



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**

**CAMBIOS EN LOS NIVELES DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SU
EFECTO SOBRE LA ZONA NO SATURADA Y LA VEGETACIÓN.
ENFOQUE CONCEPTUAL Y NUMÉRICO.**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL.

ALBERTO EDUARDO HENSELEIT INZUNZA

PROFESOR GUÍA: CARLOS ESPINOZA CONTRERAS.

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

RENÉ FIGUEROA LEIVA.

PAULO HERRERA RICCI.

SANTIAGO DE CHILE

ENERO DE 2014

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE:** Ingeniero Civil Mención Ingeniería
Hidráulica, Sanitaria y Ambiental.
POR: Alberto Eduardo Henseleit Inzunza.
FECHA: 13/01/2013
PROFESOR GUÍA: Carlos Espinoza Contreras.

**CAMBIOS EN LOS NIVELES DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SU
EFECTO SOBRE LA ZONA NO SATURADA Y LA VEGETACIÓN.
ENFOQUE CONCEPTUAL Y NUMÉRICO.**

El presente trabajo muestra el estudio conceptual realizado sobre cambios en el nivel freático, el impacto que esto tiene sobre la zona no saturada y la vegetación en la superficie. Además, se modeló numéricamente casos de estudio para los cuales se cuenta con la información necesaria y se concluyó a partir de los resultados obtenidos de este proceso.

En primer lugar, se hace una revisión conceptual de todos los aspectos involucrados en el desarrollo de la memoria, partiendo por la zona no saturada, pasando por la ecuación de Richards y el software HYDRUS entre otros temas, terminando con una exhaustiva revisión bibliográfica de los impactos sobre la vegetación de las variaciones del nivel freático.

Luego, se hace la formulación teórica del modelo numérico, su validación con casos de artículos académicos y una aplicación de éste a un caso real, para el cual se cuenta con la información.

Después, se modeló una situación con variaciones del nivel freático para ver cuál es la consecuencia en la zona no saturada y, con la información con la que se cuenta de las plantas del lugar modelado, ver el impacto de estas variaciones sobre las formaciones vegetales de la superficie.

Finalmente, se concluye a partir del trabajo realizado y los resultados generados con el modelo para los diferentes casos.

DEDICATORIA

A mis padres, Dominga y hermanos, los de sangre y los de la vida.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer desde el fondo de mi corazón a mis padres por su infinito cariño, preocupación y enseñanzas. Por su sacrificio y entrega total con el fin de entregarme la mejor educación posible. Sin ellos, no podría haber logrado lo que soy. Al mismo tiempo, quiero agradecer a mi familia: Maca, Ale, Cote, primos, tíos, la Meme, Abuelo. Los tengo siempre presentes.

Agradecer a la Domi, que ha hecho mi vida más feliz y plena desde que la conocí. Me apoyó cuando lo necesité y me aguantó las veces que me sentí sobrepasado. Te amo mucho.

A todos mis amigos, que son compañeros de vida y de ruta. Sin querer dejar a nadie afuera, necesito nombrar particularmente a los siguientes:

- Ale, Tomás, Agustín, Damián, Manuel, Benja, Coni, Julieta y Yuyo, a quienes considero mis hermanos y con quienes espero compartir todo lo que la vida nos tenga por delante.
- A la Pitu, Anto, Carmen, Dani, Feñita, Tote, Magda, Paulita, Negra, Meiko, Pau, Sofi, Vale, Felipe, por todos los momentos vividos y los por vivir. Los quiero en mi tren por el resto de mi vida.
- Al Negro Barrera, Chica, Titi, Mario, Pipe Vicuña, Joaquín, Cristóbal, Esteban, Piolín, Jano, Negra, Max, Vicho, Carvajal, Trini, Feña, Pedro Pablo y todos con los que compartí la magia y la vida en naturaleza en Manqueman. Lo que vivimos juntos, su compañía y amistad hicieron mi vida mucho, mucho más alegre.
- A Caichac, Tomás Trehwela, Negro Cotroneo, Chalo, la Dani, Checho, Chechero, Pancho Astorga, Cote, Pacheco y todos con quienes compartí en la gloriosa Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile. Tenerlos a mi lado en diferentes momentos de este largo camino lo hizo más fácil, más soportable, y definitivamente lo hizo más entretenido.

A Alejandra Mizala, que me empujó a la elegir la Universidad de Chile en momentos de duda.

A todos los profesores que tuve en mi vida. De todos aprendí un poco y me ayudaron a ser quien soy.

A los profesores Carlos Espinoza y René Figueroa, por darme la oportunidad de trabajar y aprender de ellos.

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
1.1	Introducción	1
1.2	Objetivos	1
2.	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1	Generalidades flujo en medios no saturados.....	3
2.2	Antecedentes Revisados.....	3
3.	ZONA NO SATURADA	5
3.1	Aspectos Técnicos.....	5
3.2	Ecuación de Richards	9
3.3	Curvas Características.....	11
3.4	HYDRUS 2D	12
3.4.1	Generalidades	12
3.4.2	Aspectos Técnicos del Software.....	13
3.5	Vegetación	15
4.	MODELO NUMÉRICO	17
4.1	Aspectos Generales	17
4.2	Formulación del Modelo Numérico	17
4.2.1	Nodos Interiores	18
4.2.2	Condiciones de Borde.....	19
4.3	Validación del Código Numérico	19
5.	APLICACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO A UN CASO REAL.....	23
5.1	Descripción Caso Estudio.....	23
5.1.1	Prueba en perfil 4.....	26
5.1.2	Modelación perfiles 1, 2 y 3	27
5.1.3	Aplicación a un caso con variaciones del nivel freático.	33
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	38
7.	BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS	40
8.	ANEXOS	43
	EFFECTOS DE CAMBIOS EN LOS NIVELES DE AGUA SOBRE LA VEGETACIÓN.....	43

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

La zona no saturada tiene un rol muy relevante en el consumo de agua subterránea por parte de la vegetación que rodea a un cauce superficial, o en las cercanías de los sectores de afloramiento en un acuífero somero. Este hecho tiene una incidencia directa en el consumo de agua asociado a una formación vegetacional, ante cambios en el nivel de saturación de un acuífero causado por bombeos prolongados o por la reducción de los niveles de agua en un cauce que actúa como fuente primaria de recarga (Nimmo, 2009).

En las últimas décadas, dado el gran desarrollo económico y el aumento de la población, la presión sobre las aguas subterráneas ha crecido notablemente. Esto ha traído aparejado la disminución en muchas partes del mundo de los niveles de agua subterránea, efecto particularmente fuerte en lugares con clima árido o semi-árido.

Esto ha llevado a que el interés en la investigación sobre los efectos que tienen las variaciones del nivel freático sobre la vegetación sea cada vez mayor. Si bien este tema se ha trabajado desde la década de 1920, sólo en los últimos 30 o 40 años es que ha aumentado la cantidad y la calidad de las investigaciones científicas dedicadas al tema (Stromberg et al (1996), Chen et al (2008), Zhao et al (2005), Wang et al (2011), Celia & Zarba (1990), Haverkamp & Vauclin (1979), entre otros). En paralelo al aumento de la investigación en China sobre el tema, ya que antes esta provenía casi en su totalidad desde Estados Unidos (debido al problema de desertificación que sufre el suroeste de ese país).

Considerando las características particulares de estos problemas, sobre todo las situaciones en las que no hay una gran variación de la humedad en el tiempo, se pretende desarrollar una herramienta numérica que sea aplicable a casos de este tipo, trabajando con un caso de estudio para el cual se cuenta con la información necesaria (recopilada como parte de un proyecto real). Además, se hará un análisis del funcionamiento del software comercial HYDRUS 2D, plataforma cuyo uso es muy extendido en situaciones como ésta. También se utilizarán los resultados obtenidos en este programa para validar un modelo numérico propio que se desarrollará para modelar la situación planteada, ya que por tratarse de un programa ampliamente utilizado, sus resultados se aceptarán como válidos.

La idea de este trabajo es ver la factibilidad de que una herramienta numérica simple pueda modelar correctamente los casos anteriormente mencionados, sin sobredimensionar los cálculos ni gastar tiempo de más como sucede con HYDRUS 2D.

1.2 Objetivos

Los objetivos del presente Trabajo de Título son los siguientes:

Objetivo General: Estudiar y comprender, desde el punto de vista conceptual, el rol que tienen los cambios en los niveles de agua en un acuífero saturado sobre la zona no saturada, desarrollando además una herramienta numérica que aplique a un caso de estudio.

Objetivos Específicos:

- Revisar la bibliografía disponible tanto sobre comportamiento hidráulico de la zona no saturada, como de la demanda de las plantas y cambios en los niveles de agua.
- Revisión del software comercial HYDRUS 2D, ampliamente utilizado en la modelación de problemas de este tipo.
- Establecer claramente el problema de relación entre zona no saturada, cambios en nivel de aguas y formaciones vegetacionales, así como las variables relevantes y los parámetros asociados.
- Desarrollo, implementación y validación de un modelo numérico propio 1D que se aplique a un caso de estudio, considerando las características propias de éste.
- Analizar numéricamente el problema, mediante el modelo desarrollado, de manera de obtener rangos para los parámetros (conductividad hidráulica no saturada, nivel freático, curvas características, entre otros) y ver cómo inciden sobre las variables de estado (perfil de humedad de un suelo, componentes del balance hídrico de un suelo, entre otros).
- Generar un set de recomendaciones que puedan ser aplicados a problemas similares, además de un análisis de sensibilidad de los diferentes parámetros mencionados anteriormente, para determinar la importancia relativa entre las diferentes variables.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 Generalidades flujo en medios no saturados

Actualmente, dado el nivel de desarrollo que ha alcanzado Chile, se dan dos situaciones contrapuestas. Por un lado, se tienen cada vez más proyectos de inversión que involucran miles de millones de dólares, y por el otro, se ha asentado fuertemente una conciencia medioambiental en la población que le exige a las empresas que quieran invertir una preocupación cada vez mayor por el impacto que causarán sus actividades. Dentro de esto, uno de los aspectos más fundamentales, y que con el tiempo sólo se hará más crítico, es el del agua.

Son muchos los procesos industriales que requieren grandes cantidades de aguas, particularmente los mineros. Esto ha llevado a que las empresas busquen todas las maneras posibles de obtenerla, desde ríos, lagos y el mar (mediante procesos de desalinización) hasta aguas subterráneas, extrayéndola con pozos. Todas estas formas de obtención del agua generan problemas con comunidades cercanas, pero este trabajo está enfocado en las aguas subterráneas, que es donde la zona no saturada juega un rol fundamental.

2.2 Antecedentes Revisados

Para comenzar, se ha realizado una revisión bibliográfica consultando varios documentos relacionados con el tema, y que han ayudado a comprender de mejor manera el problema y las variables involucradas.

En primer lugar, se revisó el libro *Unsaturated Zone Hydrology*, (Tindall & Kinkel, 1999). Este libro fue publicado por el United States Geological Survey, y es un texto de referencia que permite una buena introducción al tema de flujos en medios no saturados.

El artículo *Vadose Water*, (Nimmo, 2009) es otro texto introductorio al tema del estudio, básicamente en lo que se refiere a la comprensión de la zona no saturada de los suelos. Nimmo es un investigador recurrente del tema en la USGS, ha escrito numerosos artículos de investigación, por lo que el artículo también es muy ilustrativo y claro en los conceptos.

Se visitó la página del USGS, como también la de Soil Science of America, organismos estadounidenses que tienen departamentos o áreas dedicadas exclusivamente al trabajo en la zona no saturada, por lo que cuentan con una serie de artículos y publicaciones en que se explican los diferentes procesos que se llevan a cabo en ésta.

Los Apuntes de Clases del curso “Hidráulica de Aguas Subterráneas y su Aprovechamiento” dictado por el profesor Carlos Espinoza en la FCFM de la Universidad de Chile, además de los del curso “Ciencias de la Tierra”, Unidad de “Flujo en Medios Porosos No Saturados en Infiltración” de Javier Diez (Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires) fueron también revisados para esta parte del trabajo.

Finalmente, adentrándose un poco más en el tema principal del presente trabajo de título, en cuanto a sus aplicaciones se revisó el paper “The Application of Ecohydrological Groundwater Indicators to Hydrogeological Conceptual Models” de Jeff Lewis, el cual investigó cómo se utilizan diferentes plantas como indicadores para, estudiando su forma y crecimiento, estimar la presencia de aguas subterráneas, la cercanía a la superficie del nivel freático, la calidad de agua,

etc. Y en cuanto a cómo modelar los procesos involucrados, se revisó la memoria de la Universidad de Chile “Modelación Numérica de la Generación de Líquidos Lixiviados en una Columna de Residuos Sólidos Domésticos” de Manuel Merino, en la cual se hace un análisis y explicación exhaustiva de las ecuaciones que rigen y cómo se pueden modelar computacionalmente.

3. ZONA NO SATURADA

3.1 Aspectos Técnicos

La zona no saturada comúnmente se define extendida entre la superficie del suelo y el nivel freático del agua o comienzo de la zona saturada. La zona no saturada tiene una importancia crucial en el transporte de agua y compuestos químicos (Tindall, 1999). De esta forma, la predicción de las tasas de transporte de agua y otras sustancias a través de la zona no saturada es crítica para la infiltración, escorrentía, erosión, crecimiento de las plantas, microbiota, transporte de contaminantes, recarga de acuíferos y descarga a aguas subterráneas. Además, el estudio de la zona no saturada es particularmente compleja dada la no-linealidad y la histéresis de las propiedades hidráulicas no-saturadas (Nimmo, 2009).

