



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA

SIMULACIÓN DE LOS FLUJOS EN LA ZONA SATURADA Y VADOSA MEDIANTE UN MODELO HIDROGEOLÓGICO ACOPLADO

ALEX ARTURO SAMUEL CIFUENTES

Tesis para optar al grado de
Magister en Ciencias de la Ingeniería.

Profesor Supervisor:
JOSÉ FRANCISCO MUÑOZ PARDO

Santiago de Chile, Septiembre, 2018

© 2018, Alex Samuel.



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA

SIMULACIÓN DE LOS FLUJOS EN LA ZONA SATURADA Y VADOSA MEDIANTE UN MODELO HIDROGEOLÓGICO ACOPLADO

ALEX ARTURO SAMUEL CIFUENTES

Tesis para presentar a la comisión integrada por los profesores

JOSÉ FRANCISCO MUÑOZ PARDO

FRANCISCO I. SUAREZ P.

HERNÁN ALCAYAGA S.

ANDRÉS GUESALAGA

Para completar las exigencias del grado de Magister en Ciencias
de la Ingeniería.

Santiago de Chile, Septiembre, 2018

Dedicado a mis papás.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer a mi profesor supervisor José F. Muñoz por su apoyo y preocupación en cada etapa de este proceso. También agradecer al profesor Francisco Suárez por su ayuda y gran disposición.

Agradecer a los funcionarios y compañeros del Departamento de Hidráulica y Ambiental, especialmente a la sala sur y la sala H, que hicieron del proceso algo muy entretenido.

Agradecer a mi familia por su apoyo en todos los aspectos de mi vida y por motivarme siempre a completar el proceso de Magister.

Finalmente agradecer especialmente a Nicole Blin que me acompañó en cada una de las etapas este postgrado.

TABLA DE CONTENIDOS

	Página
AGRADECIMIENTOS.....	iii
TABLA DE CONTENIDOS	iv
ÍNDICE DE TABLAS.....	vi
ABSTRACT	ix
RESUMEN	x
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Hipótesis.....	5
1.2 Objetivo	5
1.3 Estructura de tesis.....	5
2 ZONA DE ESTUDIO.....	6
2.1 Ubicación de la zona de estudio	6
2.2 Información hidrogeológica disponible.....	8
3 DESCRIPCIÓN DEL MODELO NUMÉRICO ACOPLADO	10
3.1 MODFLOW	10
3.2 HYDRUS.....	10
3.3 Funcionamiento acoplado del modelo MODFLOW con el paquete HYDRUS	11
4 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO	13
5 SIMULACIONES.....	18
6 RESULTADOS	20
6.1 Calibración del modelo saturado	20

6.2	Calibración del modelo saturado	22
6.3	Resultados de las simulaciones	26
7	CONCLUSIONES	34

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Caudales de extracción de pozos de bombeo en Salar de Llamara (PRAMAR, 2008).	19
--	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de la zona de estudio y definición del borde de la cuenca del Salar de Llamara.	6
Figura 2. Ubicación del bosque de <i>P. Tamarugo</i> y de puntos de monitoreo en la cuenca del Salar de Llamara.	7
Figura 3. Ubicación de pozos de bombeo en el Salar de Llamara (PRAMAR, 2008)	8
Figura 4. Esquema de funcionamiento del modelo acoplado (Simunek et al., 2016).	12
Figura 5. Modelo conceptual hidrogeológico de la zona de estudio.	14
Figura 6. Serie de recarga en el tiempo impuesta en el modelo. La línea roja representa el valor obtenido del promedio histórico utilizado en Enero de 2006 y entre Octubre de 2012 y Septiembre de 2030. La línea azul representa la serie utilizada entre Febrero de 2006 y Septiembre de 2012. Fuente: PRAMAR, 2008.....	15
Figura 7. Distribución de conductividad hidráulica para estratos 1 (a) y 2 (b) propuestas en el EIA. Para cada una se presenta la zonificación y los valores por zona propuestos. (PRAMAR, 2008).....	21
Figura 8. Distribución de conductividad hidráulica obtenida para estratos 1 (izquierda) y 2 (derecha) mediante el proceso de calibración del modelo saturado.	22
Figura 9. Comparación de perfiles de humedad observados y simulados para el período entre Mayo y Julio de 2006 y sus respectivos valores de error cuadrático medio (ECM).	23
Figura 10. Curva de retención de humedad (izquierda) y conductividad hidráulica no saturada (derecha) en la zona vadosa obtenidas mediante el proceso de calibración del modelo acoplado.	24

Figura 11. Comparación de perfiles de humedad observados y simulados para el período entre Noviembre de 2007 y Enero de 2008 y sus respectivos errores cuadráticos medios (ECM).....	25
Figura 12. Evolución temporal del nivel freático modelado en los pozos de bombeo para las distintas simulaciones.	27
Figura 13. Evolución temporal del nivel freático en la zona del bosque de tamarugos (árboles A01, A41, A49 y A50) para las distintas simulaciones.....	28
Figura 14. Ubicación de puntos de monitoreo con respecto al pozo de bombeo 2HENOC.	30
Figura 15. Descenso del nivel freático en pozo 2HENOC y en los puntos de monitoreo (simulación 1) y distancia de cada punto con respecto al pozo 2HENOC, para 6 meses iniciado el bombeo (naranja), en el año 2010 (gris) y en el año 2030 (azul).....	31
Figura 16. Comparación entre la situación inicial y final del contenido de humedad en los puntos de monitoreo del modelo en la simulación 1.....	33
Figura 17. Resultados obtenidos por Decuyper et al. (2016). A la izquierda se presenta el resultado del indicador GCF en el bosque de árboles expuesto a una baja depresión de la napa. Mientras que a la derecha se presenta el mismo indicador para el bosque expuesto a una alta depresión de la napa.	3

ABSTRACT

In this work, a hydrogeological numerical model is presented, which, by coupling a saturated flow model (MODFLOW) with an unsaturated flow model (HYDRUS), simulates the flow in the saturated zone and the actual soil moisture saturated in an aquifer under intensive exploitation in recent years. The study area corresponds to an arid region located in the north of Chile: Salar de Llamara, where an ecosystem is exposed to extreme conditions, which stands out for the presence of the species *P. tamarugo*, an endemic tree of Chile that has a character of protection. The numerical model was constructed based on a saturated model developed for the study area in the environmental impact study of the Pampa Hermosa project. The main change made with the existing model was the addition of the unsaturated zone of the soil that allowed it to simulate the evolution of the moisture content in the points located in the *P. tamarugo* forest and thus obtain the main information regarding the water available for the trees in the sector. The results of the coupled model maintained a constant decrease in the water table level in the last 10 years, maintaining this behavior until the year 2030. This decrease is explained by the small amount of recharge entering to the aquifer and the existence of pumping wells that extract water from it. In some sectors close to the set of wells, there are decreases of up to 8 m in the simulated 25-year period and in more distant ones there are decreases of more than 1 m in the water table level that produce an important dehydration of the unsaturated soil. This scenario poses a high risk for the local ecosystem and *P. tamarugo*, which should be considered in the process of granting future rights to water extraction.

Keywords: *P. tamarugo*, arid región, vadose zone, numeric model.

RESUMEN

En este trabajo se presenta un modelo numérico hidrogeológico, que mediante el acoplamiento de un modelo de flujo saturado (MODFLOW) con un modelo de flujo no saturado (HYDRUS), simula el flujo en la zona saturada y el estado de humedad real de suelo no saturado en un acuífero sometido a una explotación intensiva en los últimos años. La zona de estudio corresponde a una región árida ubicada en el norte de Chile, llamada Salar de Llamara, donde se presenta un ecosistema sometido a condiciones extremas, que destaca por la presencia de la especie *Prosopis Tamarugo Phil (P. tamarugo)*, árbol endémico de Chile que tienen un carácter de protección. El modelo numérico se construyó acoplando un modelo desarrollado para la zona saturada con un modelo que simula el flujo vertical en la zona vadosa del suelo, lo que permitió simular la evolución del contenido de humedad en puntos localizados en el bosque de *P. tamarugo* y de esta forma obtener mayor información con respecto al agua disponible para los árboles del sector. Los resultados del modelo acoplado son similares a los resultados obtenidos por el modelo saturado y muestran un menor nivel de la napa en el Salar de Llamara para los próximos 15 años aproximadamente. Las simulaciones consideraron la recarga que ingresa al acuífero como el valor promedio de los últimos 28 años y una descarga por evaporación desde el suelo, transpiración del bosque de *P. tamarugo* y bombeo de pozos ubicados al norte del Salar de Llamara. En algunos sectores cercanos al conjunto de pozos se observan descensos de hasta 8 m en el periodo simulado de 25 años y en otros más alejados se observan descensos de 1 m en el nivel de la napa que producen una importante deshidratación del suelo no saturado, mostrando descensos en el contenido de humedad de hasta $0.3 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Este escenario supone un alto riesgo para el ecosistema y para el bosque de *P. tamarugo*, que debe ser contemplado en el proceso de otorgamiento de derechos futuros de extracción de agua.

Palabras clave: *P. tamarugo*, salar, región árida, zona vadosa, modelo numérico.

1 INTRODUCCIÓN

Las regiones áridas y semiáridas cubren más del 40% de la superficie terrestre (Salas, 2000), y la escasa vida en estos ecosistemas depende en su mayoría de las aguas subterráneas de acuíferos locales (Stromberg et al., 1996; Chen et al., 2014). En estas regiones, la zona vadosa presenta un rol importante debido a que generalmente el nivel del agua subterránea no está lo suficientemente cerca de la superficie como para abastecer de agua la vegetación existente en estos ecosistemas (Hogan et al., 2004). En la actualidad, se han realizado distintos estudios que buscan determinar el estado vital de la flora presente en zonas áridas o semiáridas (Chen et al., 2014).

El desierto de Atacama es uno de los lugares más áridos de supervivencia en el planeta (Decuyper et al., 2016). Se encuentra ubicado en el norte grande de Chile y su suelo presenta una composición altamente salina (Fierro, 2015; Cristi et al., 2016). Este desierto alberga distintos salares que en conjunto componen la denominada pampa del Tamarugal, que destaca por ser un ecosistema árido protegido y por tener quizás el caso más extremo de adaptación de un ser vivo a un ambiente árido (Decuyper et al., 2016).

La especie *Prosopis Tamarugo Phil* (*P. tamarugo*) (Ffolliot et al., 1983), es una especie de árbol de la familia Leguminosae y es una de las 44 especies de *Prosopis* en el mundo (Burkart, 1976). Es una flora endémica y protegida (CONAF, 2013) de la zona norte de Chile que se adapta a ambientes áridos y altamente salinos (Acevedo et al., 2007). La preservación de esta especie en el desierto de Atacama depende en gran parte del estado de humedad de la zona vadosa, debido a que en muchos ejemplares de estos árboles las raíces no alcanzan grandes profundidades (Sudzuki, 1969; Acevedo et al., 2007).

En la región de Antofagasta, durante los últimos 30 años ha aumentado la demanda de agua, tanto superficial como subterránea, para sistemas de irrigación o actividades mineras. Este aumento en la demanda ha producido una disminución paulatina y constante en el nivel freático de la zona (DGA., 2007; Salas et al., 2016). De

hecho, al año 2012 en la zona de la pampa del Tamarugal y sus alrededores, se registró una extracción de agua total equivalente a cuatro veces la recarga natural estimada del acuífero (Decuyper et al., 2016). Esta intervención humana y la sobre explotación del acuífero de la pampa constituye una amenaza real para la supervivencia del *P. tamarugo* y la flora local. Por esta razón, en la actualidad todos los proyectos de uso y aprovechamiento de aguas subterráneas en la pampa del Tamarugal y en los salares que la rodean han sido aprobados con restricciones ambientales (Cámara de diputados de Chile, 2014). El último proyecto aprobado en la zona de estudio fue el proyecto “Pampa Hermosa”, que tiene por objetivo aumentar la producción de yodo y construir una nueva planta de nitrato en el sector, de propiedad de la empresa SQM S.A. Para su aprobación, SQM S.A. tuvo que realizar un estudio de impacto ambiental (EIA) (PRAMAR, 2008) donde se cuantificaron los riesgos y posibles daños en el medio ambiente de la zona de estudio, que corresponde al Salar de Llamara.

