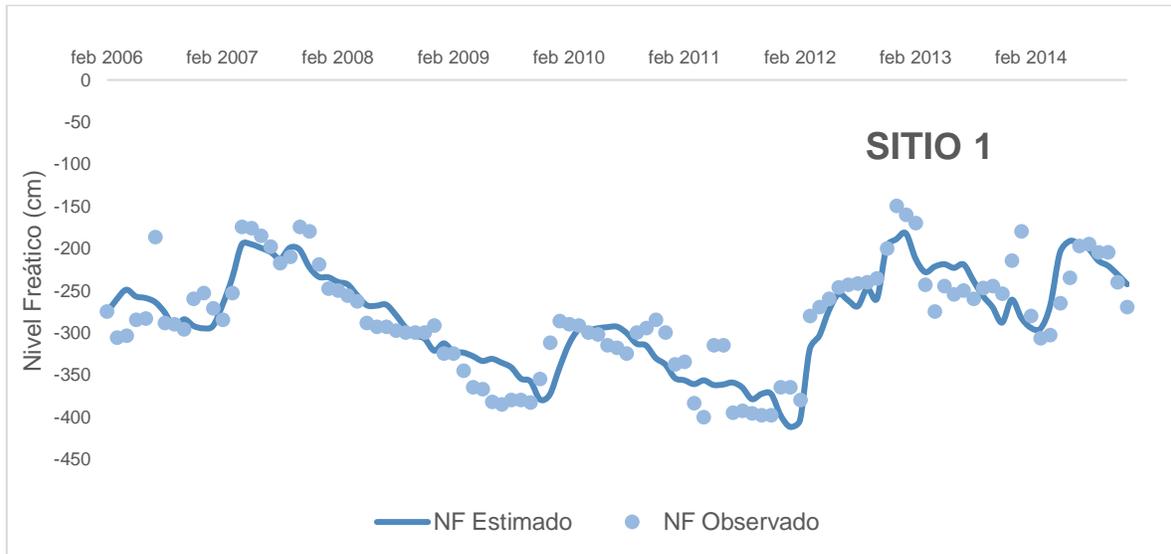


Figura 11: Simulación del nivel freático para el Sitio 1, en General Villegas.

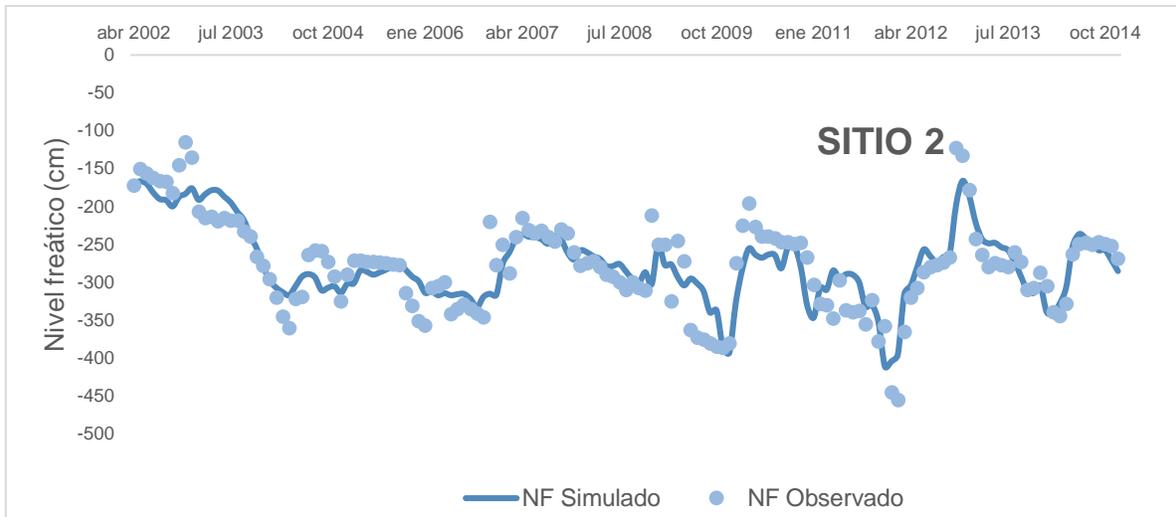


Figura 12: Simulación del nivel freático para el Sitio 2, en General Villegas.

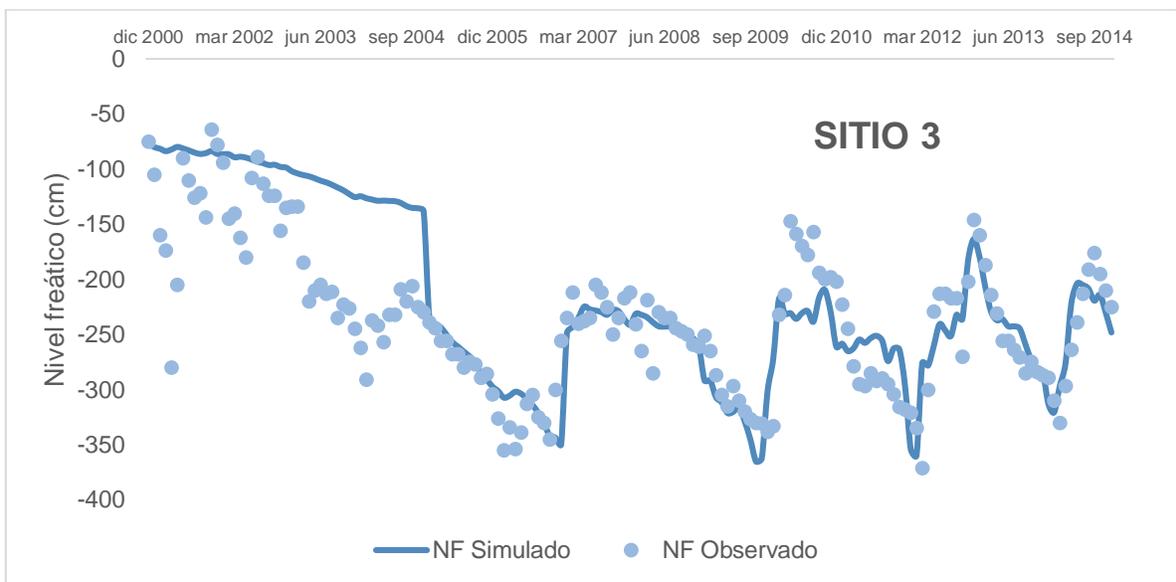


Figura 13: Simulación del nivel freático para el Sitio 3, en General Villegas.