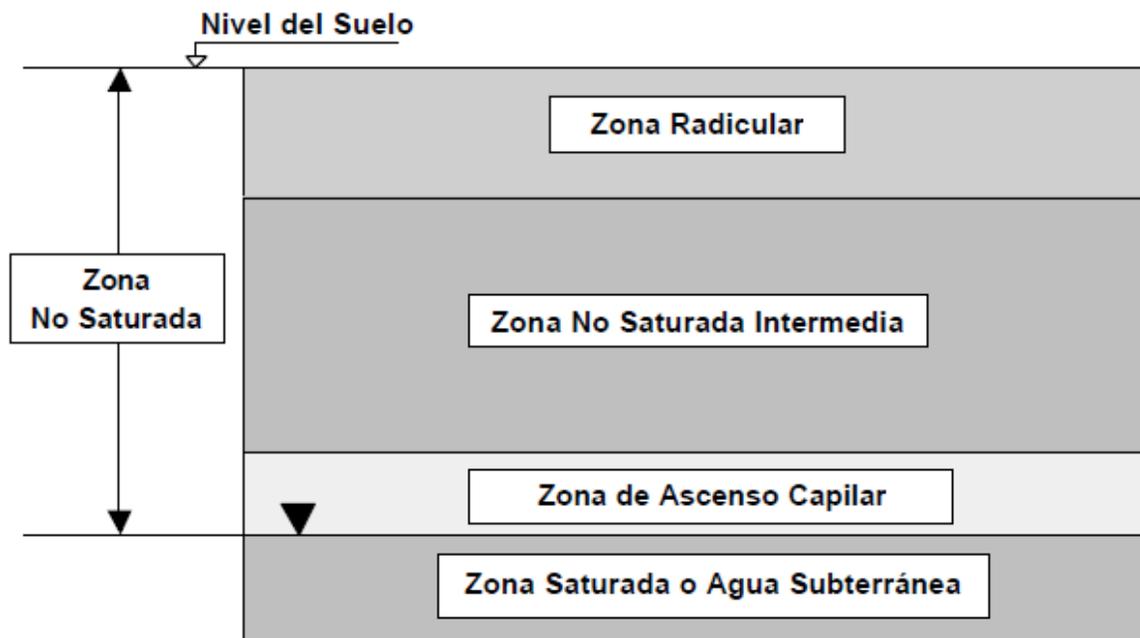
Directamente relacionado con esto último, se tiene que la zona no saturada también tiene gran importancia en lo referido al comportamiento de las plantas y formaciones vegetacionales que puede haber en la superficie, y es en este punto específico al cual está enfocado este trabajo. Durante muchos años, en el país se ha trabajado con el concepto de que existe una disminución máxima del nivel de agua subterránea (nivel freático afectado por bombeo), de manera tal que las plantas de la superficie (por ejemplo, humedales y bofedales) no se vean afectadas. Este problema tiene larga data, por lo que se hizo necesario establecer parámetros con algún grado de certeza que permitiese a los proyectos definir sus límites y compensaciones de acuerdo a éste. El año 1996, en el “Estudio de la Respuesta al Stress Hídrico de las Plantas del Sector Sur del Salar de Atacama” se estableció, después de analizar las respuestas de un set de diferentes tipos de plantas frente a cambios en el nivel freático, que “en general, las plantas estudiadas en el sector sur del Salar de Atacama, podrían soportar una disminución en el nivel de la napa freática de alrededor de 25 cm, sin que esto implique extinción local de las poblaciones”. De esta manera, quedó establecido un acuerdo semi-formal o informal de 25 cm de máxima variación en el nivel freático en estas zonas sensibles. Así, los proyectos establecían formas de extracción y compensaciones de manera de cumplir con este criterio.

Con el tiempo y el desarrollo de la tecnología, se ha avanzado lentamente en este tema. Se ha visto que, por ejemplo, hay formaciones vegetacionales que toleran cambios mucho mayores a los 25 cm establecidos. Depende en gran parte del tipo de plantas y del largo de las raíces. Así, algunos tipos de plantas que tienen su hábitat en zonas desérticas tienen raíces que llegan a decenas de metros. De esta forma, cambios menores en la cota de agua no generan grandes cambios en su metabolismo, ya que el proceso de obtención de agua no cambiará por una variación de 10 a 20 cm en el nivel freático. Por otro lado, plantas que tengan raíces de longitudes menores son más sensibles a variaciones del nivel de agua, por lo que pequeños cambios en éste causan su desaparición, que disminuyan drásticamente su tamaño u otros efectos (color, brillo, etc). Tal es la importancia del comportamiento de plantas debido a cambios en la cota piezométrica, que actualmente se trabaja en usarlas como Indicadores Ecohidrológicos de Aguas Subterráneas, aunque esta es un área de desarrollo aún incipiente (Lewis, 2012). Son plantas cuya presencia o morfología entregan información sobre la hidrogeología: profundidad absoluta al nivel de aguas, patrones de fluctuación del agua subterránea y mineralización del acuífero, aunque se debe dejar claro que esto no funciona para cualquier tipo de suelos (sobre todo suelos no áridos), y que es un complemento que puede ser útil para la hidrogeología en ciertas circunstancias (Lewis, 2012).

Ha habido proyectos con dificultades en la obtención de agua por las exigencias para la extracción de agua, las cuales muchas veces se basan en este acuerdo semi formal del descenso máximo de 25 cm. Por esto es tan relevante poder generar información y algún modelo de comportamiento que efectivamente considere el efecto de la zona no saturada en la disponibilidad de agua desde el suelo, y que sea un elemento confiable de análisis a la hora de tomar decisiones sobre extracción de aguas subterráneas y el efecto que esto tendrá en las plantas que están en la superficie.

Considerando los elementos anteriormente descritos, este trabajo de título intentará, en primer lugar, entregar información sobre el rol que juega la zona no saturada siendo el eslabón que une a las plantas de las superficies con los cambios en el nivel piezométrico del agua subterránea. Algunas variables de estado que permitirían analizar los cambios en esta zona son la presión, el volumen y la temperatura, mientras que fenómenos del suelo tales como flujo capilar, absorción e interacciones químicas, entre otros, son dependientes de las variables de estado antes mencionadas (Tindall, 1999). Dentro de la denominada zona no saturada se tienen 3 sub-zonas: zona radicular o de raíces, zona no saturada intermedia, y la zona de ascenso capilar (Espinoza, 2005). En la Figura 3.1 se muestran las sub-zonas indicadas:

Figura 3.1: Subcapas Zona No Saturada de un suelo.



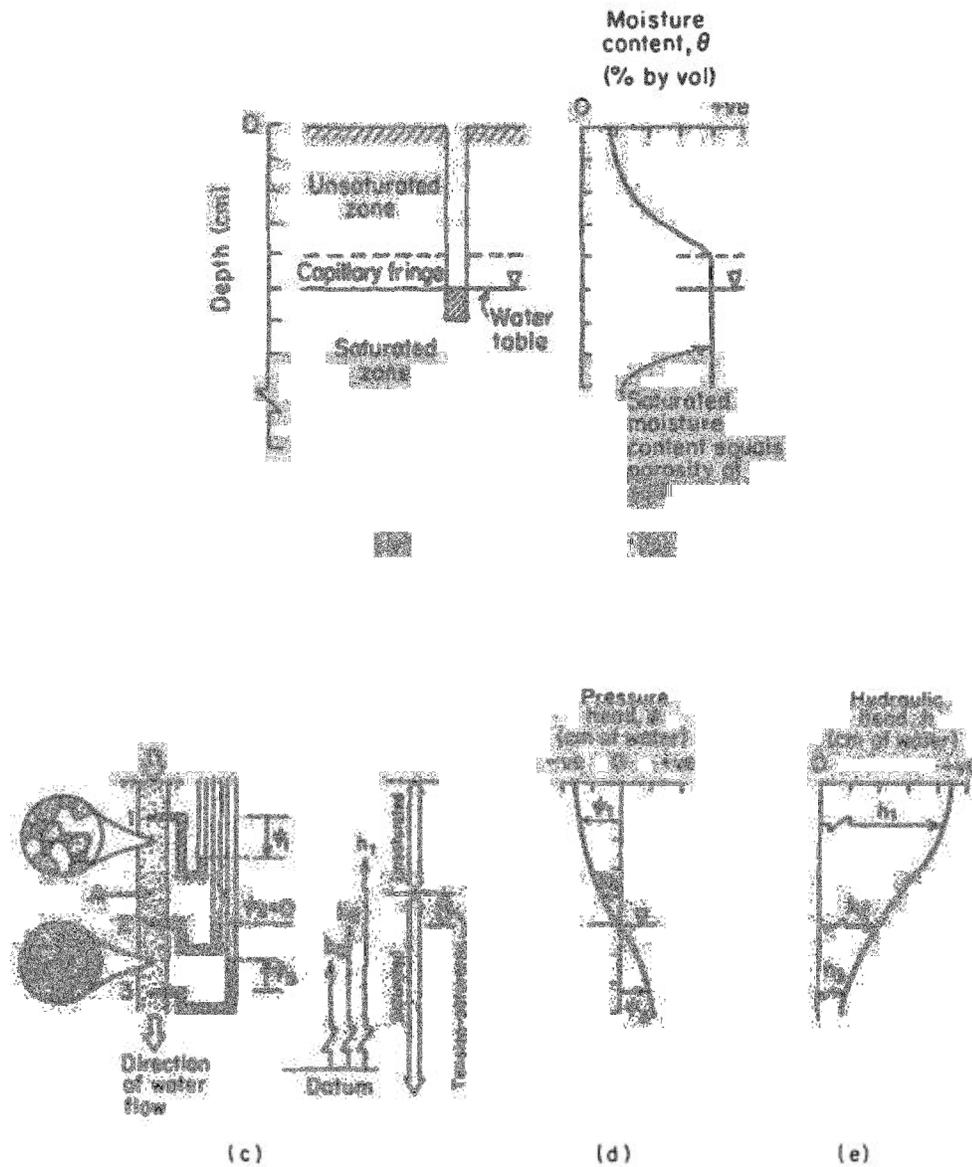
Fuente: Espinoza 2005.

Hay 2 conceptos que son particularmente importantes. Primero, el contenido de humedad volumétrica θ , que se define como el volumen ocupado por agua V_W dividido por el volumen total V_T de una porción de suelo o roca:

$$\theta = \frac{V_W}{V_T}$$

En segundo lugar, también es importante definir la altura de presión h o ψ . Ésta es mayor que cero en la zona saturada, igual a cero en el nivel freático y es menor a cero en la zona no saturada del suelo. Esto se debe a que el agua es mantenida en los poros del suelo mediante la fuerza de succión que genera la tensión superficial. Luego, mientras menos agua haya en los poros, mayor es la succión que debe generarse para poder mantenerla dentro de éstos (Espinoza, 2005). Lo descrito anteriormente se muestra a continuación en la Figura 3.2:

Figura 3.2: Condiciones del agua subterránea cerca de la superficie del suelo (a) Zonas saturada y no saturada; (b) Perfiles del contenido de humedad versus profundidad; (c) Presión y cota piezométrica en distintas profundidades; (d) Perfil de presión versus profundidad; (e) Perfil de cota piezométrica versus profundidad.



Fuente: Freeze et al, 1979.

3.2 Ecuación de Richards

El flujo en medios no saturados está gobernado por la ecuación de Richards, derivada en 1931. Esta ecuación se obtiene a partir de una conservación del flujo en un volumen elemental representativo. Así, el flujo de agua que ingresa durante un intervalo de tiempo infinitesimal Δt debe ser igual al que sale más el cambio en el agua almacenada en el volumen más posibles efectos de succión o de fuentes (Radcliffe & Simunek, 2010). La ecuación resultante es la siguiente:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial J_w}{\partial z} - S(h) \quad (3.1)$$

, donde Θ : contenido volumétrico de humedad [-];
 t: tiempo [T];
 z: coordenada espacial [L];
 J_w : densidad de flujo volumétrico [LS^{-1}];
 $S(h)$: función de succión o fuente [T^{-1}].

Por otro lado, se tiene la ecuación de Darcy-Buckingham (1907) para flujos no saturados:

$$J_w = -K \cdot \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \quad (3.2)$$

, donde h: succión [L].

Reemplazando esta definición en la ecuación de conservación, se obtiene la ecuación de Richards:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial h}{\partial z} \right) + \frac{\partial K}{\partial z} \quad (3.3)$$

Esta ecuación a derivadas parciales es la que gobierna el flujo en medios no saturados. En este caso se trabajará sin la función $S(h)$, ya que los cambios en el nivel freático se deben a una situación ajena a la vegetación o al suelo mismo, por lo que no se usará este término.

La ecuación (3.3) es la llamada *forma mixta* de la ecuación de Richards. Esto, porque aparecen 2 variables dependientes: Θ y h . El primer término de la derecha da cuenta del efecto de la capilaridad en el flujo de agua, mientras que el segundo término de la derecha explica el efecto gravitatorio en el movimiento del agua.