Los estudios realizados en los últimos años han cuantificado el riesgo ambiental al que se expone la pampa del Tamarugal debido a la explotación de los acuíferos y cómo afecta esto a la supervivencia del *P. tamarugo* (PRAMAR, 2008; Rojas et al., 2010; Decuyper et al., 2016). En Decuyper et al. (2016) se presentan dos plantaciones de *P. tamarugo* que se han visto expuestas durante años a un descenso en el nivel de la napa en la Pampa del Tamarugal. La plantación A (Figura 1) presenta un descenso aproximado de 3 metros en 25 años (descrito como un descenso alto), mientras que la plantación B presenta un descenso de 0.4 metros en los mismos 25 años (descrito como descenso bajo). El efecto en los árboles de esta depresión en el nivel de la napa fue cuantificado mediante el indicador *Green canopy factor* (GCF) que corresponde a una medición indirecta de la actividad fotosintética de los árboles (Decuyper, et al. 2016). Los resultados obtenidos muestran que la plantación A tiene un 60% de los árboles en mal estado, mientras que la plantación B tiene un 47% de los árboles en mal estado. A pesar de la gran diferencia en el descenso de la napa observado en cada plantación, el

porcentaje de árboles en mal estado no es así de diferente. El resultado obtenido por Decuyper et al. (2016) muestra que el conocimiento del nivel de la napa y su comportamiento no es suficiente para determinar el estado de un *P. tamarugo*.



Figura 1. Resultados obtenidos por Decuyper et al. (2016). A la izquierda se presenta el resultado del indicador GCF en el bosque de árboles expuesto a una baja depresión de la napa. A la derecha se presenta el mismo indicador para el bosque expuesto a una alta depresión de la napa.

En otros estudios se han propuesto modelos hidrogeológicos que simulan el funcionamiento de los acuíferos alojados en la Pampa del Tamarugal, aunque estos modelos solamente representan la zona saturada (DICTUC, 2003; PRAMAR, 2008). En PRAMAR (2008) se propone una relación entre el nivel de profundidad de la napa y el estado vital de estos árboles. La profundidad de la napa bajo la copa de cada árbol en el Salar de Llamara se estimó en base a un modelo de la zona saturada basado en MODFLOW, mientras que el estado del *P. tamarugo* se estimó a partir de imágenes satelitales de alta resolución e información de terreno. Con esta información, y en base a

un análisis estadístico entre estas variables, se determinó que para profundidades de napa mayores que 13.3 m aumenta la probabilidad de encontrar un ejemplar del *P. tamarugo* en mal estado. Acevedo et al. (2015) propusieron otra relación entre la profundidad de la napa y el estado vital del *P. tamarugo*, donde se integran variables como la fracción de copa verde, el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), el enriquecimiento del tejido foliar con el isótopo ^{18}O y el crecimiento de ramas, para determinar una escala de daños al árbol en función de la profundidad de la napa. De esta forma, Acevedo et al. (2015) determinaron que a partir de una profundidad de napa de 6 m el *P. tamarugo* comienza a sufrir daños que se incrementan hasta llegar a una profundidad de 20 m, donde el árbol muere.

Sin embargo para evaluar correctamente la cantidad de agua que dispondrán los árboles de *P. tamarugo* debido a un descenso del nivel de la napa, se hace imprescindible simular adicionalmente la evolución del contenido de humedad en la zona no saturada, que es la que abastece de agua las raíces de estos árboles.

Según Barlow & Harbaugh (2006) y Furman (2008), MODFLOW (Harbaugh et al., 1988) es el modelo numérico más representativo para simular la interacción entre aguas subterráneas y aguas superficiales. Actualmente existen distintos paquetes que se acoplan a programa MODFLOW (Harbaugh et al., 1988) para representar la zona vadosa. Entre ellos, el paquete HYDRUS (Seo et al., 2007) destaca por sobre otros paquetes como el *Variably Saturated Flow* (VSF) (Thoms et al., 2006) o el *Unsaturated Zone Flow* (UZFI) (Niswonger et al., 2006) debido al gran balance que presenta entre eficiencia computacional y precisión de los resultados (Seo et al., 2008).

El objetivo general de este trabajo es obtener la mejor estimación del contenido de agua disponible para el *P. tamarugo* a través del desarrollo de un modelo hidrogeológico acoplado que permita simular el funcionamiento del acuífero sometido a una explotación intensiva y al mismo tiempo la evolución del contenido de humedad en la zona no saturada. Consecuentemente, el objetivo específico de este trabajo es evaluar el efecto

que tiene el bombeo de los pozos existentes en el Salar de Llamara sobre los niveles freáticos y los contenidos de humedad en el perfil de suelo. Los derechos de agua correspondientes a estos pozos alcanzan los 221 l/s y pertenecen a la empresa SQM S.A. (PRAMAR, 2008). Para lograr esto, se acopló un modelo tridimensional de flujo saturado basado en el modelo MODFLOW, con un modelo unidimensional de flujo en la zona vadosa basado en el modelo HYDRUS. Una de las ventajas de este nuevo modelo, frente los a modelos actuales, es que permite simular la evolución del estado de humedad del suelo bajo los árboles, frente a descensos de la napa.

1.1 Hipótesis

La hipótesis de trabajo de esta investigación establece que es posible estimar el agua disponible en la zona no saturada del suelo para el bosque de *P. tamarugo* en el Salar de Llamara mediante la simulación del flujo de agua subterránea con un modelo hidrogeológico MODFLOW en 3D acoplado con el modelo HYDRUS 1D.

1.2 Objetivo

Desarrollar un modelo hidrogeológico que permita simular el funcionamiento del acuífero del Salar de Llamara acoplando la zona vadosa a la zona saturada.

1.3 Estructura de tesis

Este documento presenta una breve descripción de la zona de estudio y de la información disponible para realizar este trabajo. Luego se describen las herramientas utilizadas, la construcción del modelo numérico acoplado que simula el funcionamiento del acuífero y de la zona no saturada y finalmente se presentan y analizan los resultados obtenidos y conclusiones.

2 ZONA DE ESTUDIO

2.1 Ubicación de la zona de estudio

La zona de estudio corresponde al Salar de Llamara ubicado en pleno Desierto de Atacama, Región de Tarapacá, Chile. El dominio fue definido en PRAMAR (2008) como la cuenca del Salar de Llamara, la que se presenta en la Figura 2.

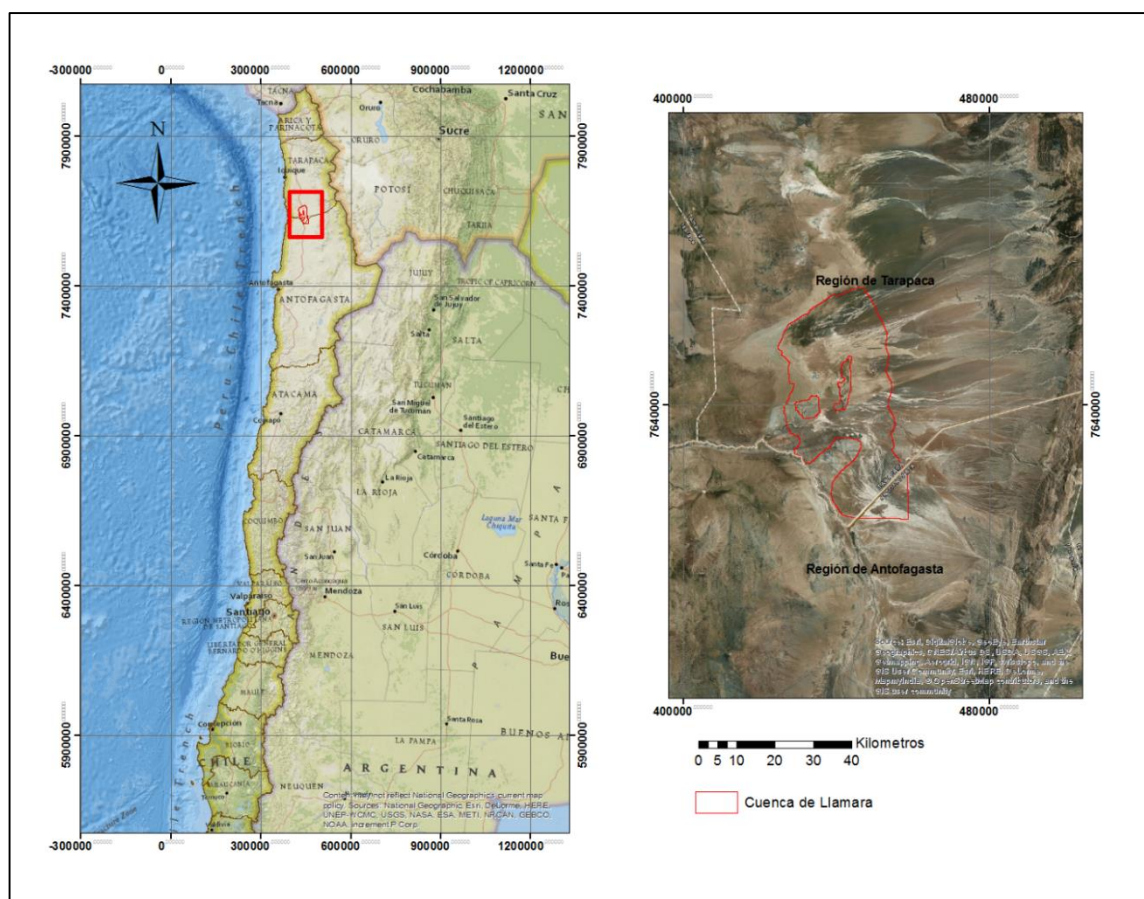


Figura 2. Ubicación de la zona de estudio y definición del borde de la cuenca del Salar de Llamara.

El bosque de *P. tamarugo* existente se encuentra ubicado en la zona norte del Salar de Llamara y su dominio aproximado se presenta en la Figura 3. Además, en la Figura 3 se presenta la ubicación de cuatro puntos de monitoreo que fueron utilizados en la calibración del modelo no saturado. Estos puntos corresponden al suelo que se encuentra bajo la copa de árboles de *P. tamarugo* definidos en PRAMAR (2008) como A01, A41, A49 y A50.

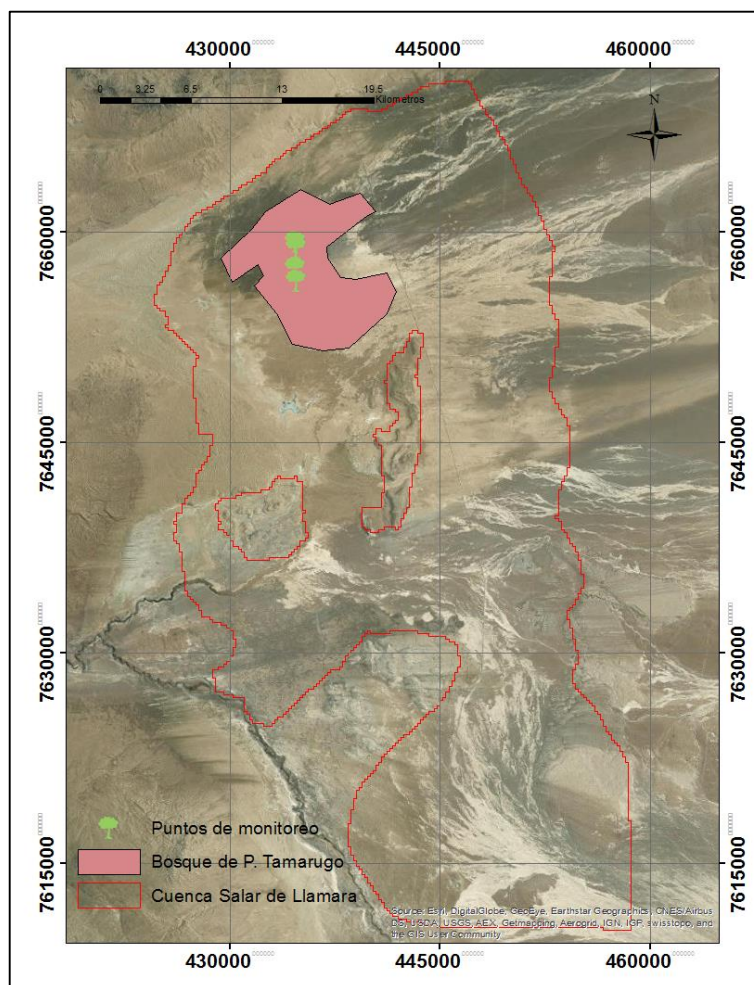


Figura 3. Ubicación del bosque de *P. Tamarugo* y de puntos de monitoreo en la cuenca del Salar de Llamara.