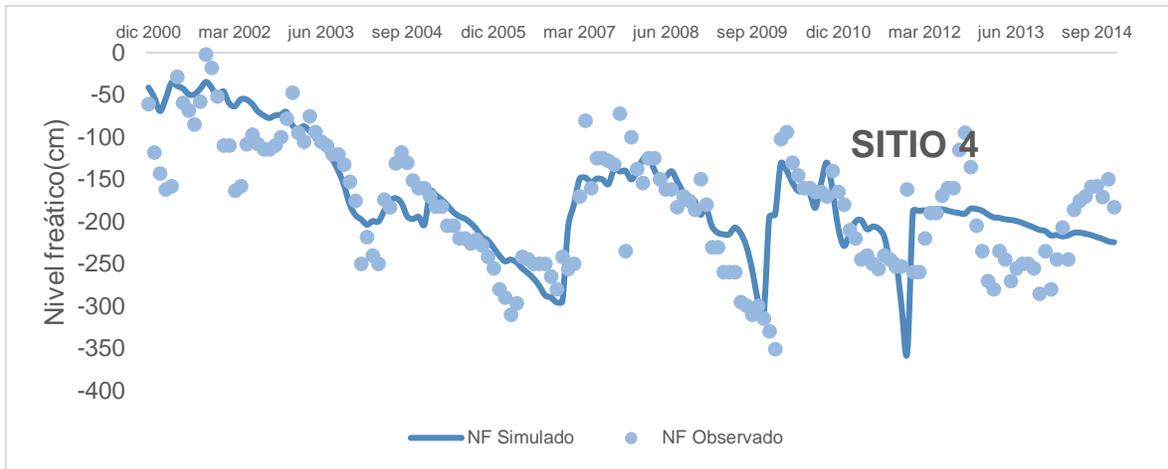


Figura 14: Simulación del nivel freático para el Sitio 4, en General Villegas.

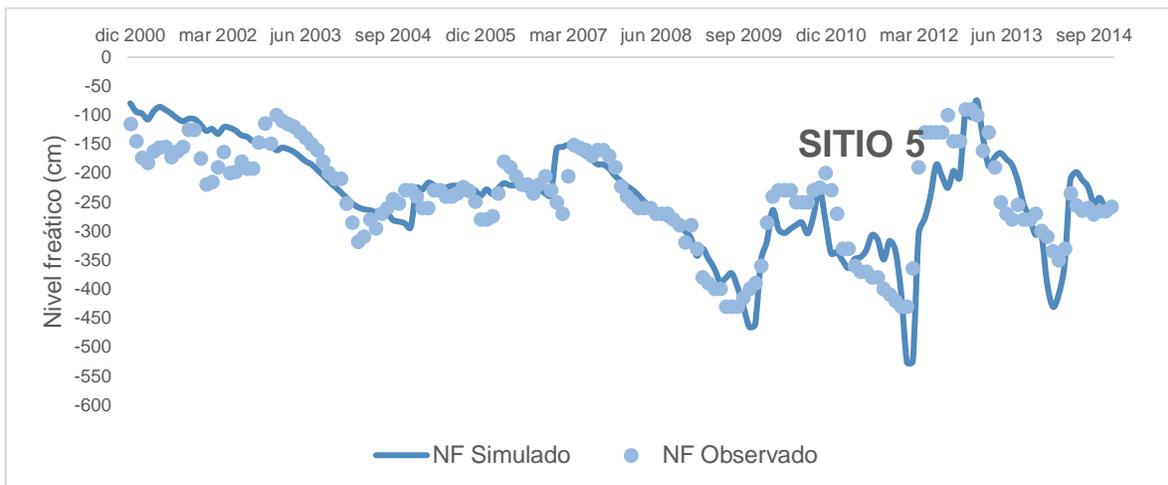


Figura 15: Simulación del nivel freático para el Sitio 5, en General Villegas.

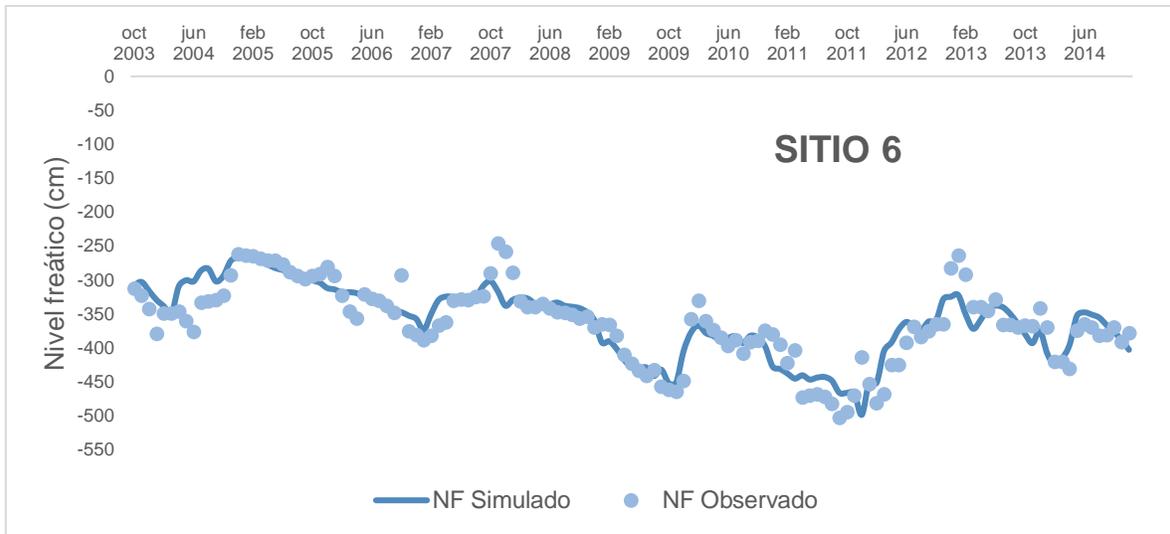


Figura 16: Simulación del nivel freático para el Sitio 6, en General Villegas.