La ecuación de Richards puede ser presentada de varias maneras. Por ejemplo, si se hace regla de la cadena en el término de la variación temporal de la humedad (a la izquierda de la ecuación):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial \theta}{\partial h} \cdot \frac{\partial h}{\partial t} = C(h) \cdot \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3.4)$$

En consecuencia, la ecuación de Richards queda como sigue (*forma basada en h*):

$$C(h) \cdot \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial h}{\partial z} \right) + \frac{\partial K}{\partial z} \quad (3.5)$$

donde $C(h)$ es la capacidad específica del suelo [L^{-1}].

La ecuación (3.5) es la *forma basada en h* de la ecuación de Richards.

Por último, la ecuación también puede presentarse en la *forma basada en Θ* :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + \frac{\partial K}{\partial z} \quad (3.6)$$

donde $D(\Theta) = K(\Theta)/C(\Theta)$ es la difusividad no saturada [L^2T^{-1}].

Cada una de estas formas de la ecuación de Richards tiene ventajas y desventajas. La modelación numérica basada en las diferentes formas puede llevar a resultados significativamente diferentes para el flujo en medios no saturados. La solución basada en h tiene la ventaja de que este último es continuo, lo que facilita de gran manera el trabajo de modelación. Es por esto que la forma basada en h de la ecuación ha sido usada ampliamente.

Por otro lado, la modelación numérica basada en esta última forma de la ecuación tiene grandes problemas de balance de masa y estimaciones incorrectas de la profundidad de infiltración. Esto se debe a que si bien $\frac{\partial \theta}{\partial t}$ y $C(h) \cdot \frac{\partial h}{\partial t}$ son matemáticamente equivalentes (bajo ciertas condiciones), su análogo discreto no lo es (Celia & Zarba, 1990).

La forma basada en Θ posee un balance de masas perfecto, pero debido a las discontinuidades en los perfiles de suelo, que implican discontinuidades en los perfiles de humedad, se prefiere no trabajar con ella para problemas generales de flujo de aguas subterráneas.

Por último, la forma mixta de la ecuación de Richards ha mostrado cumplir con la conservación de masa, lo que lleva a una mejora significativa en el desempeño de la solución numérica. Además, no requiere un uso computacional mayor para los cálculos a realizar (Celia & Zarba, 1990).

Con respecto a las condiciones iniciales, éstas pueden ser de altura de presión o de humedad. La altura de presión es forzante del flujo de agua, por lo que generalmente se recomienda usarla como condición inicial (Radcliffe & Simunek, 2010).

Las condiciones de borde del sistema pueden ser de 2 tipos:

- Independiente del sistema: cuando se conoce la presión en el borde, se tiene una condición de borde de *Dirichlet* o *tipo-1*. Por otro lado, si se conoce el flujo de agua a través de un borde, entonces se dice que es una condición de borde de *Neumann* o *tipo-2*.
- Dependiente del sistema: la altura de presión ni el flujo se conocen, por lo que deben ser calculados a partir de las interacciones propias del sistema.

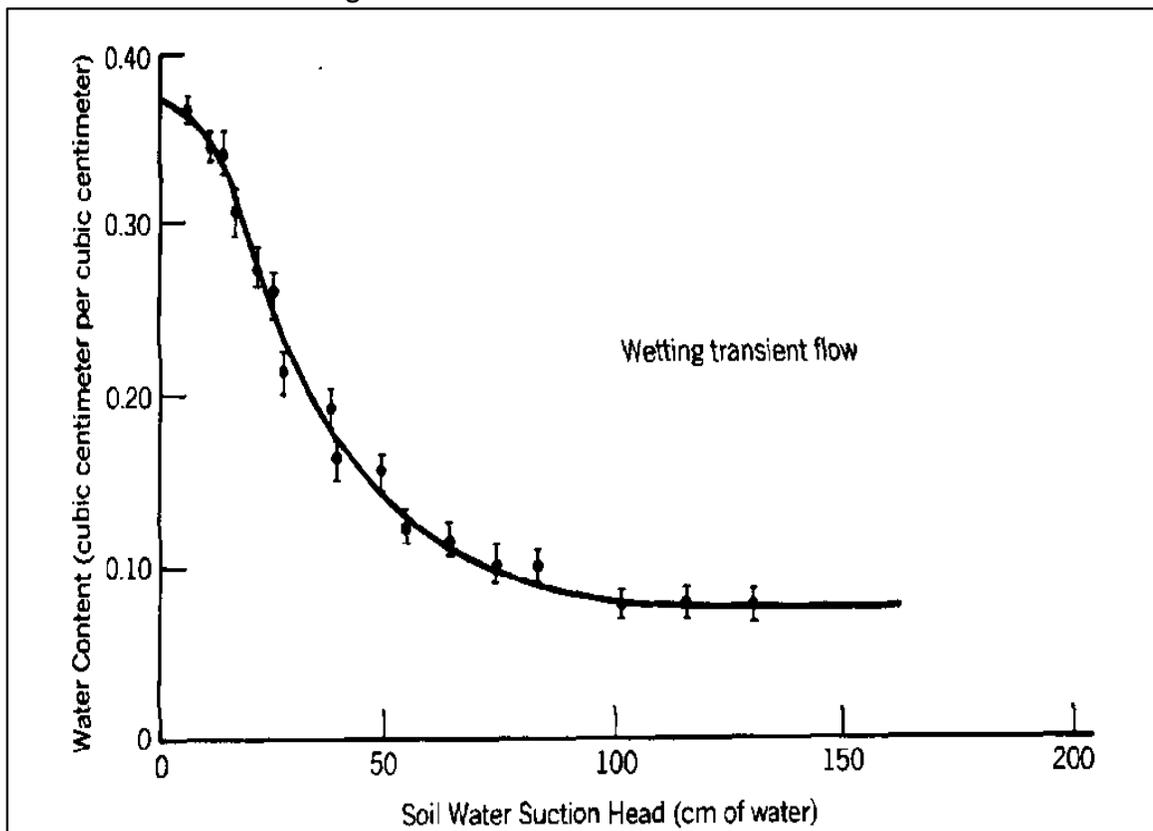
3.3 Curvas Características

En la zona no saturada, el contenido de humedad Θ y la conductividad hidráulica K dependen de la altura de presión h . Así, para la caracterización de un suelo se requiere determinar las relaciones funcionales $\Theta(h)$ (curva característica de un suelo) y $K(h)$ (conductividad hidráulica). Ambas curvas presentan histéresis, es decir, el comportamiento es distinto dependiendo de si el suelo está vaciándose o llenándose de agua.

Curva Característica de un suelo $\Theta(h)$:

Describe la capacidad del suelo de almacenar y liberar agua. Corresponde a la relación entre el volumen de agua en el suelo con la succión presente en éste. En la Figura 3.3 se presenta un esquema genérico de esto último:

Figura 3.3: Curva Característica de un suelo.



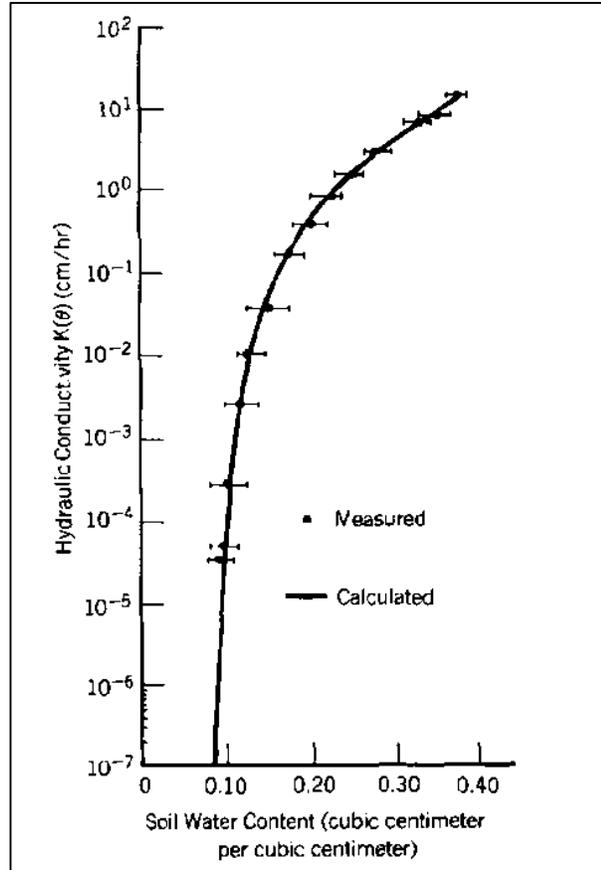
Fuente: Espinoza 2005.

Hay una gran variedad de formas matemáticas para representar la forma de la curva de retención anterior, como las de van Genuchten y Brooks & Corey, las cuales se presentan en la sección siguiente.

Curva de Conductividad Hidráulica en función de la Presión Interna, $K(h)$:

La conductividad hidráulica es una medida de la capacidad de un suelo de transmitir agua y depende tanto de las características del suelo como del fluido. Se presenta un esquema de lo anterior en la Figura 3.4:

Figura 3.4: Curva Conductividad Hidráulica en función de la presión interna.



Fuente: Espinoza 2005.

Algunas de las distintas formas funcionales de la curva anterior también se presentan en la sección siguiente.

3.4 HYDRUS 2D

3.4.1 Generalidades

HYDRUS 2D es un software desarrollado en ambiente Windows. Es capaz de modelar el flujo a través de medios porosos no saturados o parcialmente saturados. Fue desarrollado por J. Simunek, K. Huang, M. Sejna y M. Th. van Genuchten del U.S. Salinity Laboratory en Riverside, California (Simunek et al, 1999).

Es un modelo de elementos finitos que simula flujos de agua, calor y diversas sustancias a través de medios porosos parcialmente saturados. El software resuelve numéricamente la ecuación de Richards para el flujo de agua en medios no saturados, y la ecuación de Advección - Dispersión de Fick para el transporte de calor y compuestos.

El modo de resolución de las ecuaciones de flujo es mediante el método Galerkin de elementos finitos aplicado a una malla de elementos triangulares con integración en el tiempo realizada mediante un método implícito de diferencias finitas. Las mallas pueden ser rectangulares, o generales si se adquiere el paquete MeshGen2D.

3.4.2 Aspectos Técnicos del Software

La forma de la ecuación de Richards utilizada por HYDRUS 2D para la resolución del flujo en medio parcialmente saturado es la 3.3.

Para poder resolver la ecuación de Richards, se necesitan las propiedades hidráulicas del suelo no saturado, $\theta(h)$ y $K(h)$. Estas son, por lo general, funciones altamente no lineales de la altura de presión o succión. HYDRUS 2D permite el uso de tres diferentes formas analíticas para las propiedades hidráulicas: *Brooks y Corey* (1964); *van Genuchten* (1980); y *Vogel y Císlerová* (1988). El software también incluye el efecto de histéresis utilizando los modelos empíricos de *Scott et al* (1983); y el de *Kool y Parker* (1987).

Las funciones de las curvas de retención de agua, $\theta(h)$, y la de conductividad hidráulica, $K(h)$, según *Brooks y Corey* (1964) están dadas por:

$$\theta(h) = \begin{cases} |\alpha h|^{-n} & h < -1/\alpha \\ 1 & h \geq -1/\alpha \end{cases}$$

$$K(h) = K_s \cdot S_e^{2/n+l+2}$$

respectivamente, donde S_e es el contenido efectivo de agua,

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$$

donde θ_r y θ_s corresponden a la humedad residual y saturada, respectivamente; K_s es la conductividad hidráulica saturada, α es el inverso del valor de entrada del aire (*bubbling pressure*), n es un índice de distribución del tamaño de poros, y l es un parámetro de conectividad de poros asumido igual a 2 en el estudio original de Brooks y Corey. Los parámetros α , n y l en HYDRUS 2D son considerados coeficientes meramente empíricos que afectan la forma de las funciones hidráulicas.

HYDRUS 2D también implementa las funciones hidráulicas del suelo de *van Genuchten* (1980), quien usó el modelo de distribución estadística para el tamaño de los poros de *Mualem* (1976) para obtener una ecuación de la conductividad hidráulica no saturada en términos de parámetros de la retención de agua del suelo. Las expresiones de *van Genuchten* están dadas por:

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

$$K(h) = K_s \cdot S_e^l \cdot (1 - (1 - S_e^{1/m})^m)^2$$

donde

$$m = 1 - \frac{1}{n}, \quad n > 1$$

Las ecuaciones anteriores contienen 5 parámetros independientes: θ_r , θ_s , α , n y K_s . El parámetro de conectividad de poros l en la función de conductividad hidráulica fue estimado por Mualem (1976) en alrededor de 0,5 para la mayoría de los suelos.