La ubicación de los pozos de bombeo en el Salar de Llamara se presenta en la Figura 4.

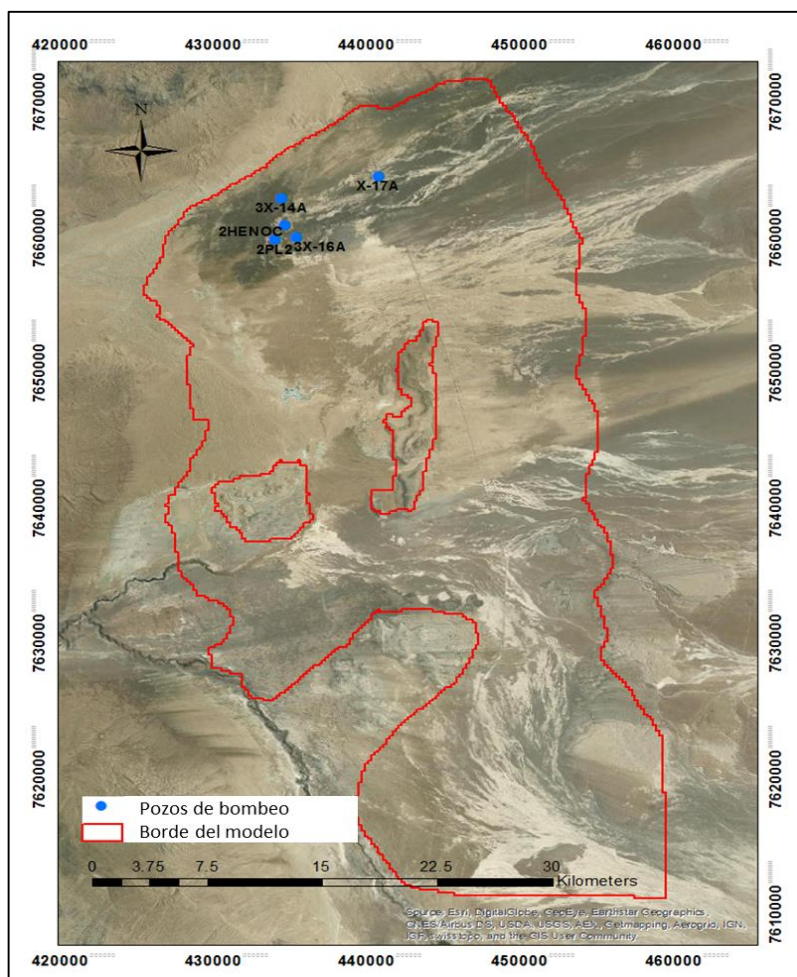


Figura 4. Ubicación de pozos de bombeo en el Salar de Llamara (PRAMAR, 2008)

2.2 Información hidrogeológica disponible

En PRAMAR (2008) se evaluó el efecto que tiene el descenso de la napa sobre los árboles de *P. tamarugo* debido a la explotación del agua subterránea. Para esto se utilizó un modelo numérico de la zona saturada basado en el programa MODFLOW. La

aprobación del proyecto Pampa Hermosa exigió a la empresa SQM S.A. un plan de seguimiento ambiental, que contempla mantener actualizado el modelo numérico hidrogeológico (PRAMAR, 2008), y realizar mediciones periódicas del contenido de humedad y de la profundidad de la napa en la zona de estudio. La información disponible del plan de seguimiento ambiental se utilizó para la calibración y validación del modelo acoplado desarrollado en este trabajo.

Los niveles de profundidad de la napa utilizados para desarrollar el modelo corresponden a mediciones mensuales realizadas entre Enero de 2006 y Septiembre de 2012, en 75 pozos de observación en el Salar de Llamara. Por otro lado, los perfiles de humedad utilizados en el desarrollo del modelo corresponden a mediciones de este parámetro realizadas a distintas profundidades bajo la copa de los árboles A01, A41, A49 y A50 (Figura 3), efectuadas entre Mayo y Julio de 2006, y entre Noviembre de 2007 y Enero de 2008.

3 DESCRIPCIÓN DEL MODELO NUMÉRICO ACOPLADO

3.1 MODFLOW

MODFLOW es un modelo tridimensional de flujo de agua subterránea basado en el método de las diferencias finitas (Harbaugh et al., 1988), desarrollado por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS). La versión utilizada en este trabajo es MODFLOW-2000 (Harbaugh et al., 2000). El flujo de agua en MODFLOW es modelado en la zona saturada, tanto para acuíferos libres como para acuíferos confinados, resolviendo la ecuación de conservación de masa (Harbaugh et al., 1988, 2000):

$$\frac{d}{dx}\left(K_x \frac{dH}{dx}\right) + \frac{d}{dy}\left(K_y \frac{dH}{dy}\right) + \frac{d}{dz}\left(K_z \frac{dH}{dz}\right) - W = S_s \frac{dH}{dt} \quad (1)$$

donde K_x , K_y y K_z [LT^{-1}] son las conductividades hidráulicas en cada dirección x , y y z ; H [L] es la carga hidráulica; W [T^{-1}] es el flujo por unidad de volumen de fuentes externas; S_s [L^{-1}] es el coeficiente de almacenamiento específico y t [T] es el tiempo.

3.2 HYDRUS

HYDRUS 1D (Šimůnek et al., 2005) simula el movimiento unidimensional de agua a través de la zona vadosa. En este caso, el modelo HYDRUS 1D resuelve la ecuación de Richards en la dirección vertical, lo que permite incorporar procesos como precipitación, infiltración y evaporación, entre otros (Simunek et al., 2005, 2008, Seo et al., 2008). La ecuación de Richards en la dirección vertical se escribe como:

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{d}{dz}\left[K(h) \frac{dh}{dz} - K(h)\right] - S \quad (2)$$

donde θ [L^3L^{-3}] es el contenido de humedad, h [L] es la altura de presión, t [T] es el tiempo, z [L] es la coordenada vertical (definida positiva en la dirección hacia arriba), S

$[T^{-1}]$ es el agua captada por las plantas y $K(h)$ $[LT^{-1}]$ es la conductividad hidráulica no saturada.

Para resolver la Ec. (2) es necesario definir la curva de retención de humedad, $h(\theta)$ Ec. (3) y la de conductividad hidráulica no saturada, $K(h)$ Ec. (4). La curva de retención de humedad caracteriza la relación entre la altura de presión h y el contenido de humedad del suelo θ , y representa la succión a la que el agua es retenida por el suelo. La curva de conductividad hidráulica no saturada representa la capacidad del suelo de transportar agua a distintos niveles de saturación θ o de succión h . En este trabajo, estas dos curvas características del suelo fueron expresadas mediante el modelo de van Genuchten/Mualem (1980):

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)^m} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$K(h) = K_s S_e^l \left[1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (4)$$

donde θ_s y θ_r $[L^3L^{-3}]$ son los contenidos de humedad de saturación y residual, respectivamente; α $[L^{-1}]$ es el inverso de la presión de burbujeo; l $[-]$ es el parámetro de conectividad de poros, estimado como 0.5 (Mualem, 1976); n y m $[-]$ son parámetros empíricos; K_s $[LT^{-1}]$ es la conductividad hidráulica saturada; y S_e $[-]$ es el grado de saturación, definido como:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (5)$$

3.3 Funcionamiento acoplado del modelo MODFLOW con el paquete HYDRUS

El paquete de HYDRUS fue desarrollado para acoplarse al resto de los paquetes que conforman el programa MODFLOW como un borde de flujo variable impuesto en la

zona vadosa de cada columna (Seo et al., 2007). Es decir, cada columna se divide en una cantidad de nodos, que se agrupan en dos conjuntos diferenciados por la posición de la napa: la zona vadosa por la parte superior, y la zona saturada por la parte inferior. De esta forma, HYDRUS calcula los flujos en la zona vadosa de cada columna utilizando la ecuación de Richards (Ec. (2)) y el nivel freático, mientras que MODFLOW estima los flujos en la zona saturada a partir de la recarga obtenida con el modelo HYDRUS y del nivel freático a través de la resolución del principio de conservación de masa (Ec. (1)). Una vez resuelta la ecuación de conservación de masa, MODFLOW genera como resultado una nueva posición de la napa (Figura 5). Así, este proceso se repite para cada paso de tiempo impuesto en el modelo.

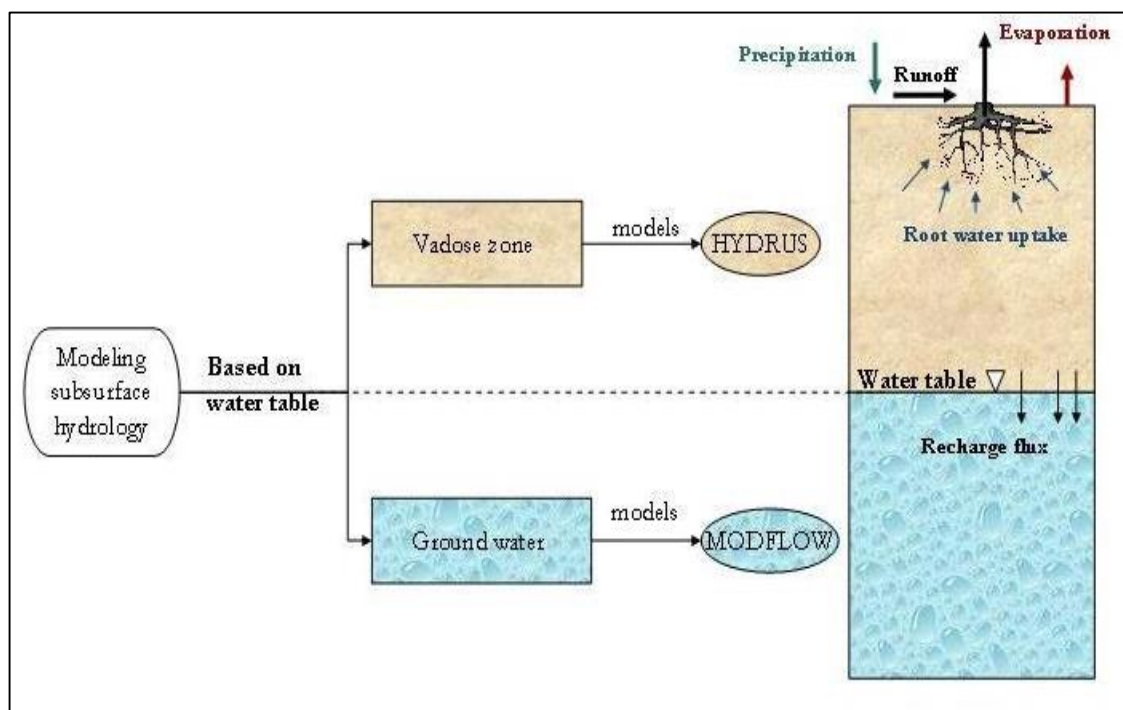


Figura 5. Esquema de funcionamiento del modelo acoplado (Simunek et al., 2016).

4 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO

El modelo numérico hidrogeológico de la zona saturada se construyó modificando el modelo disponible para la zona de estudio (PRAMAR, 2008). Se adoptó una discretización espacial horizontal de 250 filas y 150 columnas con un tamaño de celda de 236 m de ancho y 236 m de largo, y una discretización vertical de 2 estratos de espesor variable.

El modelo se construyó para simular 300 períodos de estrés donde el primer período corresponde a una simulación en régimen permanente y representa el día 31 de enero de 2006. Los 299 períodos restantes corresponden a una simulación en régimen transiente y cada uno corresponde a un mes entre el 1 de Febrero de 2006 y el 1 de Septiembre de 2030, lo que representa un escenario de 25 años de simulación.

La topografía y el fondo de cada estrato se obtuvieron del modelo disponible (PRAMAR, 2008) y corresponden a interpolaciones realizadas en base a mapas de curvas de nivel de la zona de estudio. Las propiedades hidrogeológicas del modelo, como la conductividad hidráulica y el coeficiente de almacenamiento, también fueron obtenidas del mismo modelo y corresponden a mapas de distribución previamente calibrados.

La recarga del sistema proviene de las precipitaciones caídas en las cuencas vecinas de Guatacondo, de Maní y de Mal Paso (Figura 6). Esta recarga ingresa a la zona de estudio como un flujo lateral subterráneo. La serie utilizada como recarga se presenta en la Figura 7. Para efectos de las simulaciones realizadas hasta el año 2030, y debido a la falta de mediciones de datos hidrológicos, el valor de la recarga utilizado entre Octubre del 2012 y Septiembre del 2030 corresponde al promedio histórico de la recarga proveniente de las cuencas vecinas entre Enero de 1978 y Enero de 2006, correspondiente a 460.5 l/s.