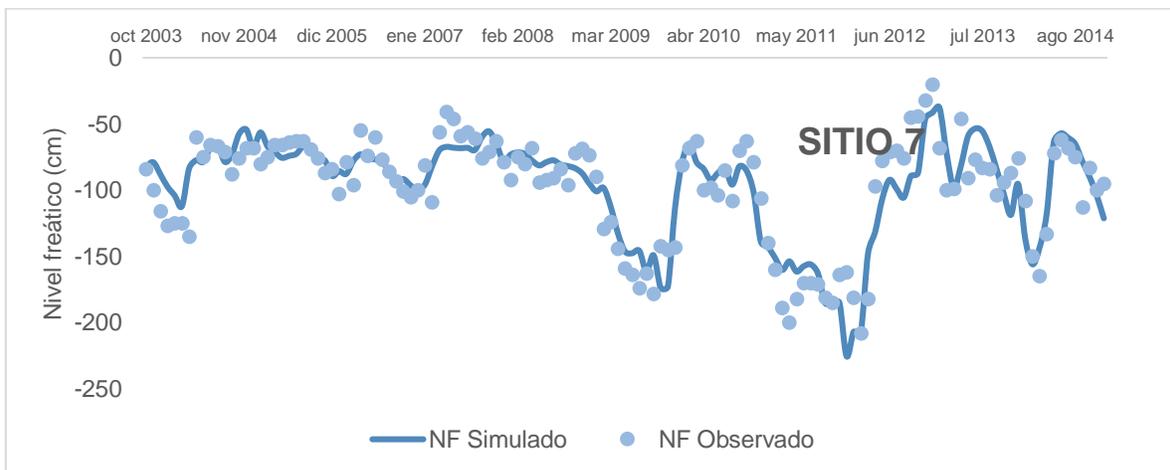


Figura 17: Simulación del nivel freático para el Sitio 7, en General Villegas.

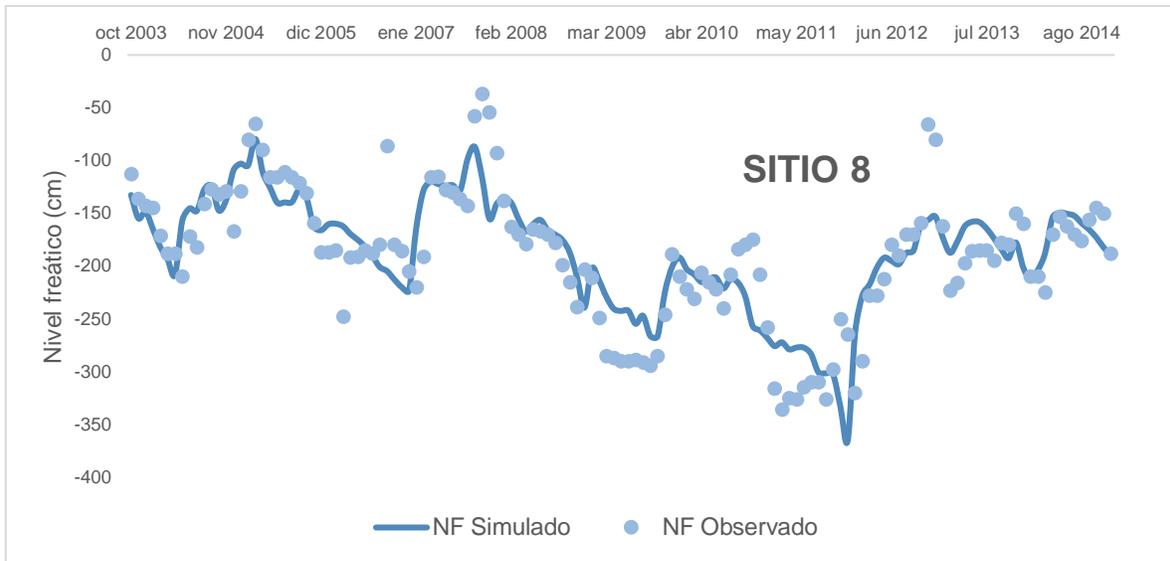


Figura 18: Simulación del nivel freático para el Sitio 8, en General Villegas.

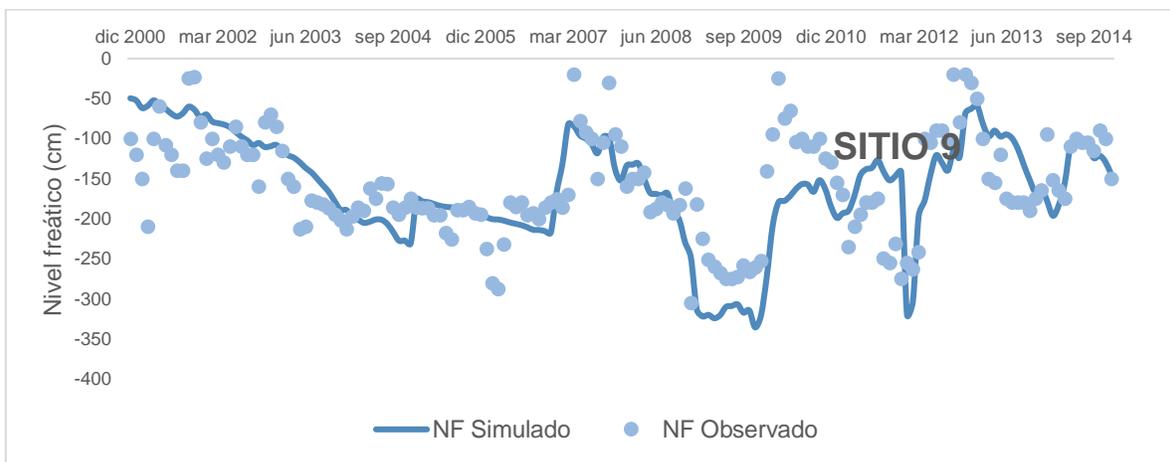


Figura 19: Simulación del nivel freático para el Sitio 9, en General Villegas.