Un tercer set de ecuaciones hidráulicas implementadas en HYDRUS 2D son las de *Vogel y Císlerová* (1988), quienes modificaron las ecuaciones de van Genuchten para darle flexibilidad a la descripción de las propiedades hidráulicas cerca de la saturación. Las ecuaciones para $\theta(h)$ y $K(h)$ en este caso son:

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_a + \frac{\theta_m - \theta_a}{(1 + |\alpha h|^n)^m} & h < h_s \\ \theta_s & h \geq h_s \end{cases}$$

$$K(h) = \begin{cases} K_s \cdot K_r(h) & h \leq h_k \\ K_k + \frac{(h - h_k) \cdot (K_s - K_k)}{h_s - h_k} & h_k < h < h_s \\ K_s & h \geq h_s \end{cases}$$

respectivamente, donde

$$K_r = \frac{K_k}{K_s} \cdot \left(\frac{S_e}{S_{ek}}\right)^l \cdot \left[\frac{F(\theta_r) - F(\theta)}{F(\theta_r) - F(\theta_k)}\right]$$

$$F(\theta) = \left[1 - \left(\frac{\theta - \theta_a}{\theta_m - \theta_a}\right)^{1/m}\right]^m$$

$$S_{ek} = \frac{\theta_k - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$$

En las ecuaciones anteriores se agregan términos para aumentar la flexibilidad de las expresiones analíticas. No se profundizará en esta sección, sólo se remarca que si $\theta_a = \theta_r$, $\theta_m = \theta_s$ y $K_k = K_s$, las funciones hidráulicas antes descritas se reducen a las de van Genuchten.

3.5 Vegetación

El tema de la vegetación y el impacto que tienen sobre esta las variaciones del nivel freático es una parte importante del presente Trabajo de Título. Así, se realizó una extensa revisión bibliográfica la que se encuentra completa en los Anexos. A continuación, se presenta una síntesis con lo más relevante para el desarrollo de este trabajo.

La relación entre el agua subterránea y sus variaciones y la vegetación en la superficie no es un tema nuevo. Meinzer (1927) define por primera vez conceptos importantes, como xerófitas, freatofitas, y la evidencia de que ciertos tipos de planta se adaptan para poder obtener el agua subterránea. Bryan (1928) trabaja el mismo tema, pero para explicar el proceso de formación y ensanchamiento de cursos de agua (“*arroyo-cutting*”) y el consecuente impacto en la vegetación que ha tenido tal proceso en particular en el suroeste de EE.UU.

En cuanto a la investigación y estudio del efecto de variaciones en el nivel del agua subterránea, la investigación es más reciente y cada vez más cuantiosa.

Stromberg et al (1996) señala que las bajas en los niveles de agua subterránea y el secado de cursos de agua han contribuido a la pérdida y alteración de ecosistemas húmedos y ribereños en todo el mundo. Esto es particularmente cierto en regiones áridas y semiáridas, dado que la superficie y el agua subterránea tienen una gran demanda para uso humano y también ejercen una fuerte influencia en la abundancia y composición de la vegetación ribereña.

Zhao et al (2005) establece que la relación acoplada entre cambios en la vegetación y profundidad del agua subterránea es importante en zonas áridas. Al disminuir la disponibilidad del agua superficial, el crecimiento de las plantas pasa a depender de la precipitación y del agua subterránea en las cuencas de ríos continentales. Detalla las dificultades que presenta la modelación de esta relación (gran cantidad de datos regionales, cálculos numéricos complejos), así como también el impacto que ha tenido la sobreexplotación en las cuencas de ríos continentales.

En el mismo sentido, Zhuang et al (2005) sostiene que en regiones áridas y semi-áridas el agua es el factor más limitante para el asentamiento y crecimiento de las plantas, su fisiología, entre otros. También se señala que entender la respuesta de las plantas es fundamental para el manejo efectivo de ecosistemas bajo condiciones de cambio climático y creciente actividad antropogénica. Chen et al (2008) describe el efecto que tuvo sobre la vegetación un proyecto de traspaso de agua de un río a otro en el aumento del nivel freático y el que esto tuvo, a su vez, en la vegetación, cambiando su composición, tipo, distribución y comportamiento de crecimiento.

A una conclusión similar llega Wang et al (2011), donde además se pone énfasis en el efecto que tiene el aumento de la salinidad y como esto podría neutralizar el del aumento del nivel freático.

Por otro lado, Naumburg et al (2005) señala que en los lugares donde hay aguas subterráneas someras mantienen una densidad mayor de vegetación que en áreas con niveles freáticos más profundos, aportando aguas adicionales para el crecimiento y transpiración de las plantas. Remarca que si bien es ampliamente reconocido que un aumento en la profundidad del agua subterránea puede ser perjudicial para la vegetación, no lo es tanto el hecho de que un aumento del nivel freático también puede ser perjudicial.

Ahora, se quiere ahondar en la experiencia chilena enfrentando el problema de la variación del nivel freático y del impacto que esto tiene en la vegetación, en especial en el trato que se ha tenido con proyectos que están precisamente en zonas de clima árido o semi-árido en que el agua subterránea juega un rol crucial de abastecimiento para ellos.

Primero, se tiene el Plan de Alerta Temprana (PAT) del proyecto Tilopozo, del año 2001. Este extrae el agua del acuífero Monturaqui – Negrillar – Tilopozo, el cual se ubica en el extremo sur de la cuenca del salar de Atacama, en la región de Antofagasta, y tiene un aporte subterráneo hacia el salar. En el referido PAT se establece que los derechos constituidos podrán ser explotados siempre que “los impactos generados durante la fase de bombeo y post-bombeo producto de la explotación de la unidad acuífera denominada Monturaqui – Negrillar – Tilopozo, no generen una disminución de más allá de 25 cm del nivel freático en el sector de Tilopozo”. También se establecen otras condiciones, como que la explotación no disminuya en más de 6% el flujo pasante a través del acuífero y que en el ejercicio de los derechos no podrá extraerse un caudal medio mensual superior a 1800 l/s.

Luego, en la Resolución de Calificación Ambiental del proyecto Mansa Mina (hoy Ministro Hales) de Codelco, del año 2005, se señala que en el sector de Laguna Los Patos (laguna artificial cerca de Calama) el descenso máximo del nivel freático será de 25 cm. Se establece que en este sector, el nivel de las aguas subterráneas se encuentra entre 5 y 10 m bajo la superficie del terreno, por lo que “existe un riesgo de pérdida de un hábitat de importancia en el área.

Por otro lado, en la RCA de Pampa Puno también se establece un criterio con respecto al descenso del nivel freático. Así, “el descenso de aguas subterráneas” no podrá “superar los 50 metros de depresión del acuífero en el sector de los pozos de explotación”, como tampoco podrá superar “5 metros de descenso en los pozos Yocas”.

En fin, está la “Guía para la Conservación y Seguimiento Ambiental de Humedales Andinos” elaborada por el Ministerio del Medio Ambiente. Se señala que las actividades humanas influyen directa e indirectamente sobre los ecosistemas. También, que los humedales altoandinos son ecosistemas frágiles, escasos y con un endemismo relevante. En ese sentido, uno de los referentes ambientales importantes para la vegetación hidrófila de bofedales y vegas es el nivel freático. Se establece que un nivel freático entre 1 y 1,5 metros de profundidad constituye un umbral máximo. Niveles freáticos bajo 1,5 m provocan el “colgamiento” de la vegetación hidrófila, desconectando la vegetación de los recursos hídricos subterráneos. Los umbrales señalados deben ser calibrados para cada humedal en particular en función del tipo de vegetación. Con respecto al componente hídrico, se define que el monitoreo debe ser permanente durante el desarrollo de algún potencial proyecto o actividad, con evaluación de datos históricos cada dos temporadas. Por último, para asegurar la mantención de las características ecológicas de los humedales, así como las funciones que estos cumplen desde el punto de vista ecológico, económico y social se deben considerar medidas de manejo, entre las que se cuenta regular la extracción de agua subterránea, mediante el control del nivel freático en áreas con vegetación hidrófila terrestre.

4. MODELO NUMÉRICO

4.1 Aspectos Generales

En esta sección, se desarrolla el modelo numérico, de ahora en adelante llamado *FlujoNoSat*, con el que se modelará el flujo a través de un medio no saturado. Para esto se utilizará la ecuación de Richards y las curvas características anteriormente explicadas, además del HYDRUS para poder comparar resultados con los obtenidos a partir de *FlujoNoSat*. También se hará un análisis considerando los datos recopilados sobre vegetación en la sección anterior, en cuanto al impacto que tendrían los cambios en el nivel freático sobre formaciones vegetacionales en la superficie.

El modelo se programó en un comienzo en Matlab. Al no obtenerse buenos resultados después de variados intentos, se trabajó con un esquema implementado en Fortran 90 desarrollado por el profesor guía el cual, a pesar de haber sido manipulado y modificado, se mantuvo gran parte de su estructura para la resolución de las ecuaciones y la entrega de resultados.

4.2 Formulación del Modelo Numérico

Como se mencionó anteriormente, la ecuación de Richards que gobierna el flujo en medios no saturados se puede presentar en la forma de las ecuaciones 2.3, 2.5 y 2.6.

Se hará la formulación general del modelo, para más adelante dejar planteadas claramente las simplificaciones que se harán para el desarrollo final de éste.

La ecuación de Richards escrita en diferencias finitas, con aproximación de Euler implícita y un esquema iterativo de Picard es la siguiente:

$$\frac{\theta^{n+1,m+1} - \theta^n}{\Delta t} - \frac{\partial}{\partial z} \left(K^{n+1,m} \cdot \frac{\partial h^{n+1,m+1}}{\partial z} \right) - \frac{\partial K^{n+1,m}}{\partial z} = 0 \quad (4.4)$$

Los términos n y m corresponden al tiempo e iteración, respectivamente.

Para poder iterar, se requiere conocer $\theta^{n+1,m+1}$. Celia & Zarba (1990) plantean que la clave para el método es hacer una aproximación en serie de Taylor con respecto a h en torno al punto $h^{n+1,m}$:

$$\theta^{n+1,m+1} = \theta^{n+1,m} + \left. \frac{d\theta}{dh} \right|^{n+1,m} \cdot (h^{n+1,m+1} - h^{n+1,m}) + O(\delta^2) + \dots \quad (4.5)$$

Se descartan los términos de orden superior y se reemplaza en la ecuación de Richards:

$$\frac{\theta^{n+1,m} + \left. \frac{d\theta}{dh} \right|^{n+1,m} \cdot (h^{n+1,m+1} - h^{n+1,m}) - \theta^n}{\Delta t} - \frac{\partial}{\partial z} \left(K^{n+1,m} \cdot \frac{\partial h^{n+1,m+1}}{\partial z} \right) - \frac{\partial K^{n+1,m}}{\partial z} = 0 \quad (4.6)$$

$$\begin{aligned} & \left(\frac{1}{\Delta t} C^{n+1,m} \right) (h_i^{n+1,m+1} - h_i^{n+1,m}) + \frac{\theta^{n+1,m} - \theta^n}{\Delta t} = \\ & \frac{1}{\Delta z} \left(K_{i+1/2}^{n+1,m} \cdot \frac{h_{i+1}^{n+1,m+1} - h_i^{n+1,m+1}}{\Delta z} - K_{i-1/2}^{n+1,m} \cdot \frac{h_i^{n+1,m+1} - h_{i-1}^{n+1,m+1}}{\Delta z} \right) \\ & \quad + \frac{K_{i+1/2}^{n+1,m} - K_{i-1/2}^{n+1,m}}{\Delta z} \quad (4.7) \end{aligned}$$

Las conductividades internodales se obtienen mediante algún método de interpolación (promedio aritmético, geométrico, armónico, entre otros). Según Haverkamp y Vauclin (1979), el método que mejores resultados presenta es la media geométrica. Esto, pues es la que mejor conserva el balance de masa entre dos celdas adyacentes. Por lo tanto, ésta será la usada en *FlujoNoSat*.