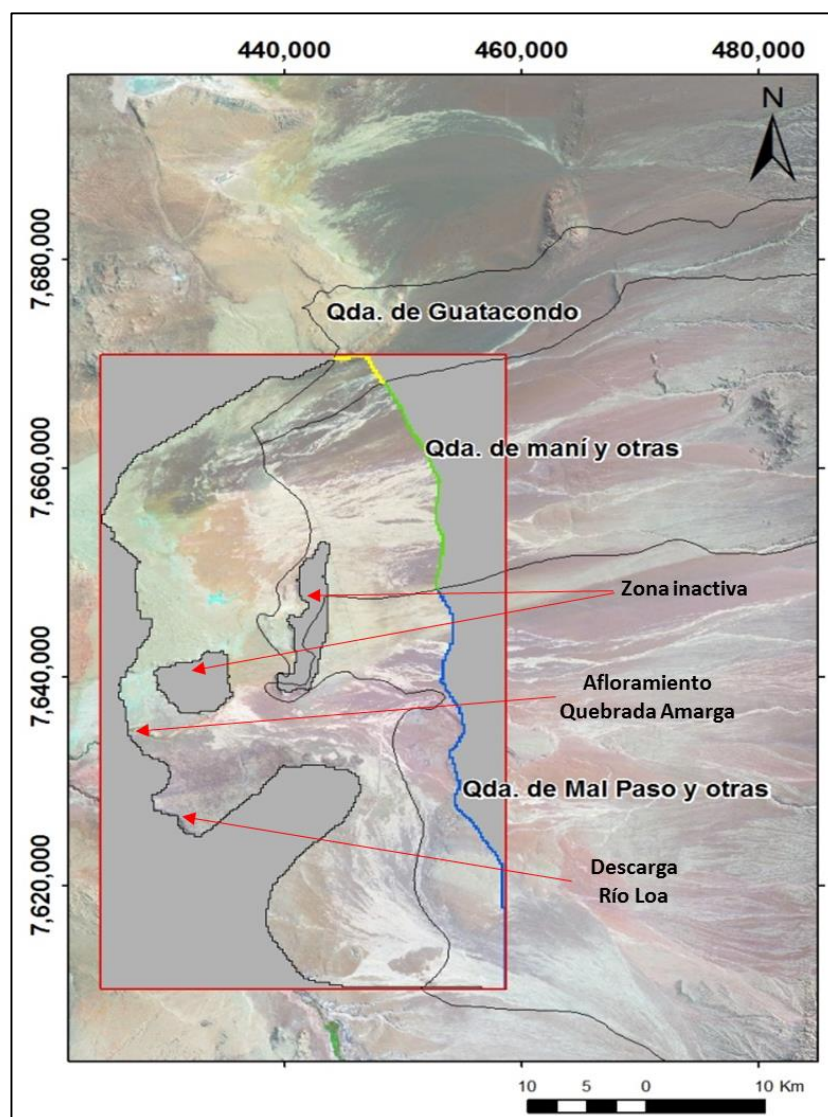


Figura 6. Modelo conceptual hidrogeológico de la zona de estudio.

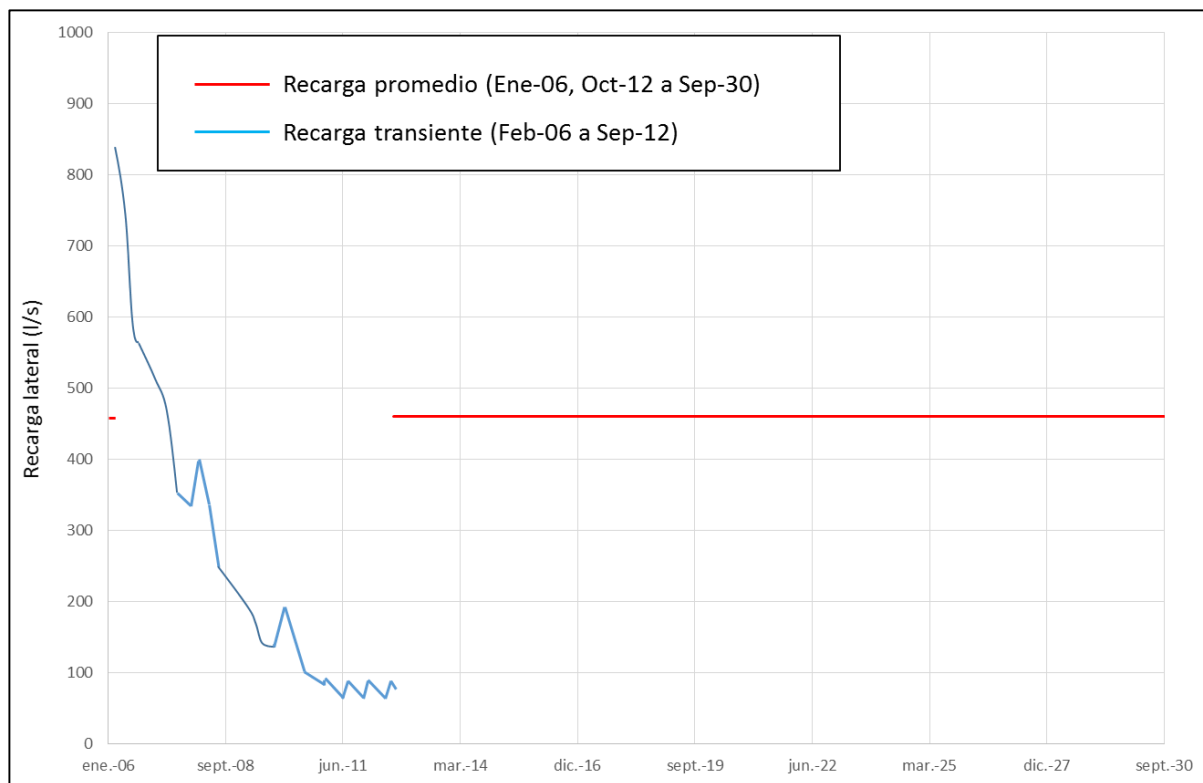


Figura 7. Serie de recarga en el tiempo impuesta en el modelo. La línea roja representa el valor obtenido del promedio histórico utilizado en Enero de 2006 y entre Octubre de 2012 y Septiembre de 2030. La línea azul representa la serie utilizada entre Febrero de 2006 y Septiembre de 2012.

Las descargas del sistema están compuestas por los siguientes procesos: evapotranspiración desde el bosque de *P. tamarugo*, estimada en 1.9 l/s; un afloramiento hacia la quebrada Amarga, estimado en 128.3 l/s; descarga hacía el río Loa, estimada en 10.6 l/s; y la evaporación desde la superficie del suelo desnudo ingresada al modelo en función del valor de evaporación potencial correspondiente a 4.6 mm/día (PRAMAR, 2008). Los valores descritos se consideraron para el proceso de calibración y para las simulaciones.

La calibración del modelo se realizó en dos etapas. La primera consistió en una calibración del modelo saturado (MODFLOW) realizada para el período comprendido entre Enero de 2006 y Marzo de 2012, mientras que la segunda consistió en una calibración del modelo acoplado realizada para el período comprendido entre Mayo y Julio de 2006.

La calibración realizada para el modelo saturado consistió en ajustar la conductividad hidráulica K_s de la zona de estudio en base a una comparación de niveles de agua simulados y medidos para un mismo punto. Este proceso fue realizado utilizando el programa PEST (Doherty et al., 2010). PEST es un programa de dominio público que permite realizar de forma independiente una estimación de parámetros en base a análisis de incertidumbre (Doherty et al., 2010). Cabe mencionar que la distribución del coeficiente de almacenamiento utilizada en el modelo acoplado es la misma que la utilizada en el modelo del EIA debido a que se consideró la distribución más representativa.

En PEST se desarrolla un proceso de calibración que se resuelve mediante una minimización de la suma de los errores cuadrados en los niveles de agua simulados y medidos, en función de la respuesta del modelo a un valor de conductividad hidráulica, de acuerdo a la Ec. (6):

$$\min \sum \varepsilon_i^2 = (X(p_i) - O_i)^2 \quad (6)$$

donde i es una posición en el modelo; ε es la diferencia entre lo observado y lo calculado; X es la función que representa el modelo, p es el parámetro a calibrar en la posición i ; y O es la observación realizada en la posición i .

La calibración realizada al modelo acoplado consistió en un ajuste de la curva de succión y de conductividad hidráulica en la zona vadosa, ecuaciones (3) y (4) respectivamente, mediante una comparación de perfiles de humedad simulados y medidos bajo la copa de los árboles A01, A41, A49 y A50, entre Mayo y Julio del 2006.

Además se efectuó una validación de las curvas encontradas, mediante una nueva comparación de perfiles de humedad simulados y medidos, en los mismos puntos de monitoreo, pero esta vez entre Noviembre del 2007 a Enero del 2008.

5 SIMULACIONES

El modelo acoplado se utilizó para simular los flujos de agua subterránea en la zona saturada y en la zona no saturada del área modelada entre el 1 de Febrero de 2006 y 1 de Septiembre de 2030. El propósito de las simulaciones es evaluar el efecto que tiene la extracción de agua subterránea desde 5 pozos de bombeo sobre el nivel de la napa y sobre el contenido de humedad del suelo situado bajo el bosque de *P. tamarugo* de la zona. La ubicación de los pozos de bombeo en la zona de estudio se presenta en la Figura 4.

Se realizaron cuatro simulaciones con el objetivo de observar la respuesta del acuífero frente a distintos escenarios de estrés hídrico. La simulación 1 considera el efecto de los 5 pozos de bombeo ubicados en la zona de estudio y sus respectivos caudales de extracción informados en el EIA (PRAMAR, 2008), según los derechos de aprovechamiento otorgados a la empresa SQM S.A. La simulación 2 considera un aumento en un 25% del valor de los caudales de explotación. La simulación 3 considera el valor de los caudales del escenario 1 pero esta vez se somete al acuífero a una disminución del 20% en la tasa de recarga, impuesta entre Octubre de 2012 y Septiembre de 2030, obteniendo una tasa de recarga de 368 l/s. La simulación 4 considera el valor de los caudales de la simulación 1 pero esta vez la recarga impuesta corresponde a una extensión del último año con datos medidos, es decir se repitió hasta Septiembre del 2030 la recarga impuesta entre Octubre del 2011 y Septiembre del 2012. El valor de los caudales utilizados en cada simulación se presenta en la Tabla 1 y las series de recargas utilizadas se presenta en la Figura 8.

Tabla 1. Caudales de extracción de pozos de bombeo en Salar de Llamara (PRAMAR, 2008).

		Simulación 1	Simulación 2	Simulación 3	Simulación 4
Pozo de bombeo (l/s)	2HENOC	60	75	60	60
	3X-16A	65	81	65	65
	3X-14A	35	44	35	35
	X-17A	30	38	30	30
	2PL2	31	39	31	31

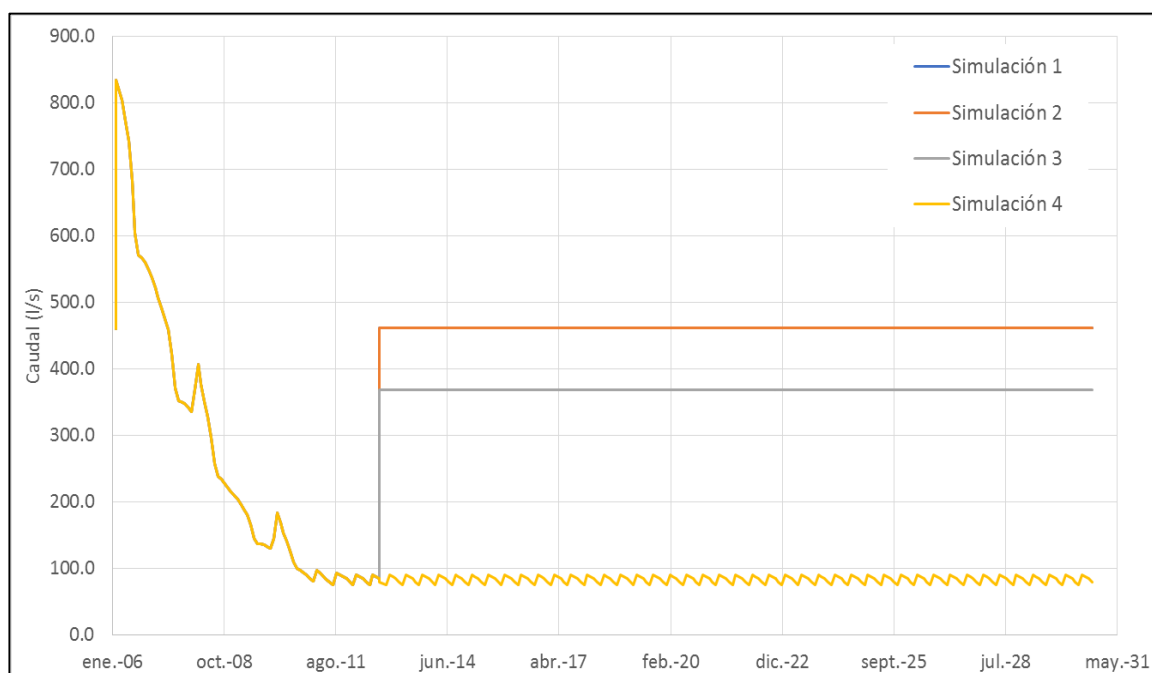


Figura 8. Series de recarga utilizada en cada simulación.