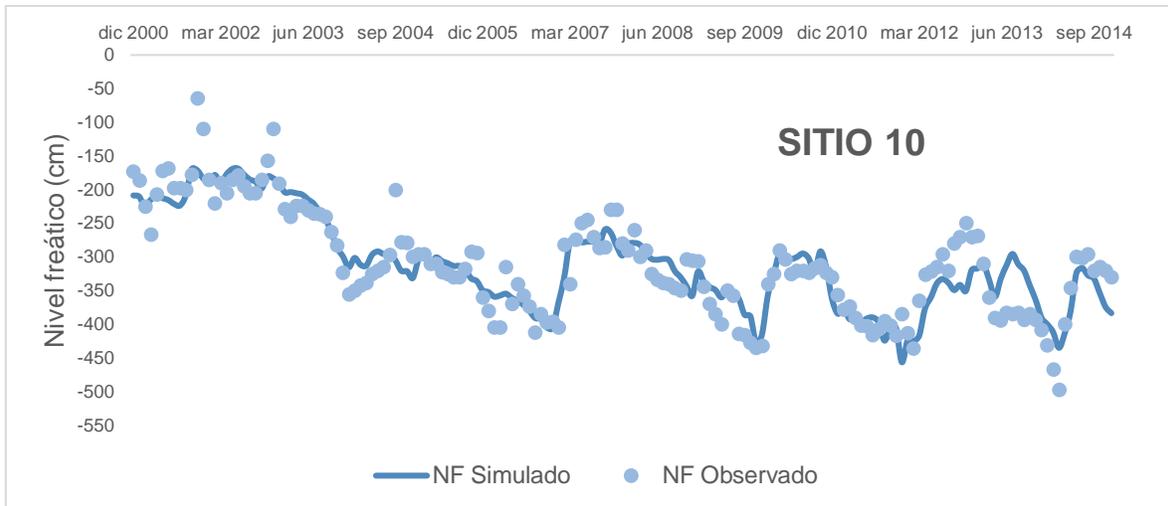


Figura 20: Simulación del nivel freático para el Sitio 10, en General Villegas.

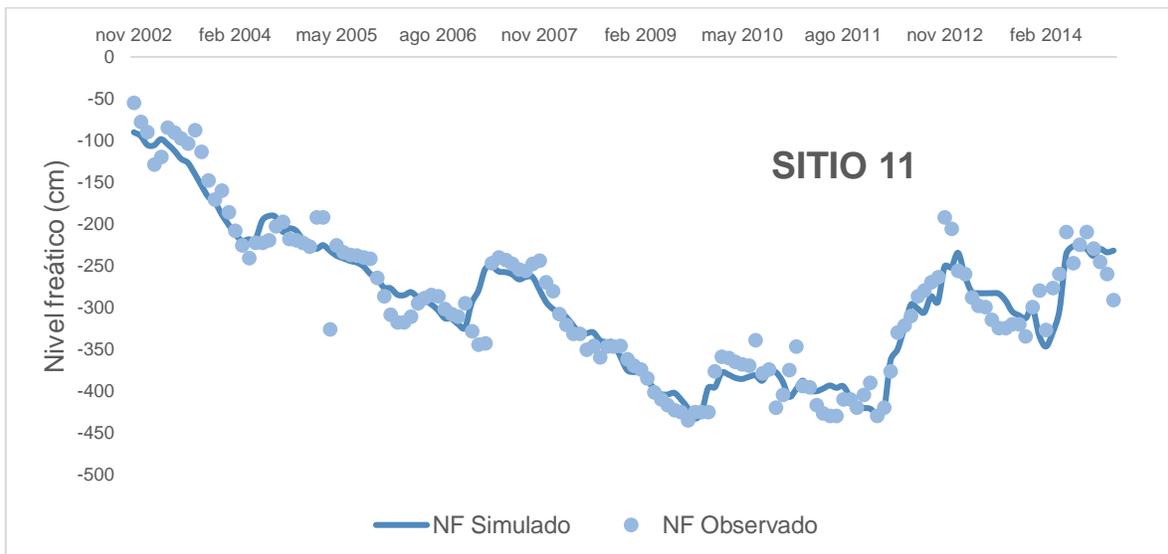


Figura 21: Simulación del nivel freático para el Sitio 11, en General Villegas.