Al lado izquierdo quedarán todos los términos desconocidos (es decir, los de la iteración m+1) y al lado derecho los términos conocidos (iteración m):

$$\begin{aligned} & \left(\frac{1}{\Delta t} C^{n+1,m} \right) \cdot (h_i^{n+1,m+1}) \\ & - \frac{1}{\Delta z} \left(K_{i+1/2}^{n+1,m} \cdot \frac{h_{i+1}^{n+1,m+1} - h_i^{n+1,m+1}}{\Delta z} - K_{i-1/2}^{n+1,m} \cdot \frac{h_i^{n+1,m+1} - h_{i-1}^{n+1,m+1}}{\Delta z} \right) \\ & = \left(\frac{1}{\Delta t} C^{n+1,m} \right) \cdot (h_i^{n+1,m}) \cdot \frac{K_{i+1/2}^{n+1,m} - K_{i-1/2}^{n+1,m}}{\Delta z} - \frac{\theta_i^{n+1,m} - \theta_i^n}{\Delta t} \quad (4.8) \end{aligned}$$

Luego, se tiene una cantidad de ecuaciones igual al número de nodos. Para su resolución, se escribirá la ecuación (4.8) en forma matricial:

$$\begin{bmatrix} b_1 & c_1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ a_2 & b_2 & c_2 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_3 & b_3 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & b_{N-2} & c_{N-2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & a_{N-1} & b_{N-1} & c_{N-1} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & a_N & b_N \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \\ \vdots \\ h_{N-2} \\ h_{N-1} \\ h_N \end{bmatrix}^{j+1,m+1} = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \\ \vdots \\ R_{N-2} \\ R_{N-1} \\ R_N \end{bmatrix}^{j+1,m} \quad (4.9)$$

4.2.1 Nodos Interiores

Los elementos internos (excluyendo los de los extremos) que componen cada uno de los elementos de la tridiagonal de la matriz (que se llamará matriz A) son los siguientes:

$$a_i = \frac{-K_{i-1/2}^{j+1,m}}{\Delta z} \quad (4.10)$$

$$b_i = \frac{\Delta z}{\Delta t} C_i^{j+1,m} + \frac{K_{i+1/2}^{j+1,m} + K_{i-1/2}^{j+1,m}}{\Delta z} \quad (4.11)$$

$$c_i = \frac{-K_{i+1/2}^{j+1,m}}{\Delta z} \quad (4.12)$$

Por otro lado, el vector resto (lado derecho de la ecuación) es el siguiente:

$$R_i^{j+1,m} = \frac{\Delta z}{\Delta t} \cdot C_i^{j+1,m} \cdot h_i^{j+1,m} - \frac{\Delta z}{\Delta t} \cdot (\theta_i^{j+1,m} - \theta_i^j) + K_{i+1/2}^{j+1,m} - K_{i-1/2}^{j+1,m} \quad (4.13)$$

4.2.2 Condiciones de Borde

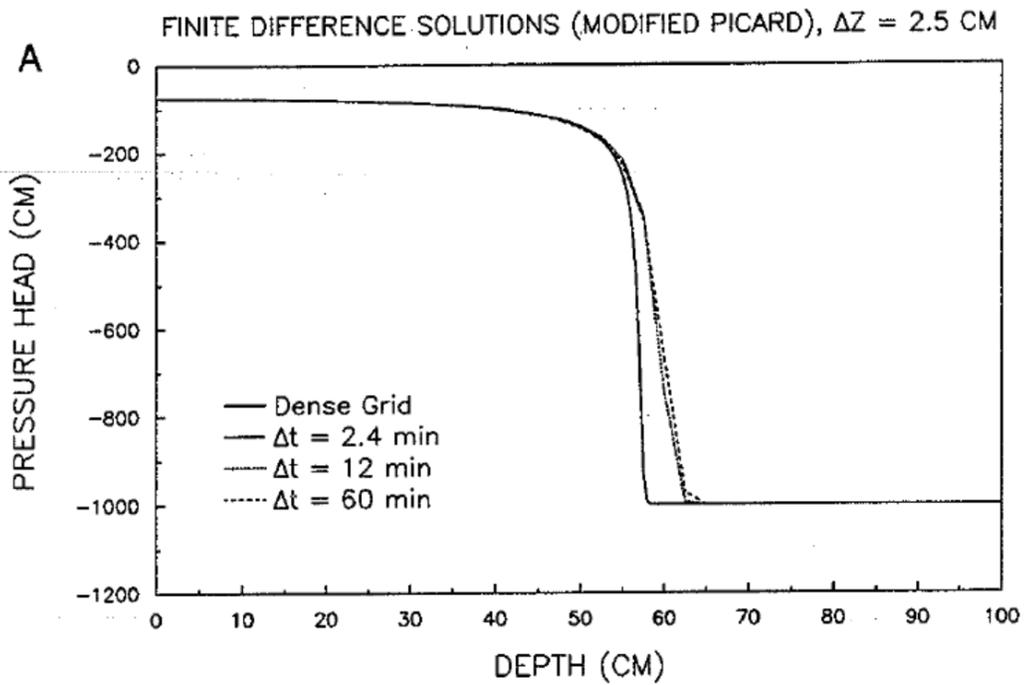
Las condiciones de borde utilizadas para el trabajo fueron la imposición de humedad en la base del perfil de suelo y en la superficie. Así, la humedad utilizada para la parte inferior son las humedades medidas para la interface en los diferentes perfiles (que se entregan más adelante). Por otro lado, para la parte superior se utiliza la obtenida a partir de HYDRUS 2D, la que se convierte en succión mediante la ecuación humedad-succión. Esto se hace así, puesto que obtener el dato de la humedad en la superficie es algo relativamente simple de hacer.

4.3 Validación del Código Numérico

En primer lugar, se realizaron varias simulaciones desarrollando ejercicios de modelación con los que se contaba.

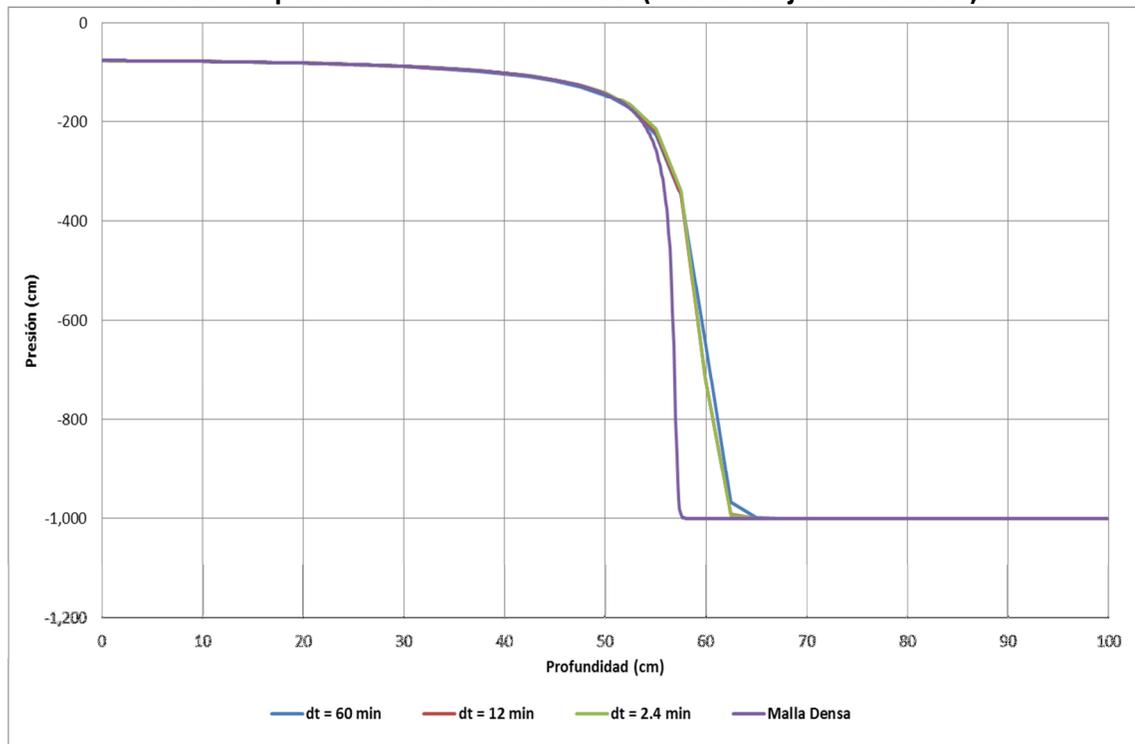
Luego, investigando y revisando la bibliografía para el Trabajo de Título, se encontró un artículo académico fundamental en la modelación numérica del flujo de agua a través de la zona no saturada (Celia & Zarba, 1990). Se intentó recrear los resultados que ahí aparecen con Matlab, pero después de varios intentos, se cambió a Fortran 90 el lenguaje de programación. Después, se hicieron las modelaciones correspondientes a los casos aparecidos en el artículo mencionado anteriormente. A continuación, en las Figuras 4.1 a 4.4 se entregan los principales resultados de este proceso:

Figura 4.1
Modelación para set de datos de Polmann.



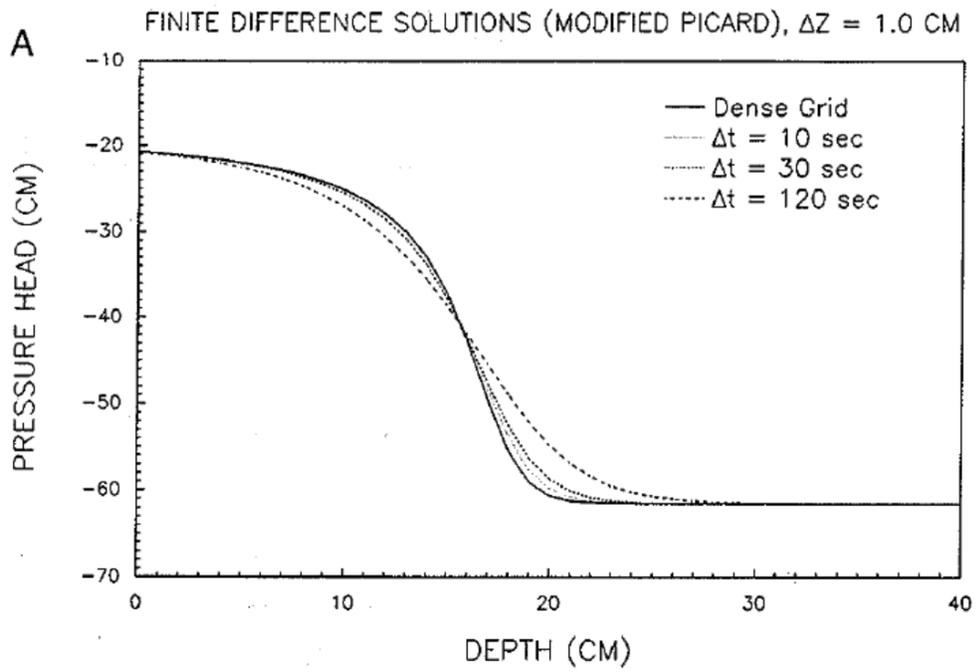
Fuente: Celia & Zarba 1990)

Figura 4.2
Modelación para set de datos de Polmann (Modelo Flujo No Saturado).



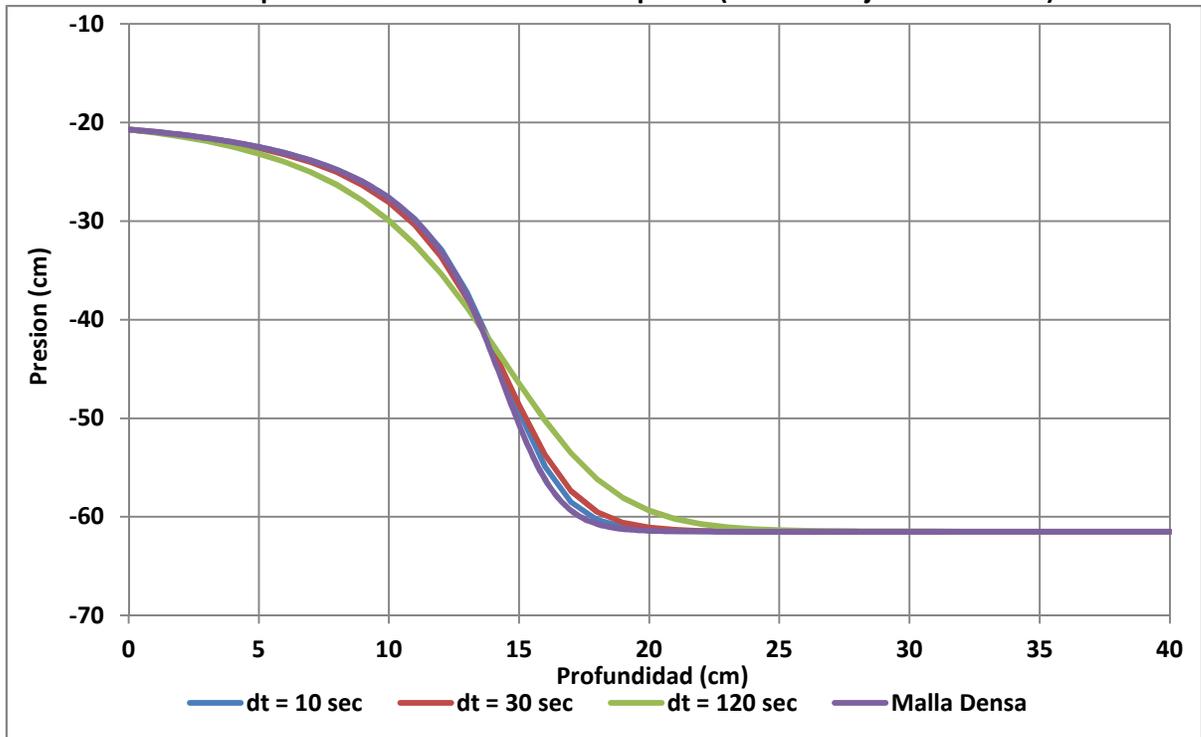
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 4.3
Modelación para set de datos de Haverkamp et al.



Fuente: Celia & Zarba 1990.

Figura 4.4
Modelación para set de datos de Haverkamp et al (Modelo Flujo No Saturado).



Fuente: Elaboración Propia.

Así, se ve que *FlujoNoSat*, generado en Fortran 90, representa correctamente los casos aparecidos en el artículo de Celia y Zarba. Luego de este proceso de introducción al trabajo con modelación numérica, se prosigue el trabajo con el Caso de Estudio.