6 RESULTADOS

6.1 Calibración del modelo saturado

El proceso de calibración realizado al modelo saturado tuvo como objetivo lograr una disminución de la suma de errores cuadráticos entre los niveles observados y simulados, representada como:

$$\sum_i^N \varepsilon_i^2 = (obs_i - sim_i)^2 \quad (7)$$

donde N corresponde al número total de pozos de observación en el modelo, i al pozo de observación i , obs_i al nivel observado en el pozo i , sim_i al nivel simulado en el pozo i y ε corresponde a la diferencia entre los niveles observados y simulados.

La distribución inicial de la conductividad hidráulica en el modelo, para los estratos 1 y 2, fue la propuesta en el EIA (PRAMAR, 2008) y se presenta en la Figura 9. Para esta distribución el valor de la suma de errores cuadráticos entre los niveles simulados y observados es de 29.658 m².

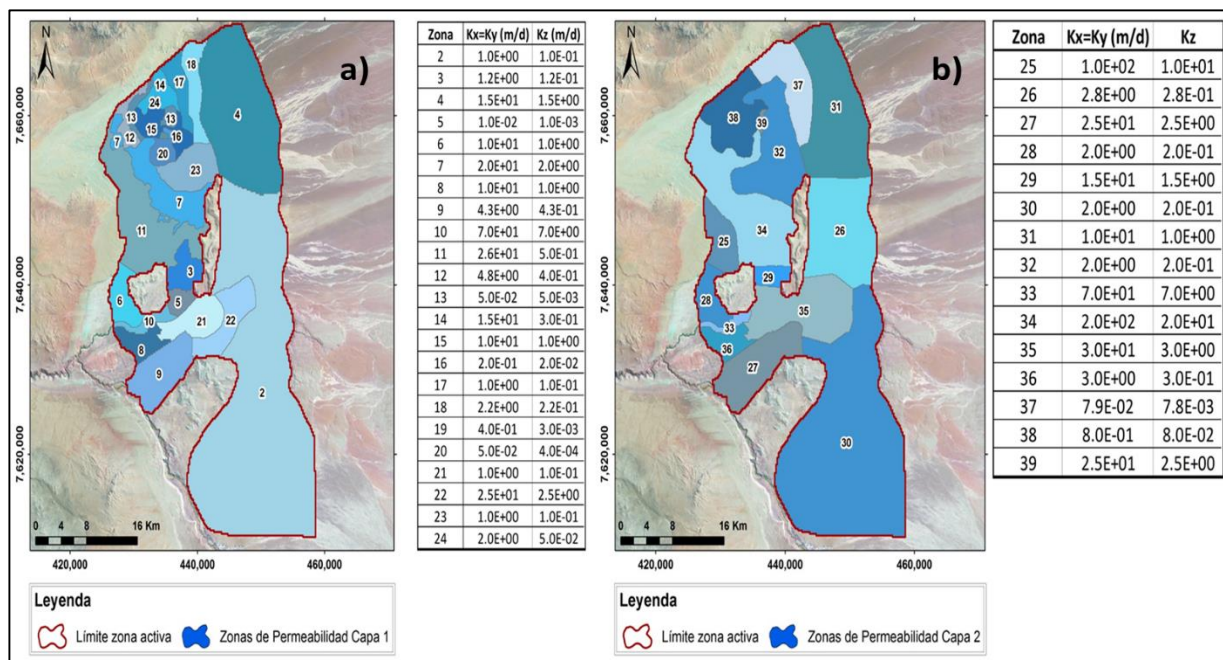


Figura 9. Distribución de conductividad hidráulica para estratos 1 (a) y 2 (b) propuestas en el EIA. Para cada una se presenta la zonificación y los valores por zona propuestos.

(PRAMAR, 2008)

La metodología de calibración utilizada tuvo como primera etapa representar cada una de las zonas de conductividad hidráulica propuesta en el EIA (PRAMAR, 2008) mediante puntos pivote (*pilot points*), los cuales adquirieron un valor de conductividad igual al de zona que representaron. Luego mediante el programa PEST, se realizó una interpolación entre los puntos basada en las observaciones de la altura de la napa usando el método Kriging (Doherty et al., 2010). De esta forma, en las áreas del modelo con mayor cantidad de observaciones, las celdas tomaron un valor propio de conductividad hidráulica, generando distribuciones continuas de este parámetro. Finalmente la distribución de conductividad hidráulica encontrada arrojó un valor de la suma de los errores cuadráticos entre los niveles observados y simulados de 17329 m², lo que

corresponde a una disminución de aproximadamente el 40% del valor obtenido en el modelo inicial (29685 m²). La distribución generada del proceso de calibración para los estratos 1 y 2 se presenta en la Figura 10.

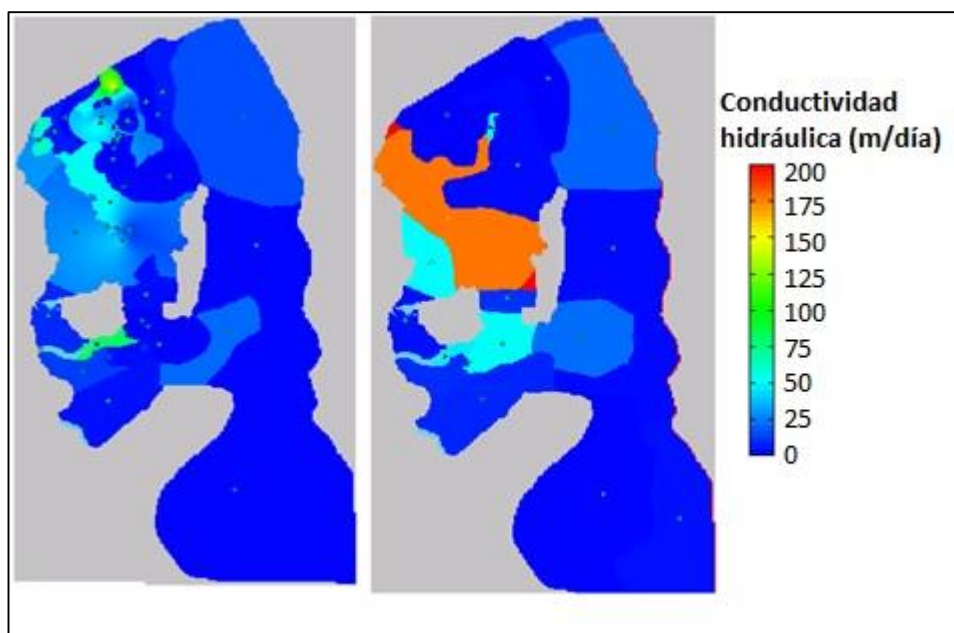


Figura 10. Distribución de conductividad hidráulica obtenida para estratos 1 (izquierda) y 2 (derecha) mediante el proceso de calibración del modelo saturado.

6.2 Calibración del modelo no saturado

El proceso de calibración del modelo no saturado se realizó de forma manual y tuvo como objetivo replicar los perfiles de humedad observados en los puntos de monitoreo A01, A41, A49 y A50 reportados en PRAMAR (2008). Para lograrlo, se ajustaron los parámetros θ_s , θ_r y α de la curva de succión Ec. (3) y el parámetro Ks de la curva de conductividad hidráulica no saturada Ec. (4).

Los resultados del proceso de calibración efectuado al modelo acoplado se presentan en la Figura 11. Los perfiles de humedad modelados se ajustan bien a las

mediciones realizadas, con un error cuadrático medio (ECM) que fluctúa entre 0.007 m^3/m^3 y 0.026 m^3/m^3 , y tiene un valor promedio de 0.014 m^3/m^3 entre las 12 comparaciones de perfiles de humedad.

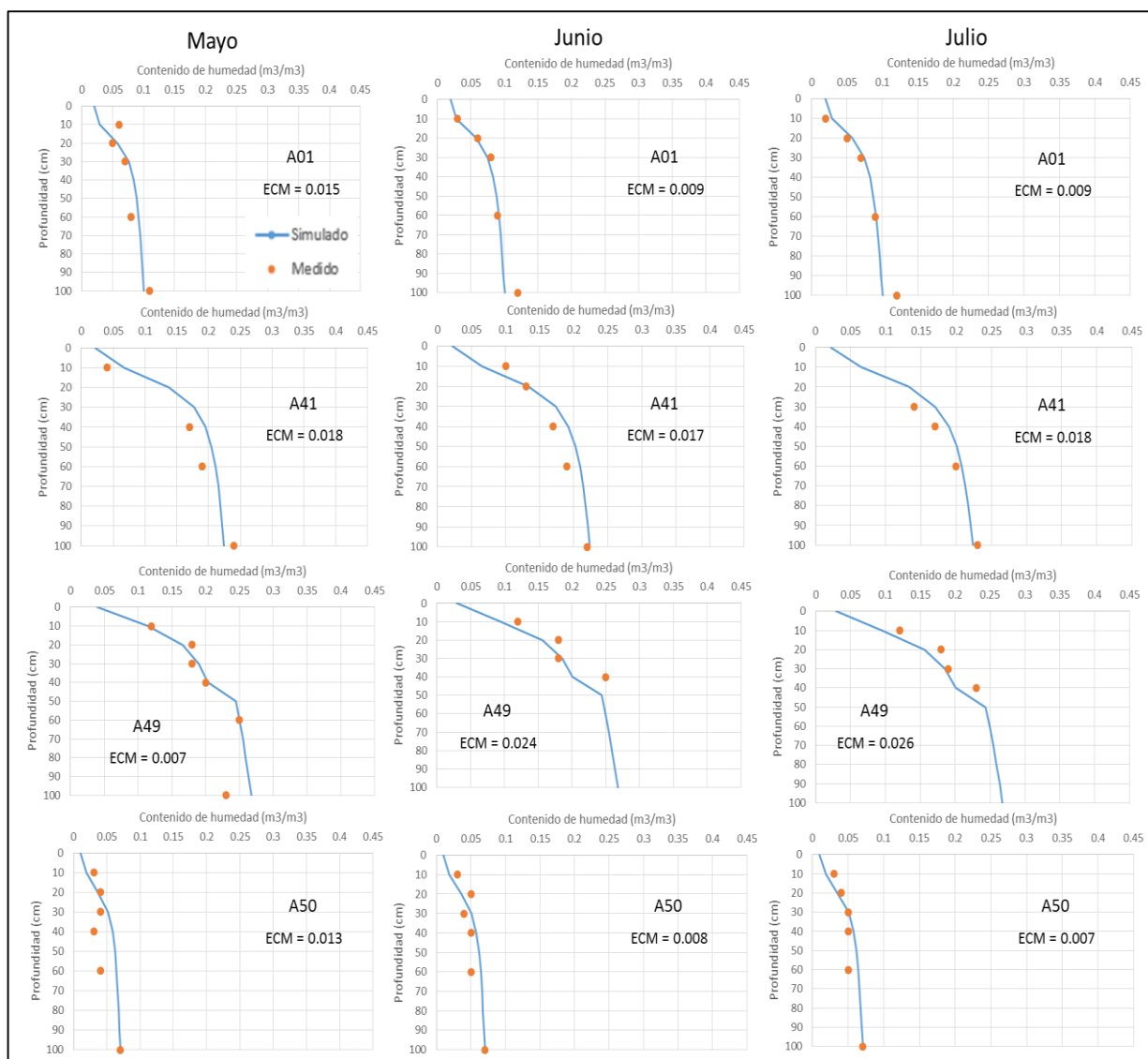


Figura 11. Comparación de perfiles de humedad observados y simulados para el período entre Mayo y Julio de 2006 y sus respectivos valores de error cuadrático medio (ECM).