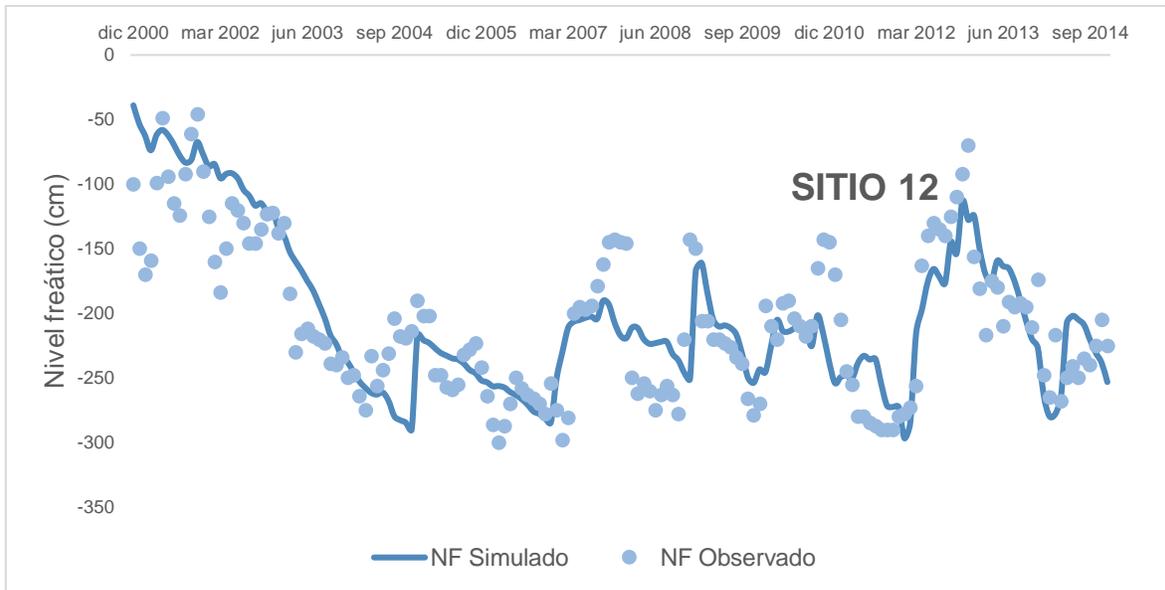


Figura 22: Simulación del nivel freático para el Sitio 12, en General Villegas.

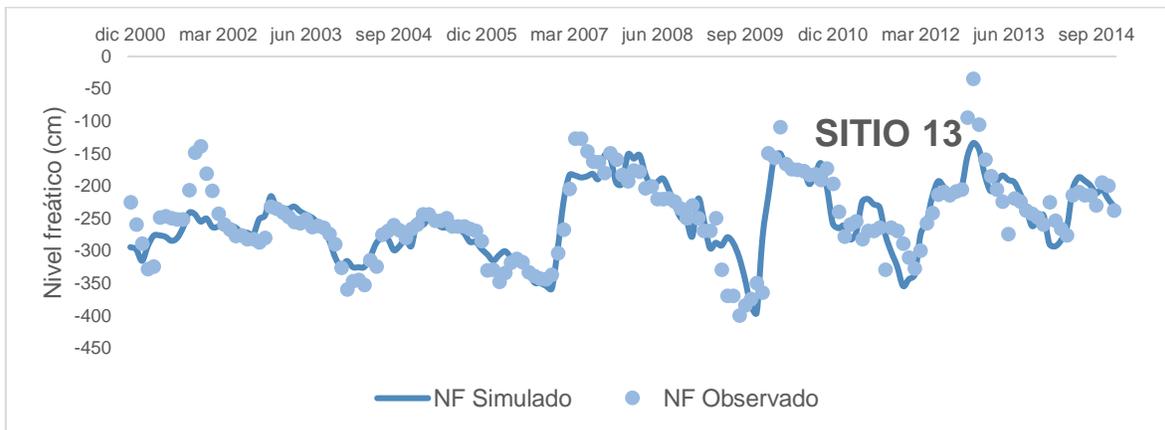


Figura 23: Simulación del nivel freático para el Sitio 13, en General Villegas.