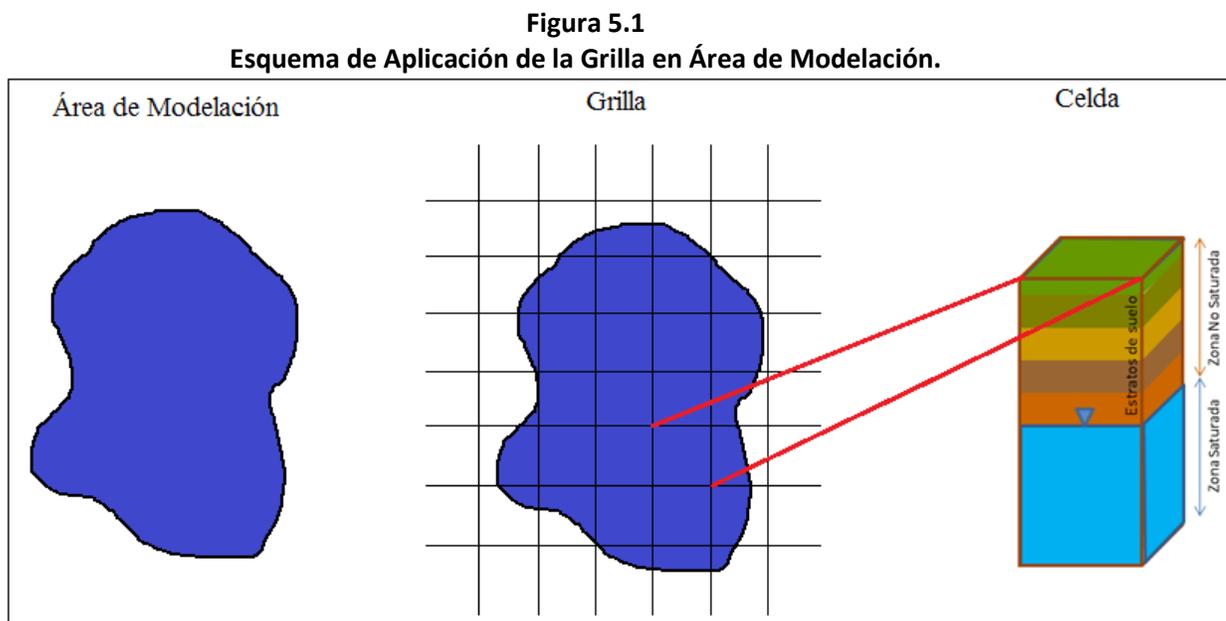
5. APLICACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO A UN CASO REAL

5.1 Descripción Caso Estudio

FlujoNoSat desarrollado será aplicado a un caso estudio, cuya información, por razones de confidencialidad, no será entregada con los nombres originales ni se entregará la ubicación geográfica exacta del lugar. Se trata de una zona en el norte del país, específicamente un salar. La altura promedio es de 2300 m.s.n.m. La principal salida de agua está asociada a la evaporación, y por otro lado el aporte más importante de agua a la cuenca es la infiltración de las precipitaciones que caen en zonas altas de la Cordillera de los Andes y escurren al salar.

Este salar y su entorno tienen una gran importancia, tanto ecológica como económica. En los bordes del salar hay vegas y lagunas que albergan especies animales y vegetales. Por otro lado, la salmuera del núcleo, considerada un recurso minero, y el agua dulce, que fluye a través de los acuíferos que circundan el salar, tienen gran relevancia en los procesos productivos que se desarrollan en el área.

A continuación, en la Figura 5.1, se presenta un esquema general de los perfiles de suelo:

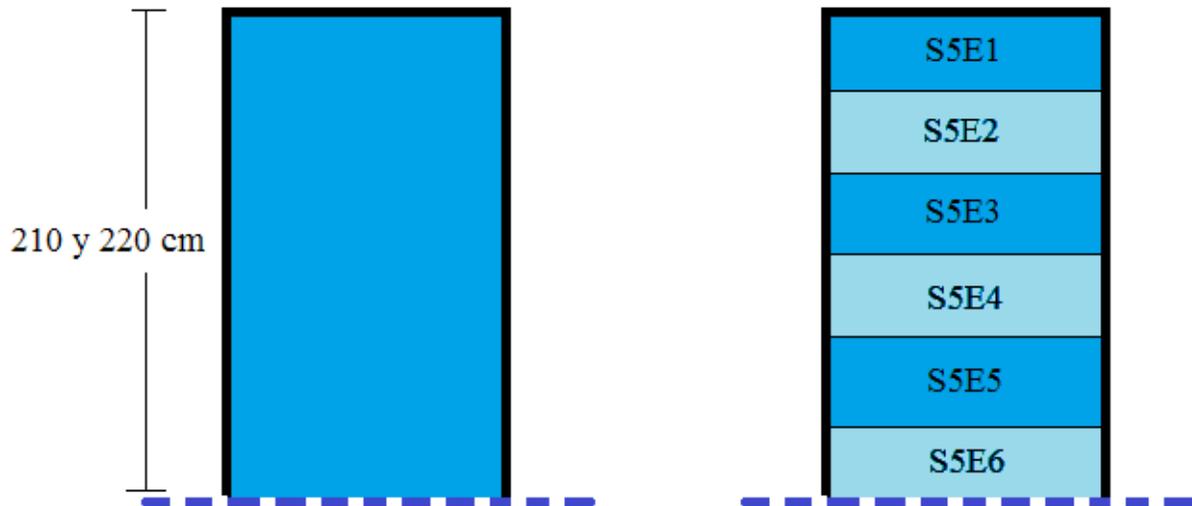


Fuente: Elaboración Propia.

Así, *FlujoNoSat* intentará representar el movimiento del agua a través de la zona no saturada. Se cuenta con la información de las características de los distintos estratos de suelo (porosidad, humedad saturada, humedad residual, entre otros). Por otro lado, se cuenta con los datos de la modelación hecha mediante HYDRUS 2D (se modeló en 1D, a pesar de ser el 2D. Esto, pues era la versión con la que se contó para el trabajo) para 7 perfiles de suelo. De estos, 3 son de profundidades considerables (140 a 220 cm) y otro de 40 cm. Los demás son perfiles muy pequeños, de unos cuantos centímetros, por lo que se decidió trabajar con los 4 primeros.

Se presenta en la Figura 5.2 un esquema de los perfiles 1 y 2 para entender mejor la forma y orden de los perfiles de suelo:

Figura 5.2
Esquema Perfiles de suelo 1 y 2.



Fuente: Elaboración Propia.

Las condiciones de borde utilizadas fueron las humedades conocidas en la parte superior e inferior de los perfiles a partir de la información del Caso de Estudio. Las humedades usadas para la parte inferior son las humedades iniciales de la Tabla 5.1, mientras que para la parte superior se usaron las conocidas a partir de la modelación hecha con el HYDRUS.

Tabla 5.1
Características distintos perfiles de suelo.

PERFIL	UNIDAD SUELO	PROFUNDIDAD (cm)	HUMEDAD INICIAL (%)
P1	S5	210	45
P2	S5	220	51
P3	S4	140	50
P4	S3	40	58

En la Tabla 5.2 se entrega un resumen con los parámetros del modelo Van Genuchten calibrados a partir del ajuste de las Curvas Características. Los parámetros fueron calibrados a partir de los datos observados en terreno usando el software RETC:

Tabla 5.2
Parámetros Modelo Van Genuchten Curva Retención de agua.

	θ_{res}	θ_{sat}	α	n	m
S2: HUMEDALES					
S2E1	0	0,806	0,013	1,244	0,196
S2E2	0	0,768	0,017	1,229	0,186
S2E3	0	0,732	0,019	1,225	0,184
S2E4	0	0,701	0,023	1,22	0,18
S2E5	0	0,695	0,025	1,253	0,202
S3: ORGÁNICO					
S3E1	0	0,744	0,007	1,261	0,207
S3E2	0	0,802	0,015	1,216	0,178
S3E3	0	0,663	0,025	1,186	0,157
S4: ORGÁNICO ALUVIAL					
S4E1	0	0,566	0,04	1,109	0,098
S4E2	0	0,557	0,01	1,15	0,13
S4E3	0	0,607	0,003	1,173	0,148
S5: PROFUNDOS					
S5E1	0	0,516	0,066	1,144	0,126
S5E2	0,095	0,526	0,046	1,243	0,196
S5E3	0	0,488	0,055	1,1	0,091
S5E4	0	0,495	0,024	1,1	0,09
S5E5	0	0,495	0,084	1,107	0,096
S5E6	0,007	0,525	0,115	1,113	0,102
S5E7	0	0,541	0,043	1,076	0,07
S5E8	0	0,511	0,004	1,101	0,092
S5E9	0	0,51	0,003	1,108	0,098
S5E10	0	0,52	0	1,194	0,162
S5E11	0	0,544	0	1,138	0,121
S7: COLUVIAL					
S7E1	0	0,545	0,056	1,133	0,118
S7E2	0,202	0,502	0,043	1,437	0,304
S7E3	0	0,529	0,173	1,131	0,116
S7E4	0	0,466	0,06	1,181	0,154
S7E5	0	0,397	0,034	1,153	0,133
S7E6	0	0,394	0,041	1,188	0,158
S7E7	0	0,499	0,009	1,091	0,083

Finalmente, también se entrega la Conductividad Hidráulica saturada de los diferentes perfiles, las cuales fueron obtenidas a partir de una calibración (Tablas 5.3, 5.4 y 5.5). Ésta se hizo considerando que se reprodujera la tendencia general al comparar valores medidos con los simulados. Los datos de terreno indican que el sistema está en equilibrio, por lo que se modeló considerando una condición estable a largo plazo:

Tabla 5.3
Conductividad Hidráulica saturada (cm/día) perfiles 1 y 2.

PERFIL	P1	P2	SUELO
E1	1E4	1E3	S5E1
E2	5E3	1E2	S5E2
E3	1,2E1	1E1	S5E3
E4	5E-2	5E-2	S5E4
E5	2E-2	2E-2	S5E5
E6	1E-2	1E-2	S5E6
EF	1E-2	1E-2	S5E6

Tabla 5.4
Conductividad Hidráulica saturada (cm/día) perfil 3.

PERFIL	P3	SUELO
E1	2E4	S4E1
E2	2E2	S4E2
E3	5E0	S4E3
E4	5E-3	S4E3
EF	1E-2	S4E3

Tabla 5.5
Conductividad Hidráulica saturada (cm/día) perfil 4.

PERFIL	P4	SUELO
E1	4E0	S3E1
EF	1E-2	S3E1

5.1.1 Prueba en perfil 4

En las Figuras 5.3 y 5.4 se presentan los resultados obtenidos en la prueba de *FlujoNoSat* en el perfil 4, del cual se entregó la información en el apartado anterior. Se muestran los resultados comparando lo obtenido con HYDRUS con lo obtenido mediante *FlujoNoSat*:

Figura 5.3
Resultado modelación HYDRUS 2D perfil 4.

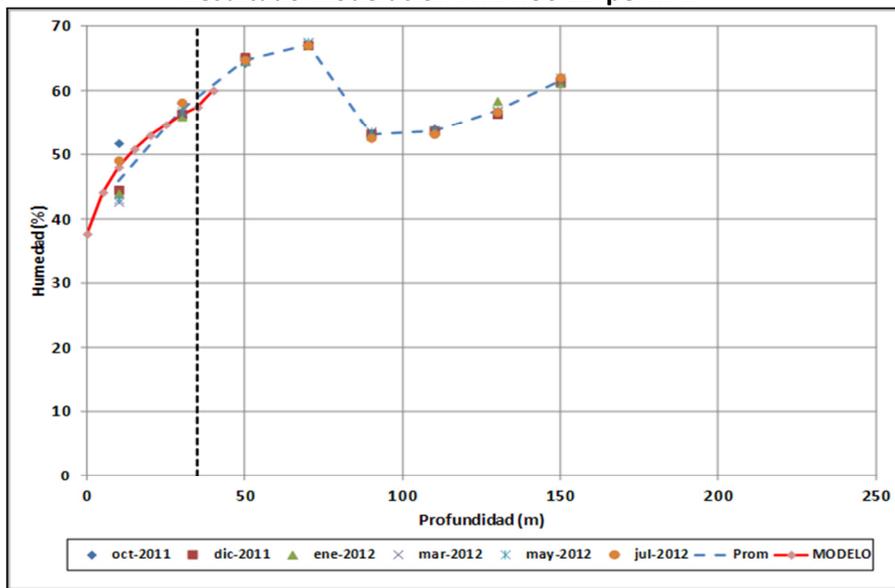
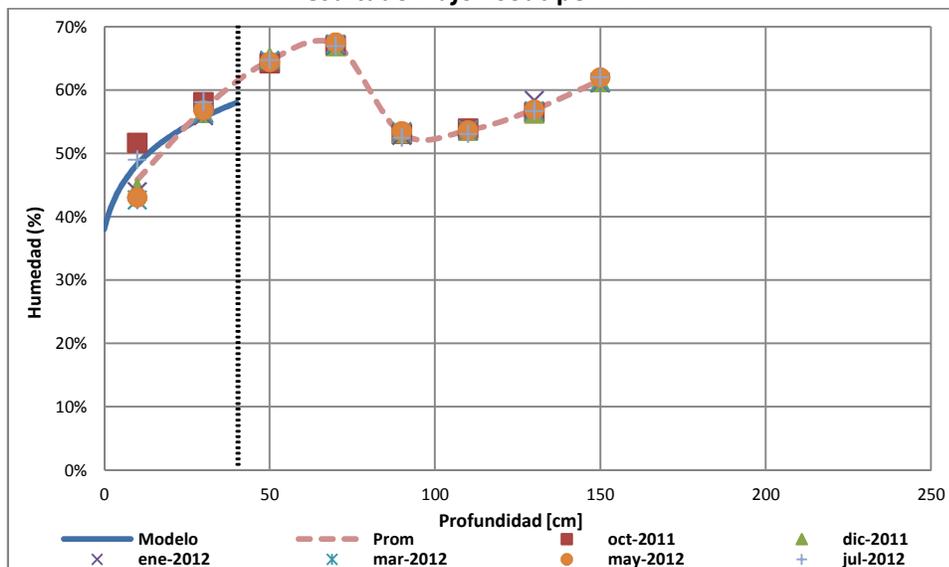


Figura 5.4
Resultado *FlujoNoSat* perfil 4.