Las propiedades hidrodinámicas del suelo en el área donde se ubican los árboles son las presentadas en la Figura 12.

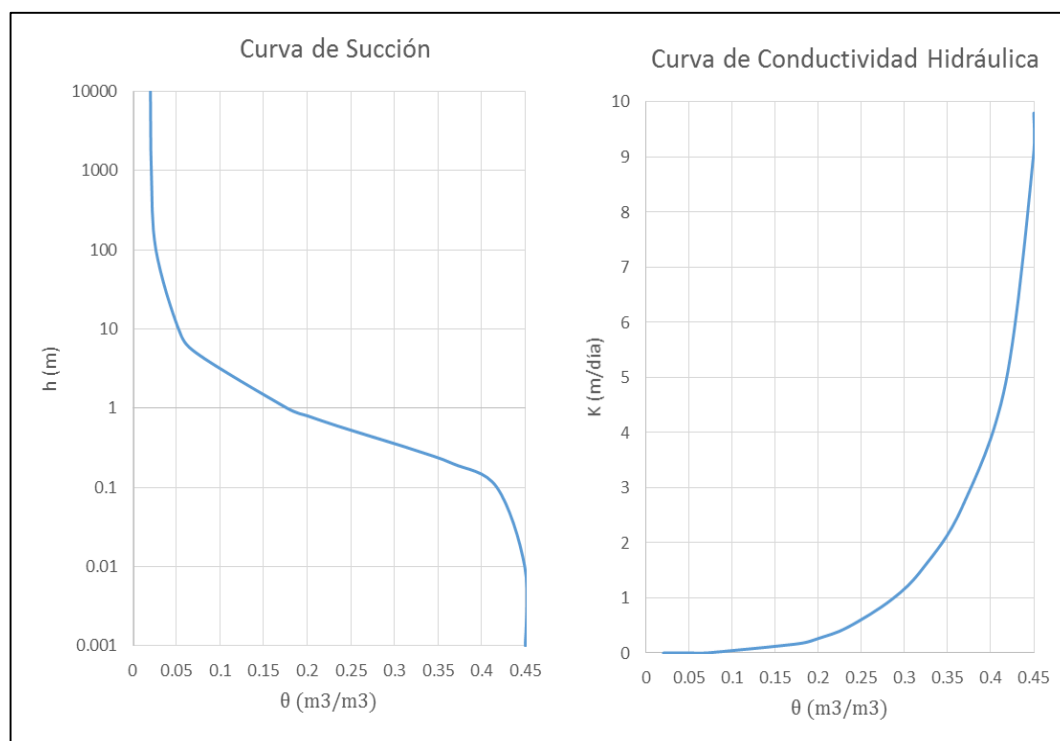


Figura 12. Curva de retención de humedad (izquierda) y conductividad hidráulica no saturada (derecha) en la zona vadosa obtenidas mediante el proceso de calibración del modelo acoplado.

La validación del modelo se realizó con la información disponible entre Noviembre de 2007 y Enero de 2008. La Figura 13 muestra los resultados de la validación. Los perfiles de humedad simulados se ajustan de buena forma a las mediciones, lo que indica que las propiedades hidrodinámicas encontradas en el proceso de calibración anterior representan de forma adecuada lo que sucede en el suelo. El ECM en la validación fluctúa entre $0.006 \text{ m}^3/\text{m}^3$ y $0.023 \text{ m}^3/\text{m}^3$, con un valor promedio de $0.011 \text{ m}^3/\text{m}^3$ entre las 12 comparaciones de perfiles de humedad.

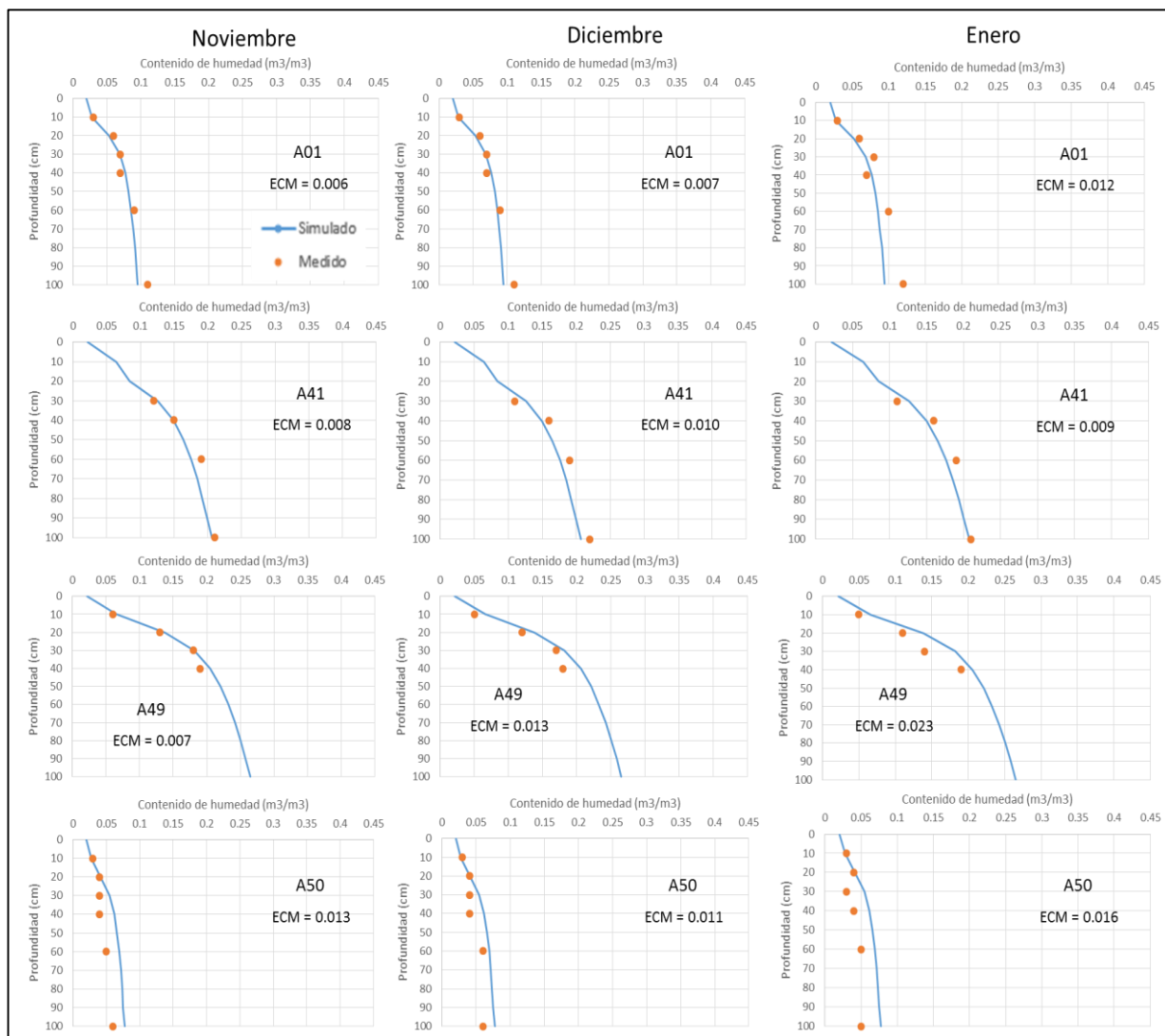


Figura 13. Comparación de perfiles de humedad observados y simulados para el período entre Noviembre de 2007 y Enero de 2008 y sus respectivos errores cuadráticos medios (ECM).

6.3 Resultados de las simulaciones

4.3.1. Evolución de la profundidad de la napa

La evolución del nivel freático en cada pozo de bombeo para todas las simulaciones se presenta en la Figura 14. Se observa que en todas las simulaciones se produjo un descenso del nivel freático. Además, los resultados sugieren que las fluctuaciones de la recarga futura (simulaciones 3 y 4) no tienen una influencia notoria sobre los niveles observados en los pozos de bombeo. Este comportamiento se debe a la gran distancia que hay entre el borde oriental de recarga y el conjunto de pozos de bombeo, y a la relación entre la recarga y el tamaño del acuífero. Cabe mencionar que en el modelo realizado para el EIA se obtuvieron resultados similares frente a fluctuaciones en la recarga.

Por otro lado, el aumento en los caudales de extracción de los pozos de bombeo (simulación 2) generó mayores descensos en el nivel de la napa que en el resto de las simulaciones. Por ejemplo, el pozo 2HENOC en la simulación 2 presentó un descenso adicional de 1.8 m en el año 2030 con respecto al descenso alcanzado en la simulación 1, solamente con un 25% de extracción de agua adicional. Esta diferencia en el nivel freático es importante considerando que en los últimos 30 años se ha producido un incremento sostenido del caudal de extracción total en sectores como la Pampa del Tamarugal o en el Salar de Llamara (Decuyper et al., 2016).

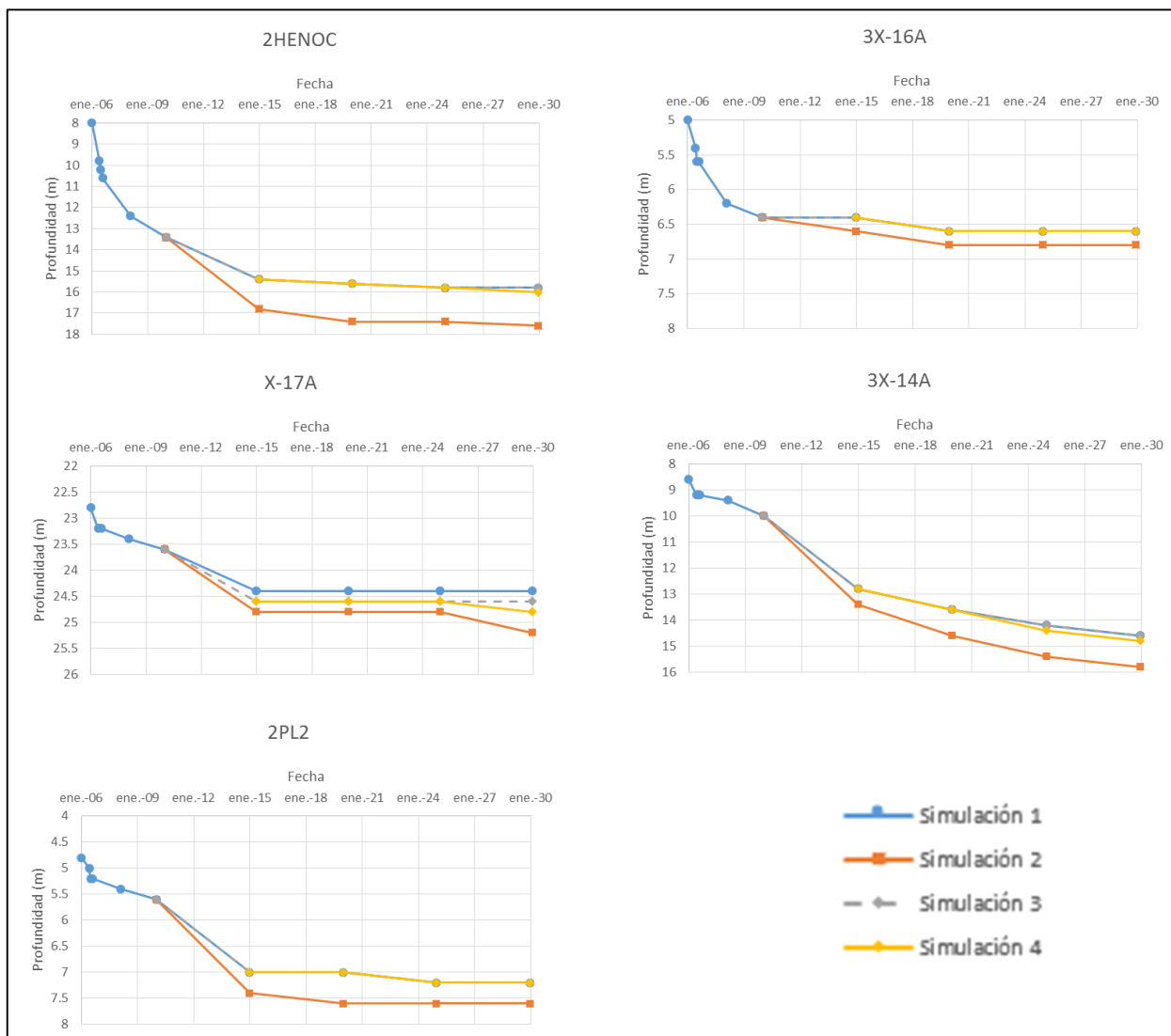


Figura 14. Evolución temporal del nivel freático modelado en los pozos de bombeo para las distintas simulaciones.