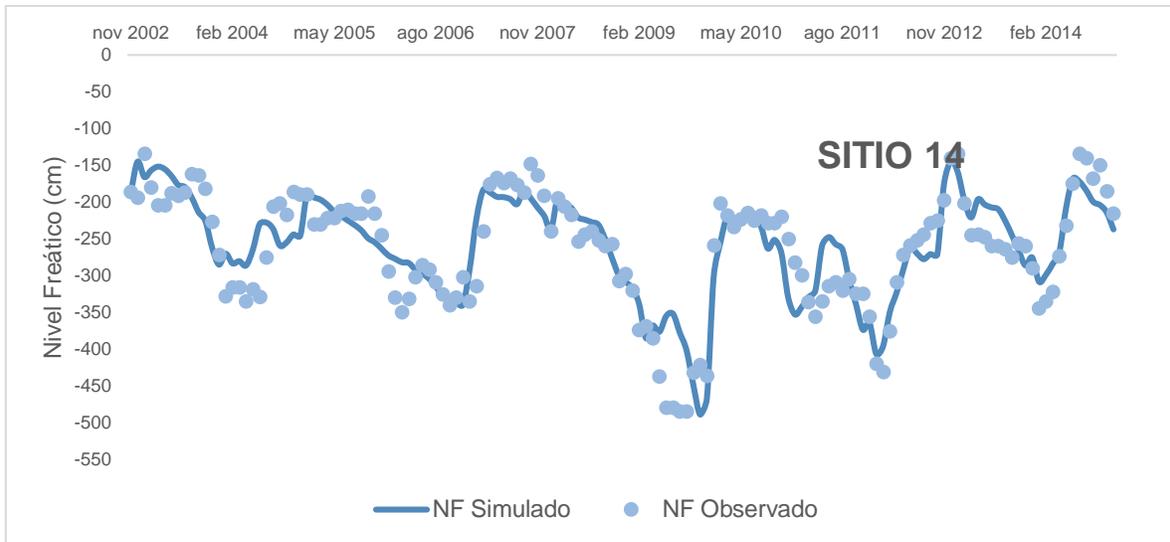


Figura 24: Simulación del nivel freático para el Sitio 14, en General Villegas

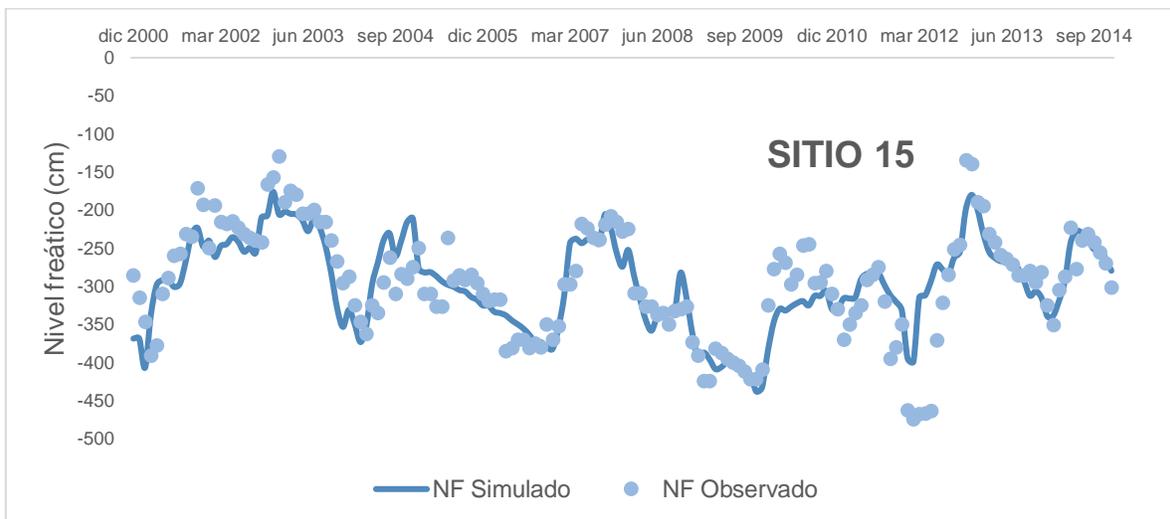


Figura 25: Simulación del nivel freático para el Sitio 15, en General Villegas.

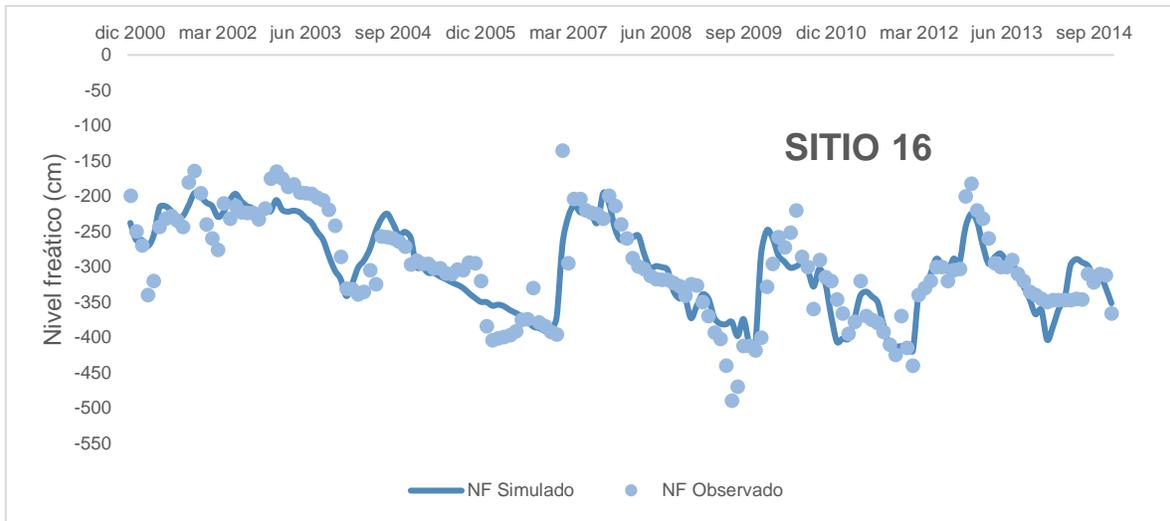


Figura 26: Simulación del nivel freático para el Sitio 16, en General Villegas.

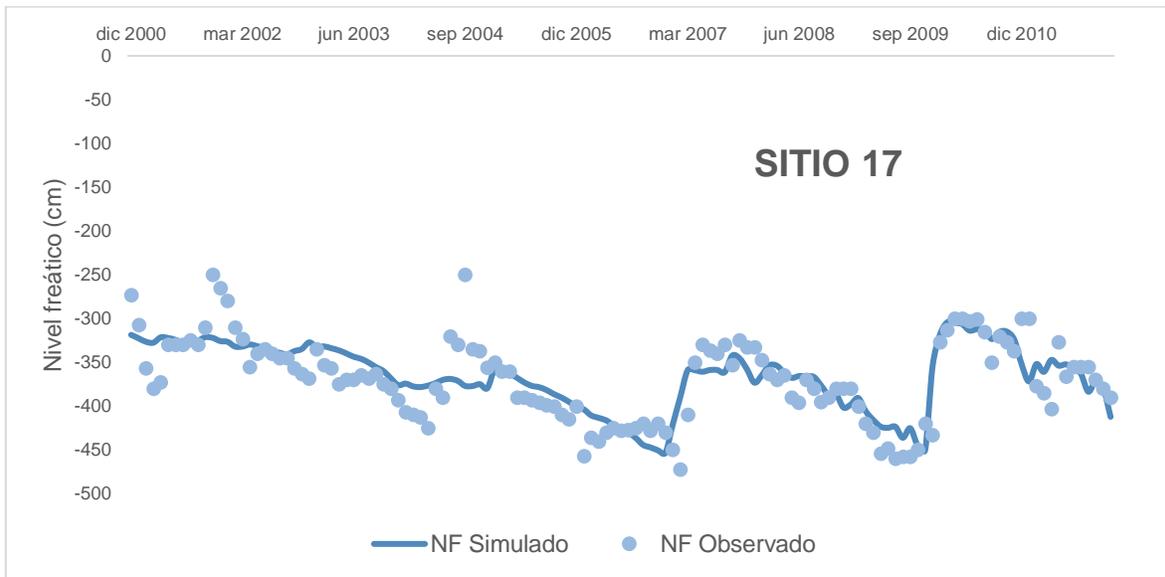


Figura 27: Simulación del nivel freático para el Sitio 17, en General Villegas.