Fuente: Elaboración Propia.

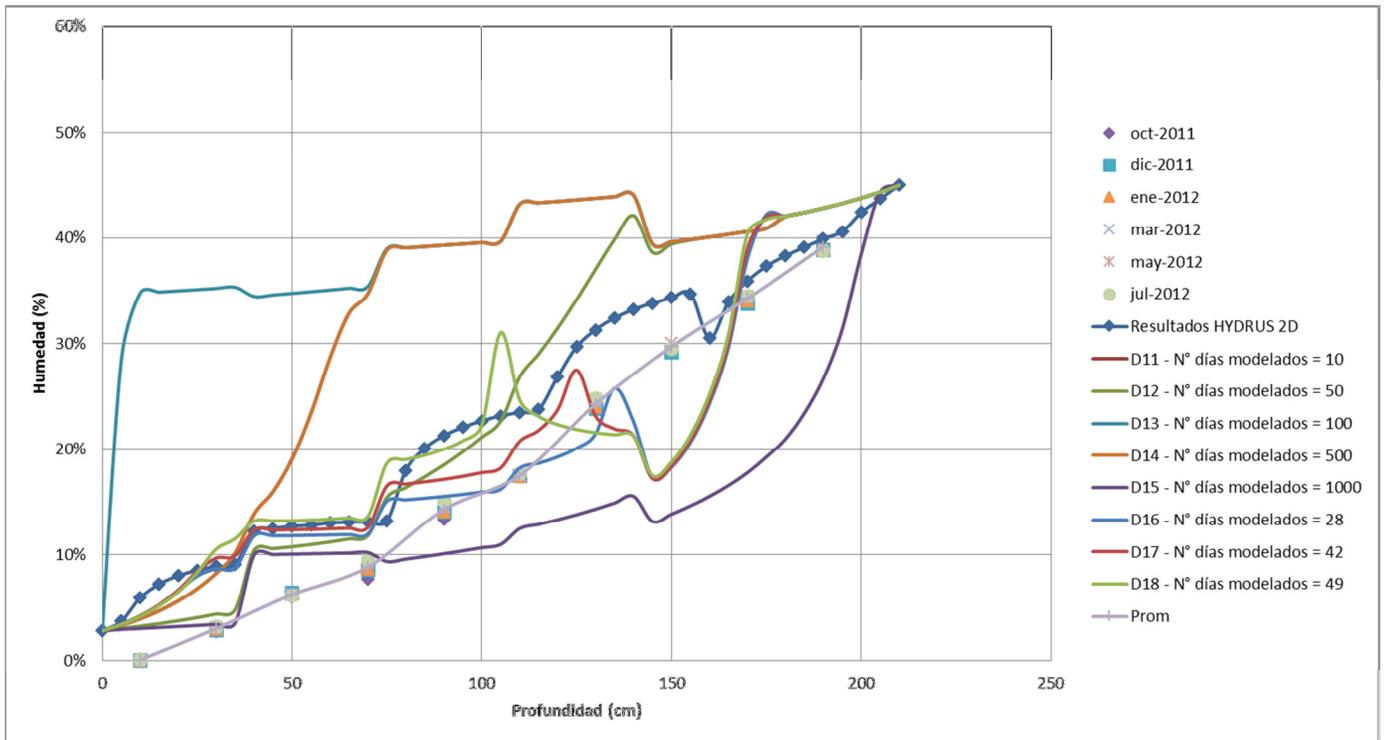
Como se puede observar, *FlujoNoSat* representa de buena manera el comportamiento de la humedad en el suelo, por lo que éste será usado para la representación de los perfiles 1, 2 y 3, que son los de mayor extensión de entre todos los perfiles para los cuales se tiene información.

5.1.2 Modelación perfiles 1, 2 y 3

Con los datos e información entregados anteriormente, se realizaron varias modelaciones del perfil 1. Para esto, se mantuvieron constantes en 10.000 las iteraciones en cada paso de tiempo, así como también el paso de espacio dz igual a 5 cm. Lo que se fue variando fue el número de

iteraciones temporales. En la Figura 5.5 se muestran los resultados obtenidos, además de los datos reales y el promedio de éstos, y también los resultados de la modelación en HYDRUS 2D:

Figura 5.5
Resultado modelaciones perfil 1.

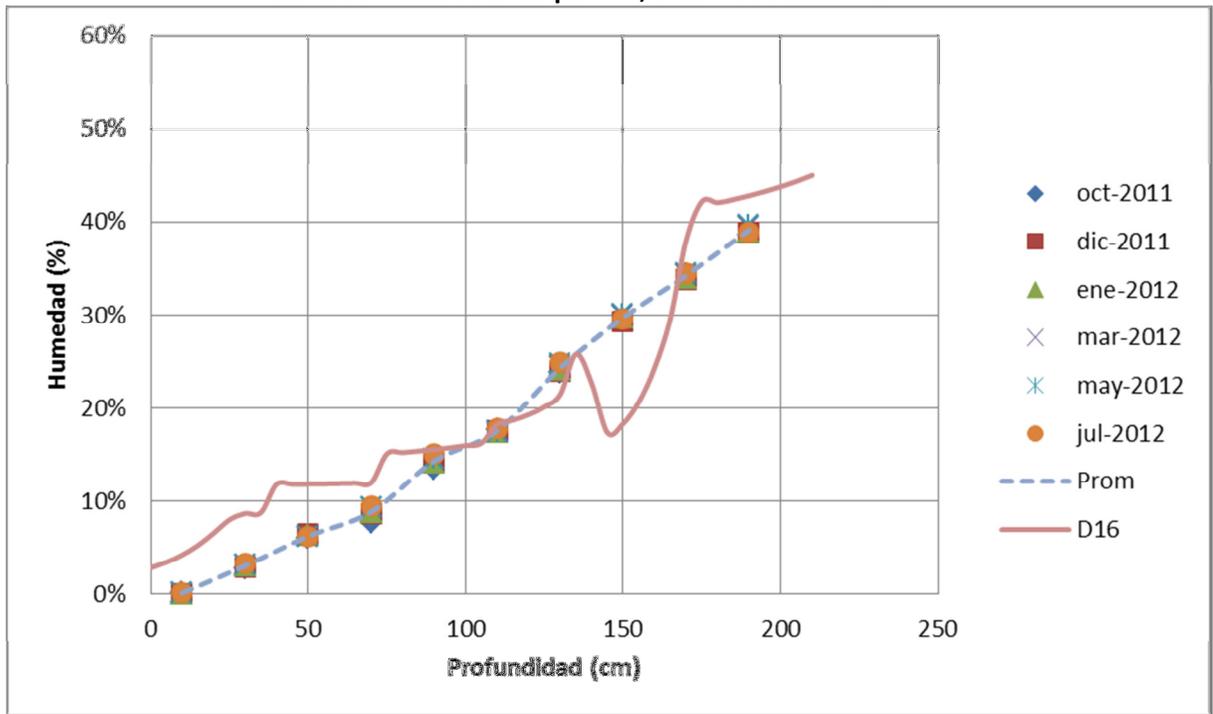


Fuente: Elaboración Propia.

En este punto, se pudo constatar que el modelo replicaba conductas iguales cada cierta cantidad de pasos de tiempo usados en la modelación, una especie de reinicio o *reboot*. Esto podría deberse a que el modelo no considera la situación final de una iteración como punto inicial de la siguiente, por lo que cada ciertos días simplemente parte desde el comienzo de nuevo. Esto último aplica para los perfiles siguientes, ya que, como se verá, este comportamiento se replica en ellos.

Primero se modeló para 10, 50, 100, 500 y 1000 días, pero luego se fue modelando para números entre rangos en los que se determinó que *FlujoNoSat* se ajustaría mejor al promedio de los datos medidos. Así, a continuación (Figura 5.6) se presenta el resultado para este perfil, separado del resto de las curvas obtenidas:

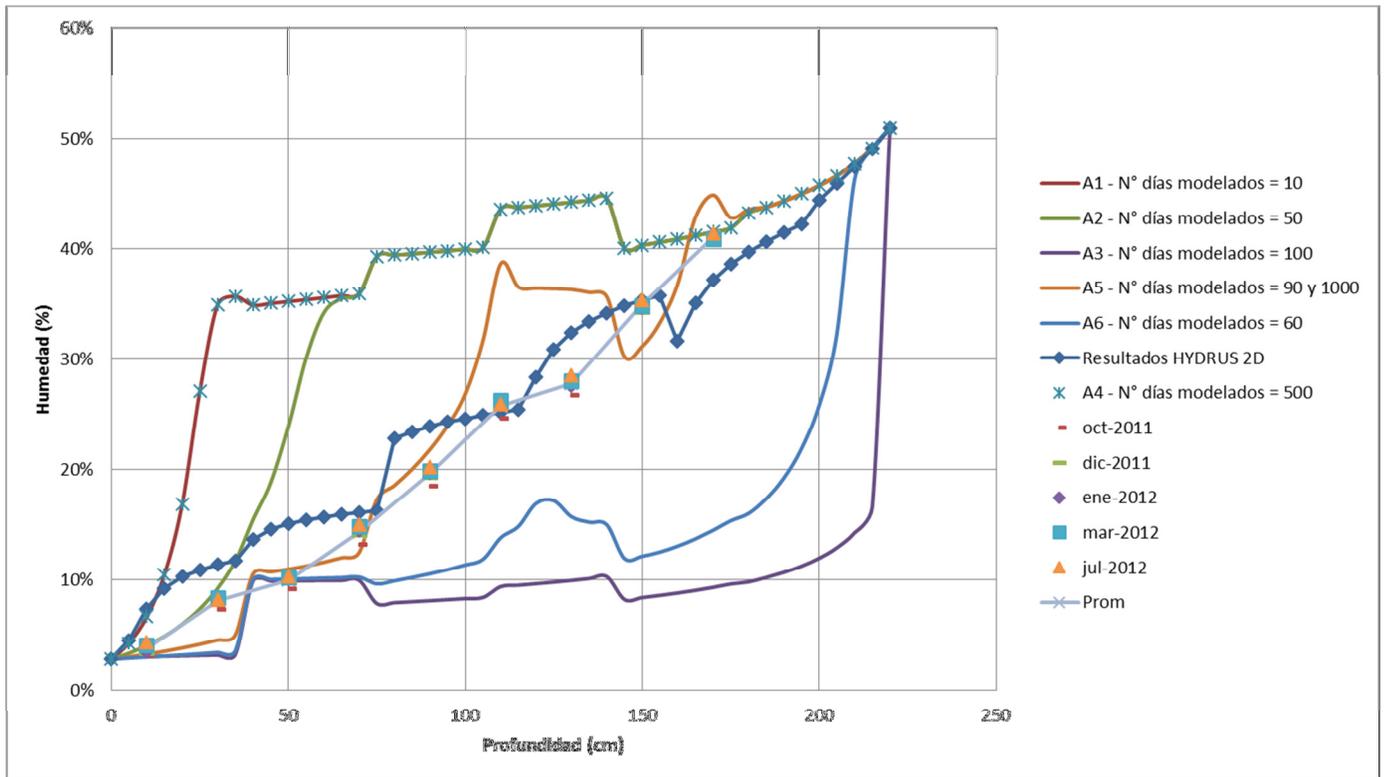
Figura 5.6
Resultado modelaciones perfil 1, días modelados: 28.



Fuente: Elaboración Propia.