La Figura 15 presenta la evolución temporal del nivel freático modelado bajo la copa de los árboles A01, A41, A49 y A50 (que corresponden a los puntos de monitoreo utilizados en la calibración del modelo). Nuevamente se observa que las fluctuaciones de

la recarga (simulaciones 3 y 4) no afectan significativamente los niveles freáticos en la zona de bosque de tamarugos, y que un aumento en el caudal de extracción de los pozos de bombeo (simulación 2) produjo descensos adicionales en el nivel freático.

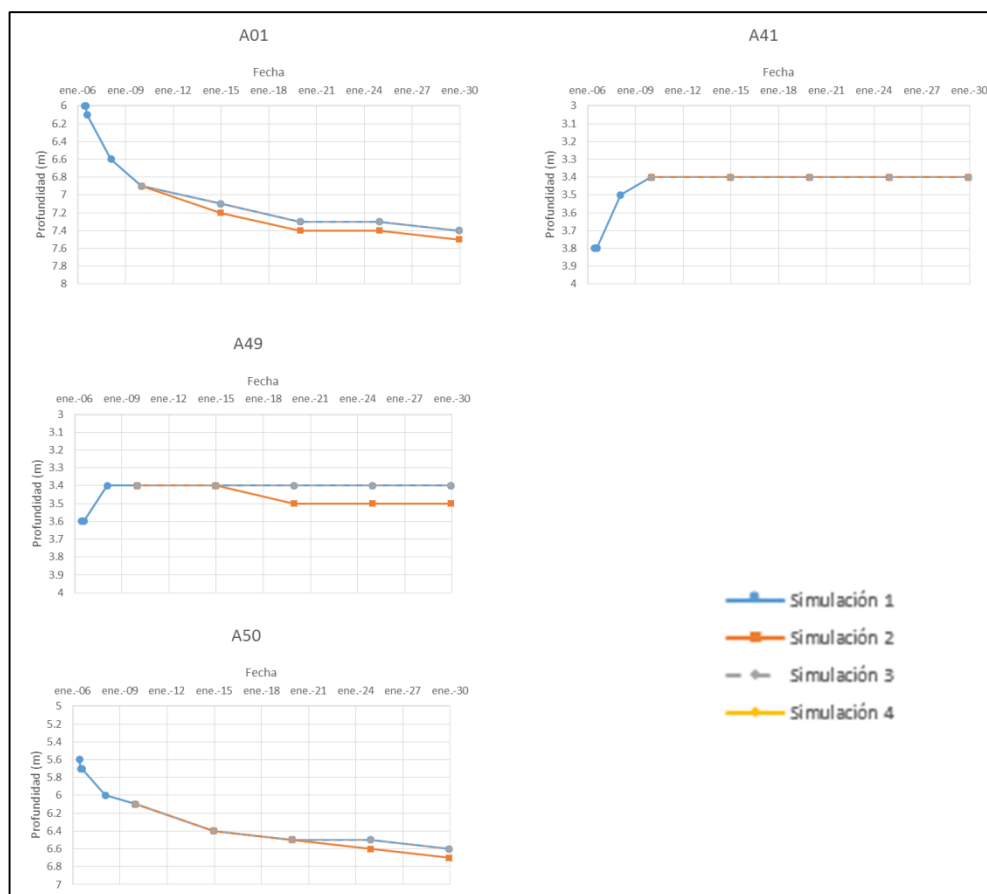


Figura 15. Evolución temporal del nivel freático en la zona del bosque de tamarugos (árboles A01, A41, A49 y A50) para las distintas simulaciones.

Los resultados presentados en la Figura 15 muestran que en ningún árbol se alcanzó la profundidad del nivel freático que daña los tamarugos según la propuesta descrita en el EIA (13.3 m). Sin embargo, según la escala propuesta por Acevedo et al. (2015), los árboles A01 y A50 podrían sufrir daños debido a que la profundidad del

nivel freático en estos puntos al final de las simulaciones es mayor que 6 m. Este valor corresponde al primer umbral de daños en la escala de Acevedo et al. (2015). También se observa que los puntos de monitoreo A41 y A49 presentan un aumento en el nivel freático, un comportamiento contrario al de los puntos A01 y A50 que presentan descensos finales mayores que 1 m. Esto se debe a que los árboles se encuentran a distintas distancias del conjunto de pozos de bombeo, como se puede ver en la Figura 16. Además, en la Figura 17 se presenta la relación obtenida entre el descenso del nivel freático en cada punto de monitoreo (simulación 1) y la distancia de éstos con respecto al conjunto de pozos, teniendo como referencia el pozo 2HENOC. De la Figura 17 se puede estimar la influencia de la extracción producida por los pozos de bombeo en el bosque de *P. tamarugo*.

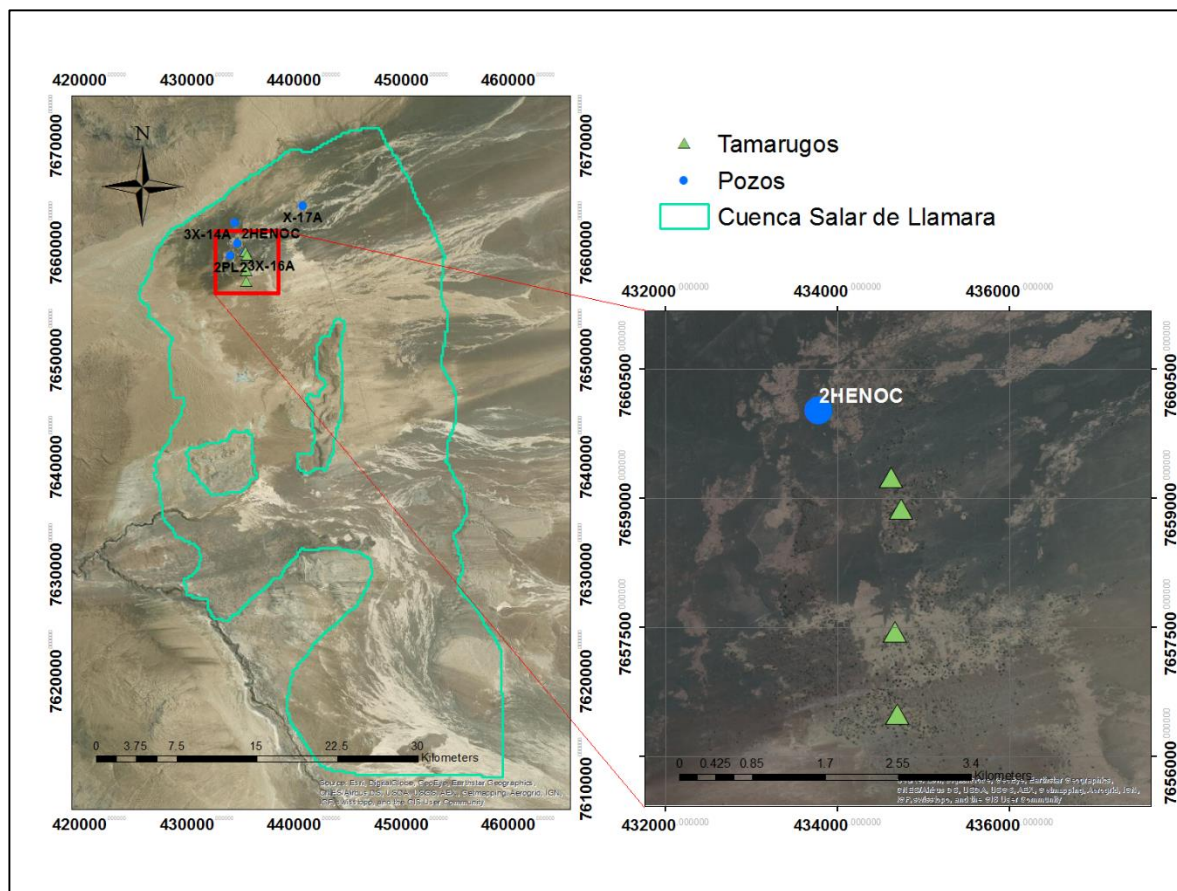


Figura 16. Ubicación de puntos de monitoreo con respecto al pozo de bombeo 2HENOC.

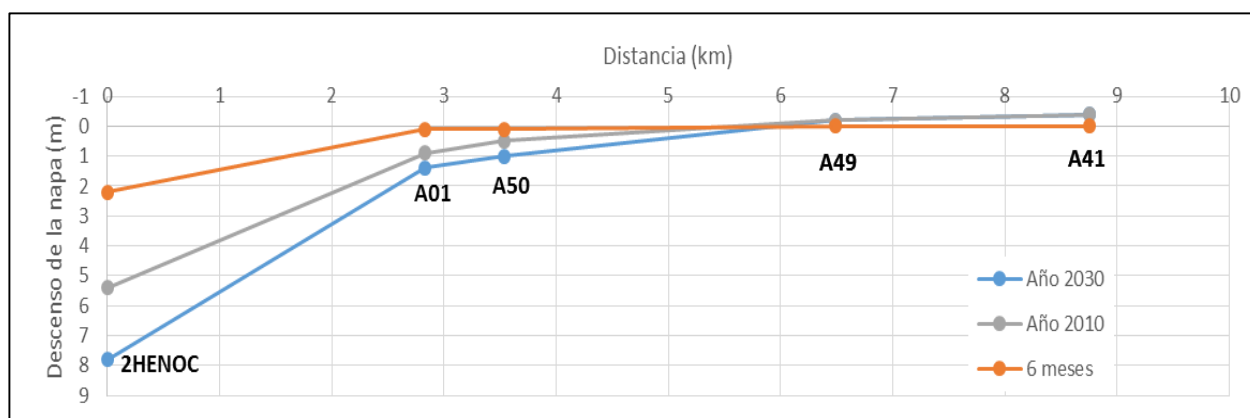


Figura 17. Descenso del nivel freático en pozo 2HENOC y en los puntos de monitoreo (simulación 1) y distancia de cada punto con respecto al pozo 2HENOC, para 6 meses iniciado el bombeo (naranja), en el año 2010 (gris) y en el año 2030 (azul).

4.3.2. Contenido de humedad

Mediante la incorporación del paquete HYDRUS fue posible simular la evolución del contenido de humedad del suelo. En la Figura 18 se presenta una comparación de los perfiles de humedad al inicio y final de la simulación 1 en los árboles A01, A41, A49 y A50. Los puntos A41 y A49 muestran un mayor grado de humedad a partir de los 0.5 m de profundidad en comparación a los puntos A01 y A50, que muestran el mismo grado de humedad (aproximadamente $0.25 \text{ m}^3/\text{m}^3$) a los 5 m de profundidad. Particularmente para los puntos A01 y A50, la diferencia del estado de humedad del suelo entre la situación inicial y final de cada uno no supera un valor de $0.05 \text{ m}^3/\text{m}^3$ hasta los 4 m de profundidad. Sin embargo, en el punto A01, a una profundidad de 6 m la diferencia en el estado de humedad del suelo entre la situación inicial y final es de $0.30 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Algo similar ocurre para el punto A50, donde inicialmente a una profundidad de 6 m el suelo se encuentra saturado ($0.45 \text{ m}^3/\text{m}^3$) y en la situación final presenta aproximadamente un valor de $0.20 \text{ m}^3/\text{m}^3$ de humedad, es decir disminuyó $0.25 \text{ m}^3/\text{m}^3$.

Estos resultados muestran un efecto de deshidratación del suelo que no se puede determinar solamente con la información de la profundidad del nivel freático. Esto se debe a la introducción de la zona vadosa al modelo. Según Acevedo et al. (2007) la deshidratación del suelo produce un déficit de agua que repercute negativamente sobre la fisiología del *P. tamarugo* debido al largo de las raíces de estos árboles. Por lo tanto, es un efecto a considerar en la estimación de la cantidad de agua disponible para el *P. tamarugo*.