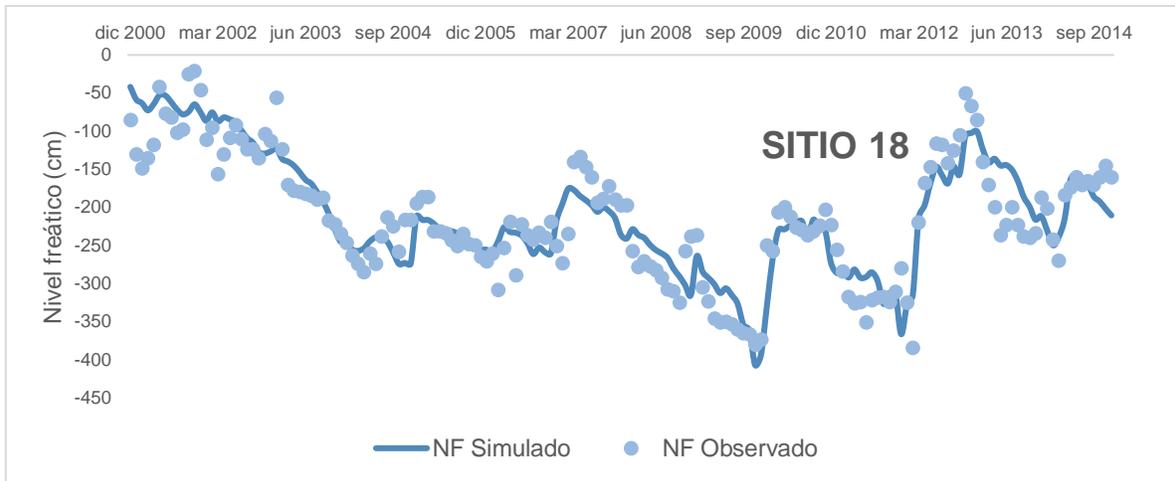


Figura 28: Simulación del nivel freático para el Sitio 18, en General Villegas.

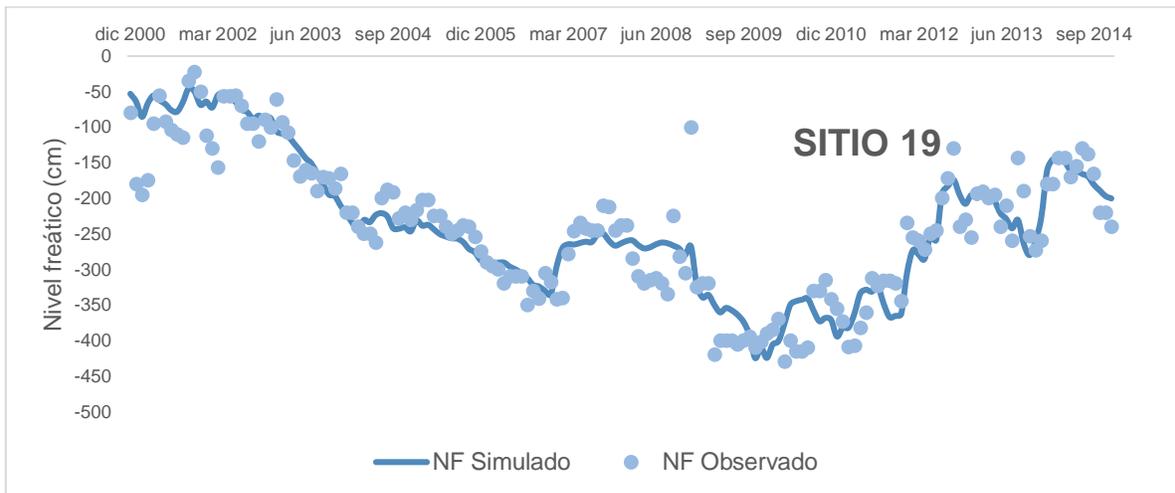


Figura 29: Simulación del nivel freático para el Sitio 19, en General Villegas.

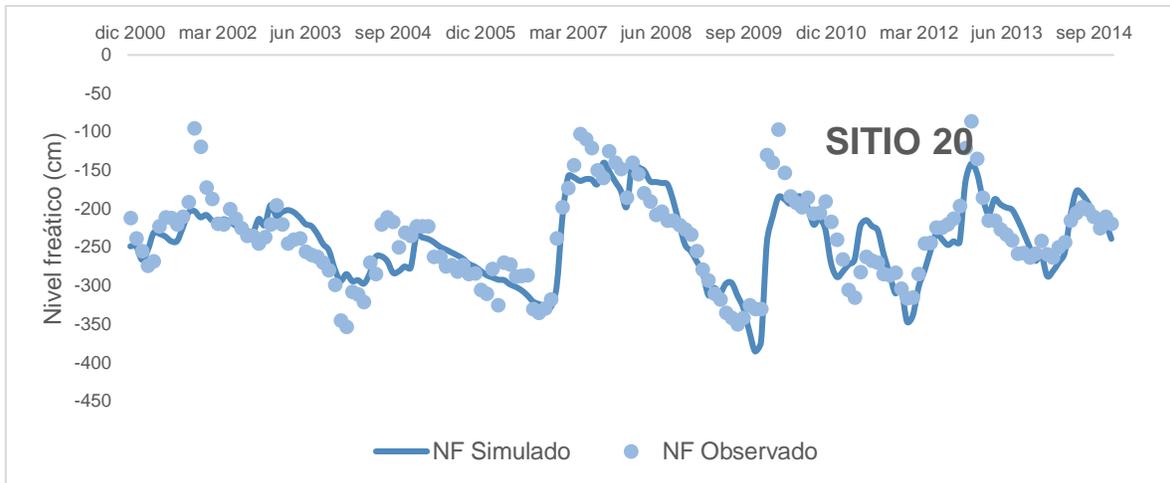


Figura 30: Simulación del nivel freático para el Sitio 20, en General Villegas.

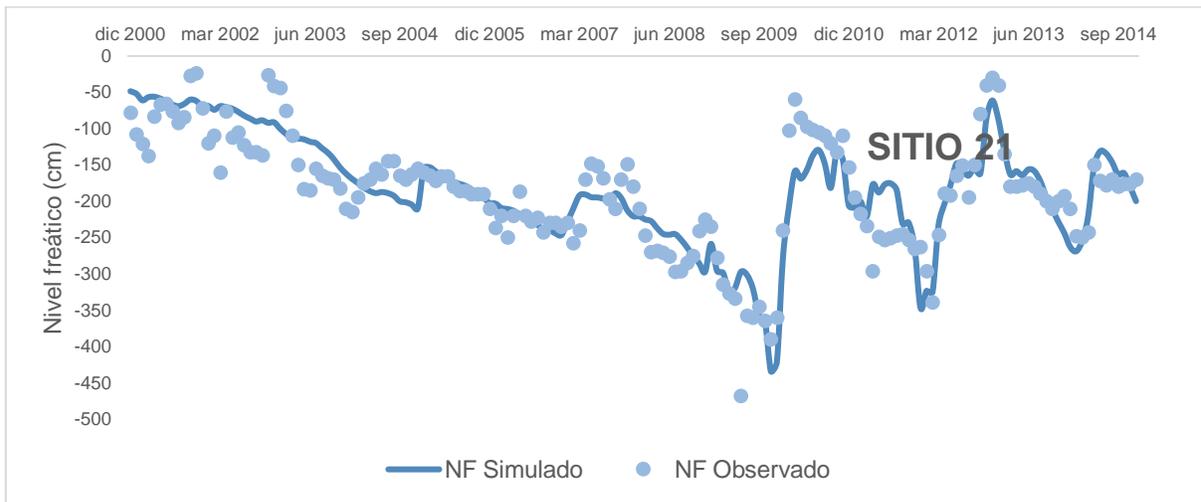


Figura 31: Simulación del nivel freático para el Sitio 21, en General Villegas.

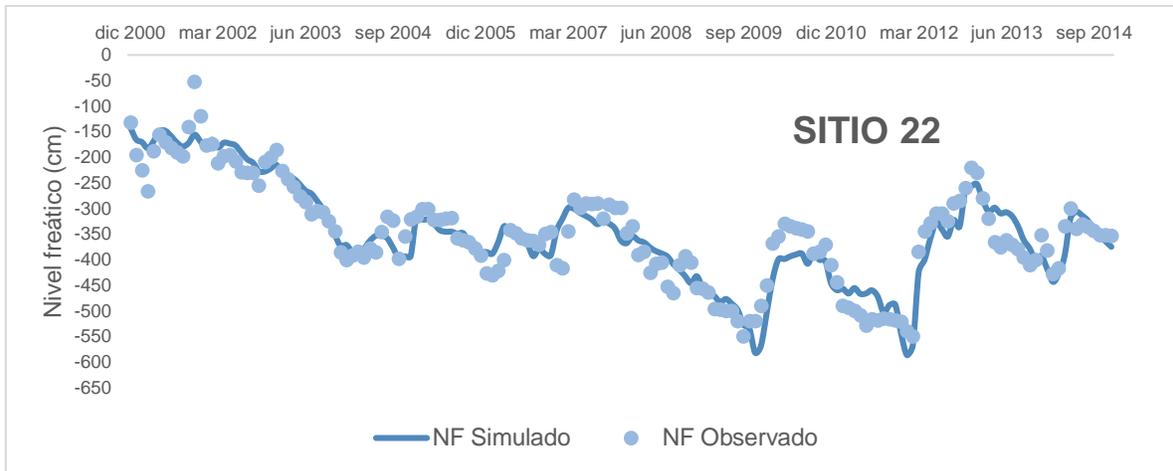


Figura 32: Simulación del nivel freático para el Sitio 22, en General Villegas.

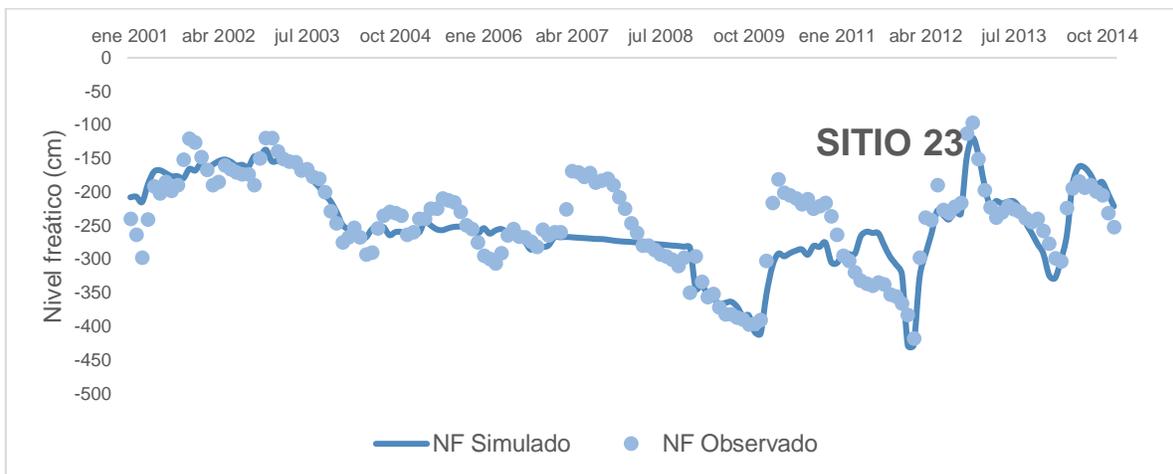


Figura 33: Simulación del nivel freático para el Sitio 23, en General Villegas.

Tabla 3: Estimación de la porosidad drenable para texturas frecuentes en General Villegas

Clase textural	F	FA	FA	FA	FA	FA	AF
% Arena	50	55	60	65	70	75	80
% Arcilla	15	14	13	12	10	8	6
Saturación	0,50	0,49	0,49	0,49	0,49	0,50	0,50
Capacidad de Campo	0,24	0,23	0,21	0,19	0,17	0,15	0,13
Porosidad drenable	0,25	0,26	0,28	0,3	0,32	0,34	0,37