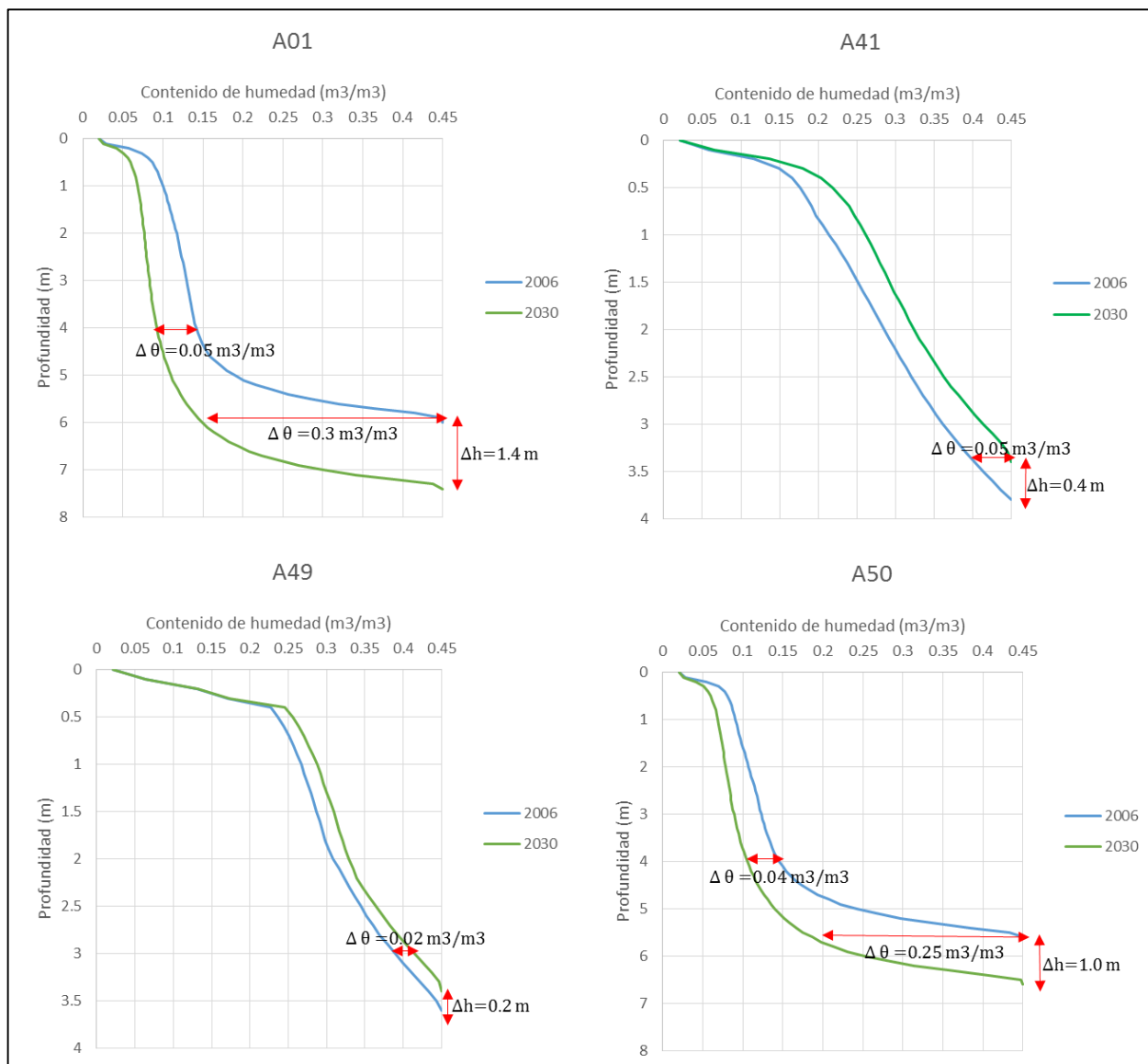


Figura 18. Comparación entre la situación inicial y final del contenido de humedad en los puntos de monitoreo del modelo en la simulación 1.

7 CONCLUSIONES

Los resultados de las simulaciones realizadas permitieron observar el impacto de la extracción de agua del acuífero. Se pudo notar el descenso de la napa tanto en el conjunto de pozos de bombeo como en los puntos de monitoreo del modelo. Se puede concluir que la extracción de agua desde los pozos de bombeo tiene un efecto negativo sobre el bosque de *P. tamarugo*, pues en los puntos de monitoreo A01 y A50 la napa sobrepasó el umbral de 6 m de profundidad de riesgo propuesto por Acevedo et al. (2015), con descensos de 7.4 y 7 m, respectivamente.

Si bien la profundidad de la napa se ha aceptado como un indicador del estado vital del *P. tamarugo*, según Acevedo et al. (2007) se debe tener consideración también la cantidad de agua disponible para estos árboles en la zona vadosa del suelo, debido a que las raíces en la mayoría de los ejemplares no alcanzan la napa. De los resultados de las simulaciones se pudo notar la deshidratación del suelo producto de la extracción de agua. Se observó que el descenso de la napa en los puntos A01 y A50 produjo cambios en el contenido de humedad a una misma profundidad de hasta $0.25 \text{ m}^3/\text{m}^3$, que con una humedad de saturación de $0.45 \text{ m}^3/\text{m}^3$ corresponde a una disminución del 55% del agua disponible para los árboles en ese sector a esa profundidad.

También fue posible relacionar los resultados obtenidos con otros estudios, como el de Decuyper et al (2016). Como se mencionó antes, se pudo observar que a pequeños descensos en el nivel de la napa el agua disponible para el *P. tamarugo* disminuye considerablemente. Este comportamiento es consistente con lo obtenido por Decuyper, donde aproximadamente la mitad de un bosque de *P. tamarugo*, expuesto a una baja depresión de la napa, presenta un mal estado vital.

Las herramientas utilizadas para construir el modelo numérico acoplado permitieron una interacción entre la zona saturada y vadosa. Esto permitió generar un modelo numérico más completo que los existentes para la zona de estudio hasta ahora, capaz de entregar mayor información con respecto al agua disponible para los árboles.

BIBLIOGRAFIA

Acevedo, E., Calderón, G., & Garrido, M. (2015). *Prosopis tamarugo Phil.*: a native tree from the Atacama Desert groundwater table depth thresholds for conservation. *Revista Chilena de Historia Natural*, 88 (18), 1-8.

Acevedo, E., Ortiz, M., Franck, N., & Sanguinetti, P. (2007). Relaciones hídricas de *Prosopis Tamarugo Phil.* Uso de isótopos estables. *Serie Ciencias Agronómicas*, 14, 3-39.

Barlow, P.M. & Harbaugh, A.W. (2006). USGS directions in MODFLOW development. *Ground Water*, 44 (6), 771–774.

Boletín N° 9903-12. (2014). Declara monumento natural la especie *Prosopis Tamarugo Phil.* Cámara de Diputados de Chile.

Burkart, A., (1976). A monograph of the genus *Prosopis* (Leguminosae subfam Mimosoideae), catalogue of the recognized species of *Prosopis*. *Journal of the Arnold Arbor*, 57, 219-249.

Chen, C., Eamus, D., Cleverly, J., Boulain, N., Cook, P., Zhang, L., Cheng, L., & Yu, Q. (2014). Modelling vegetation water-use and groundwater recharge as affected by climate variability in an arid-zone *Acacia* savanna woodland. *Journal of Hydrology*, 519, 1084-1096.

Corporación Nacional Forestal (CONAF) (2013). CONAF en las Áreas Silvestres Protegidas del Estado: Conservando la Flora y Fauna Amenazada. 150pp.

Cristi, F., Fierro, V., Suárez, F., Muñoz, J.F., Hausner, M.B. (2016). A TDR-waveform approach to estimate soil water content in electrically conductive soils. *Computers and Electronics in Agriculture*, 121, 160-168.

Decuyper, M., Chávez, R., Copini, P., & Sass-Klassen, U. (2016). A multi-scale approach to asses the effect of groundwater extraction on *Prosopis Tamarugo* in the Atacama Desert. *Journal of Arid Environments*, 131, 25-34.

DICTUC (2003). Estudio hidrogeológico del Salar de Llamara, I Región.

Dirección General de Aguas (DGA). (2007). Evaluación de la explotación máxima sustentable del acuífero de Huasco. Modelación hidrogeológica del valle del río Huasco. Departamento de Administración de Recursos Hídricos y Ministerio de Obras Públicas.

Doherty, J., Hunt, R., & Tonkin, M. (2010). Approaches to highly parameterized inversion: A guide to using PEST for model-parameter and predictive-uncertainty analysis: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report, 2010-5168, 8-12.

Ffolliott, P., & Thames, J. (1983). Manual sobre taxonomía de *Prosopis* en México, Perú y Chile. FAO Roma, 31p.

Fierro, V. (2015) Impacts of evaporation from saline soils on hydraulic properties and water fluxes. Pontificia Universidad Católica de Chile.

Furman, A., (2008). Modeling Coupled Surface–Subsurface Flow Processes: A Review. *Vadose Zone Journal*, 7, p.741.

Harbaugh, A., & McDonald, M. (1988). Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey. Chapter A1: A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. U.S. Geological Survey Open-File Report, 6, 8-9.

Harbaugh, A., Banta, E., Hill, M. & McDonald, M. (2000). MODFLOW-2000, The U.S. Geological Survey modular ground-water model – User guide to modularization concepts and the Ground-Water Flow Process: U.S. Geological Survey Open-File Report, 92, 121pp.

Hogan, J., Phillips, M., Scanlon, B. (2004) Groundwater recharge in a desert environment: The Southwestern United States. *Water Science and Applications*, 9, 279-281.

Johnson, C., Versteeg, R., Ward, A., & Reil, A. (2010). Improved hydrogeophysical characterization and monitoring through parallel modeling and inversion of time-domain resistivity and induced polarization data. *Geophysics*, 75 (4), 27–41.

Niswonger, R., Prudic, D., & Regan, R. (2006) Documentation of the Unsaturated-Zone Flow (UZFI) package for modeling unsaturated flow between the land surface and the water table with MODFLOW-2005. *Techniques and Methods*. USGS, 6-A19, 62pp.

PRAMAR, (2008). Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Pampa Hermosa. Soquimich S.A.

Rojas, R., Batelaan, O., Feyen, L., & Dassargues, A. (2010) Assessment of conceptual model uncertainty for the regional aquifer Pampa del Tamarugal – North Chile. *Hydrology and Earth System Science*, 14, 171-192.

Salas, J. (2000). Hidrología de zonas áridas y semiáridas. *Ingeniería Del Agua*, 7 (4), 409-429.

Salas, I., Herrera, C., Luque, J., Delgado, J., Urrutia, J., & Jordan, T. (2016). Recent climatic events controlling the hydrological and the aquifer dynamics at arid areas: The case of Huasco River watershed, northern Chile. *Science of the Total Environment*, 571, 178-180.

Seo, S., Simunek, J., & Poeter, E. (2007). Documentation of the HYDRUS package for MODFLOW-2000, the U.S. Geological Survey modular ground-water model. 98pp.

Seo, S., Simunek, J., Kumar, N., & Twarakavi, C. (2008). Evaluating interactions between groundwater and vadose zone using the HYDRUS-Based Flow Package for MODFLOW. *Vadose Zone Journal*, 7, 757-768.

Simunek, J., Van Genuchten, M., & Sejna, M. (2005). The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of wáter, heat, and multiple solutes in variably-saturated media, Version 3.0. HYDRUS Software. Department of Enviroment Science. Universidad de California.

Simunek, J., Van Genuchten, M., & Sejna, M. (2008). Development and applications of the HYDRUS and STANMOD software packages and revelated codes. *Vadose Zone Journal*, 7, 587-600.

Simunek, J., Van Genuchten, M., & Sejna, M. (2016). Recent development and applications of the HYDRUS computer software packages. *Vadose Zone Journal*.

Stromberg, J., Tiller, R., & Richter, B. (1996). Effects of groundwater decline on riparian vegetation of semiarid regions: the San Pedro Arizona. *Ecological Applications*, 6 (1), 113-131.

Sudzuki, F. (1969). Absorción foliar a humedad atmosférica en Tamarugo, *Prosopis tamarugo* Phil. Boletín Técnico Estación Experimental Agronómica Universidad de Chile, 30, 1-30.

Thoms, R., Johnson, R., & Healy, R. (2006) User's guide to the Variably Saturated Flow (VSF) process for MODFLOW. Techniques and Methods. USGS, 6-A18.

Van Genuchten, M. (1980). A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils 1. *Soil Science Society of America Journal*, 44, 892-898