En las Figuras 5.7 y 5.8, se presentarán los resultados obtenidos para el perfil 2 (descripción similar al caso anterior en cuanto a iteraciones temporales usadas):

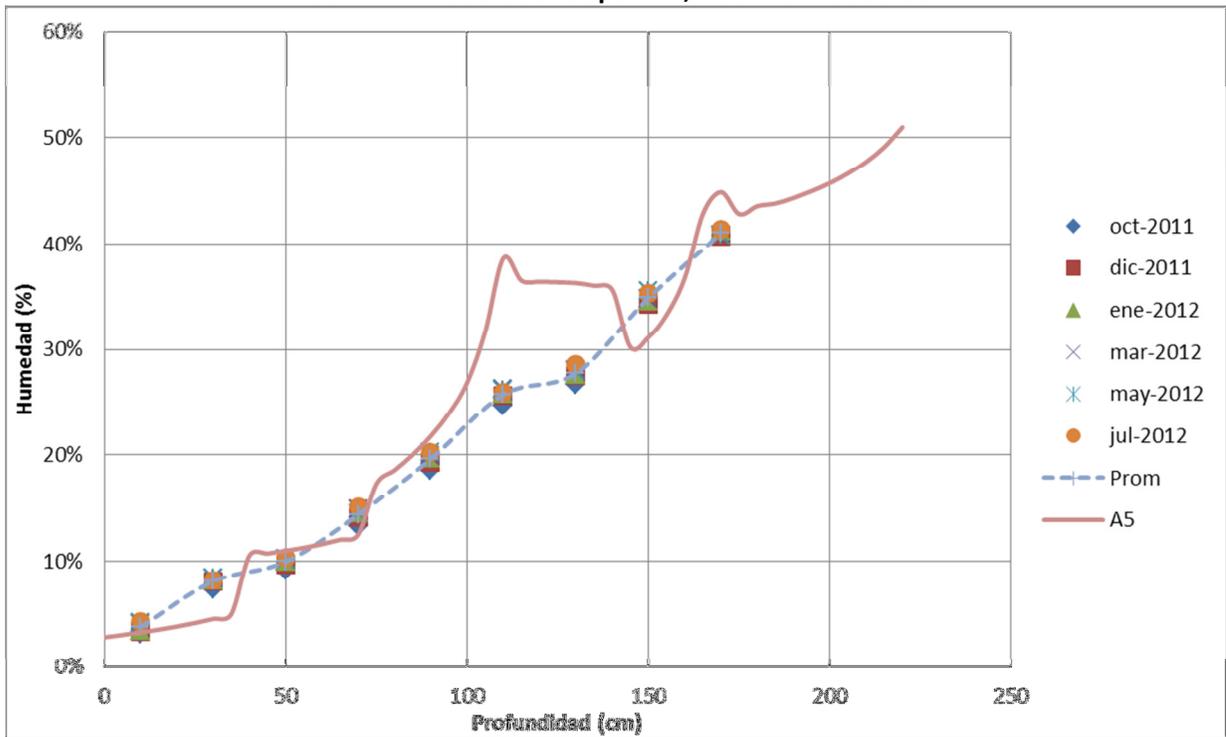
Figura 5.7
Resultado modelaciones perfil 2.



Fuente: Elaboración Propia.

Para este caso, el resultado que mejor se ajusta al promedio de los datos tomados es el A5, el cual se presenta a continuación (en el gráfico anterior se le asignan 90 y 1000 días de modelación. Esto, pues el comportamiento de *FlujoNoSat* es el mismo para ambas cantidades. Luego se abordará este punto):

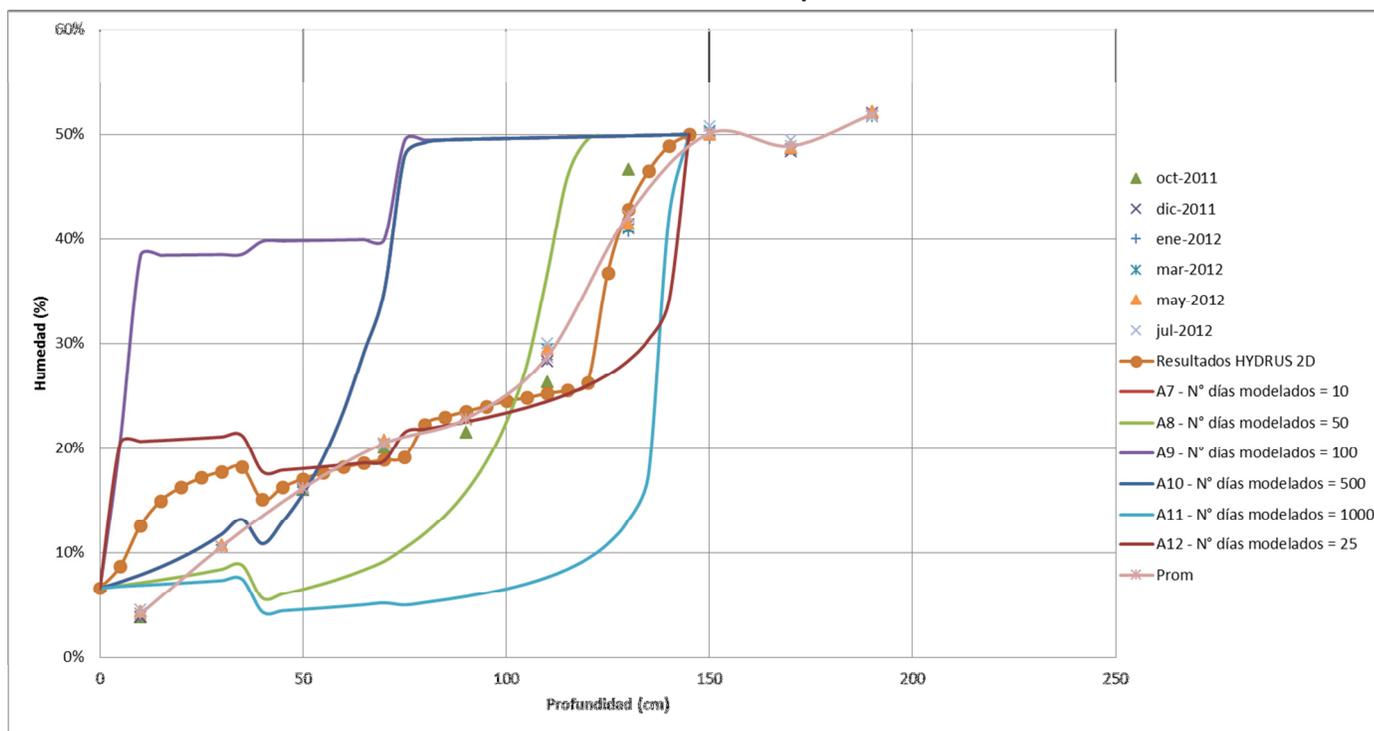
Figura 5.8
Resultado modelaciones perfil 2, días modelados: 90.



Fuente: Elaboración Propia.

Finalmente, en las Figuras 5.9 y 5.10 se presentan los resultados obtenidos para el perfil 3:

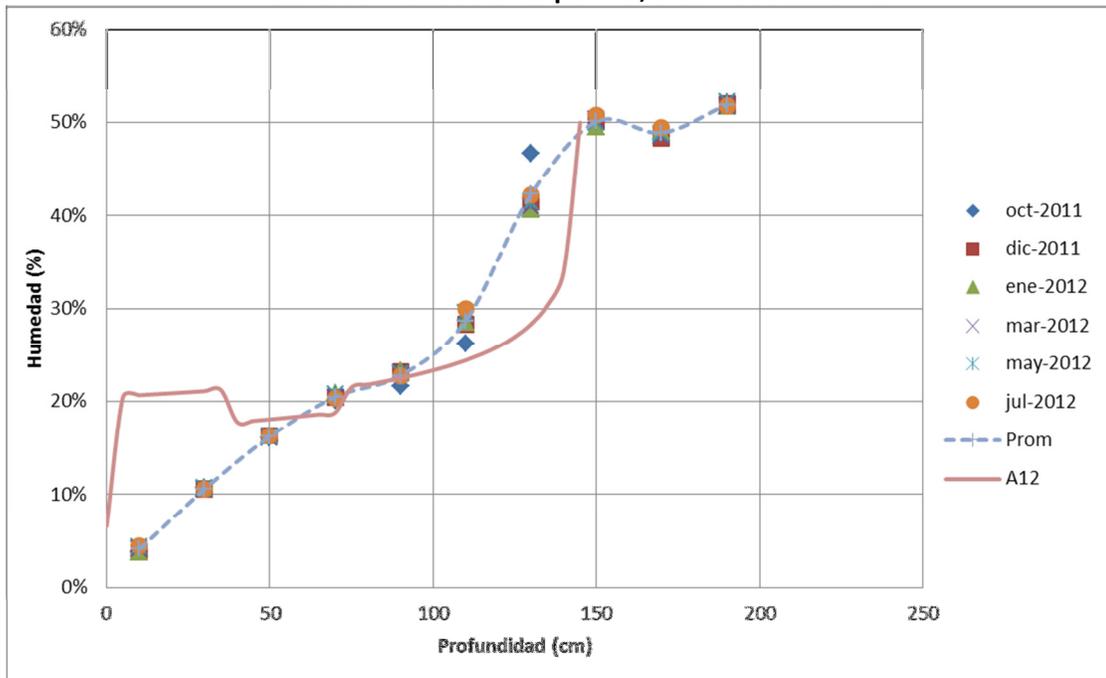
Figura 5.9
Resultado modelaciones perfil 3.



Fuente: Elaboración Propia.

El mejor ajuste a los datos medidos fue el A12, que corresponde a 25 días. Ésta se presenta a continuación:

Figura 5.10
Resultado modelaciones perfil 3, días modelados: 25.



Fuente: Elaboración Propia.

De las modelaciones hechas y los resultados obtenidos a partir de éstas, se observan resultados que se ajustan correctamente a los datos de terreno. Hay diferencias con los resultados obtenidos a partir del HYDRUS, en el sentido de que *FlujoNoSat* no reproduce exactamente esto últimos. Con respecto a esto, se debe señalar que el resultado obtenido en HYDRUS es una de las muchas modelaciones que se hicieron para este caso. Lo obtenido con *FlujoNoSat* es otra modelación que también representa bien el comportamiento del flujo del agua en el suelo para los diferentes casos.

En cuanto a la forma de las curvas obtenidas, de antemano se sabe el comportamiento general del suelo, imponiendo humedades más pequeñas conocidas en la parte superior del perfil de suelo y humedades más grandes en la parte inferior del mismo. Los quiebres que se ven en las curvas se explican por los cambios de estrato. Los cambios más bruscos se explican por el paso entre dos estratos con conductividades hidráulicas que pueden llegar a tener órdenes de magnitud de diferencia.

5.1.3 Aplicación a un caso con variaciones del nivel freático.

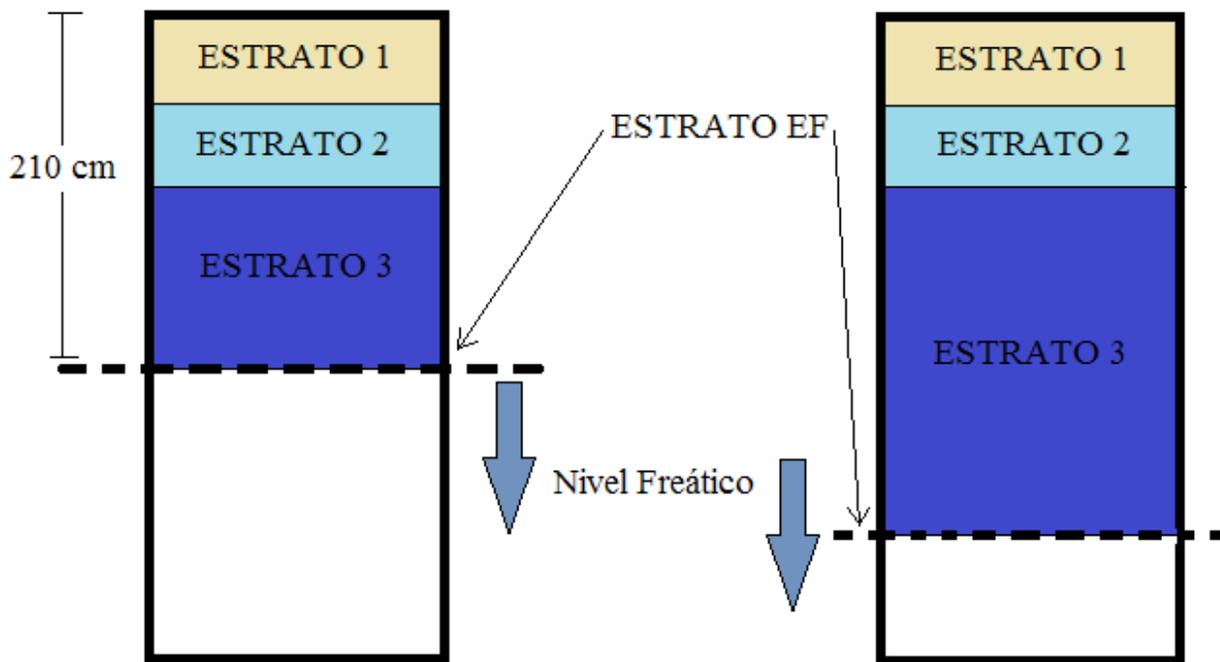
Se aplicará *FlujoNoSat* a un escenario con variaciones en el nivel freático, para poder analizar de qué manera representa éste el movimiento del agua en el suelo.

En primer lugar, se debe determinar cuál de los 3 perfiles queda mejor representado por *FlujoNoSat*. Para esto, se calcularon los errores promedio de cada perfil con respecto al resultado del HYDRUS. Los errores obtenidos fueron de 3,60%; 4,05% y 3,71% para los perfiles 1, 2 y 3 respectivamente. Así, se determina que el perfil mejor representado es el 1, por lo que será esta

distribución de suelo la utilizada para la situación con variación en el nivel freático. Se comenzará desde la situación actual como base, es decir, el nivel freático estará a 210 cm bajo el nivel de terreno.

Se utilizarán los 4 estratos superiores: dos estratos superiores de alta conductividad (10.000 y 5.000 cm/día respectivamente), un estrato intermedio (12 cm/día) y finalmente un estrato inferior (EF) pequeño de baja conductividad (0,05 cm/día). A continuación, en la Figura 5.11 se presenta un esquema:

Figura 5.11
Esquema con datos perfil 1 para análisis de escenarios con cambios de nivel freático.

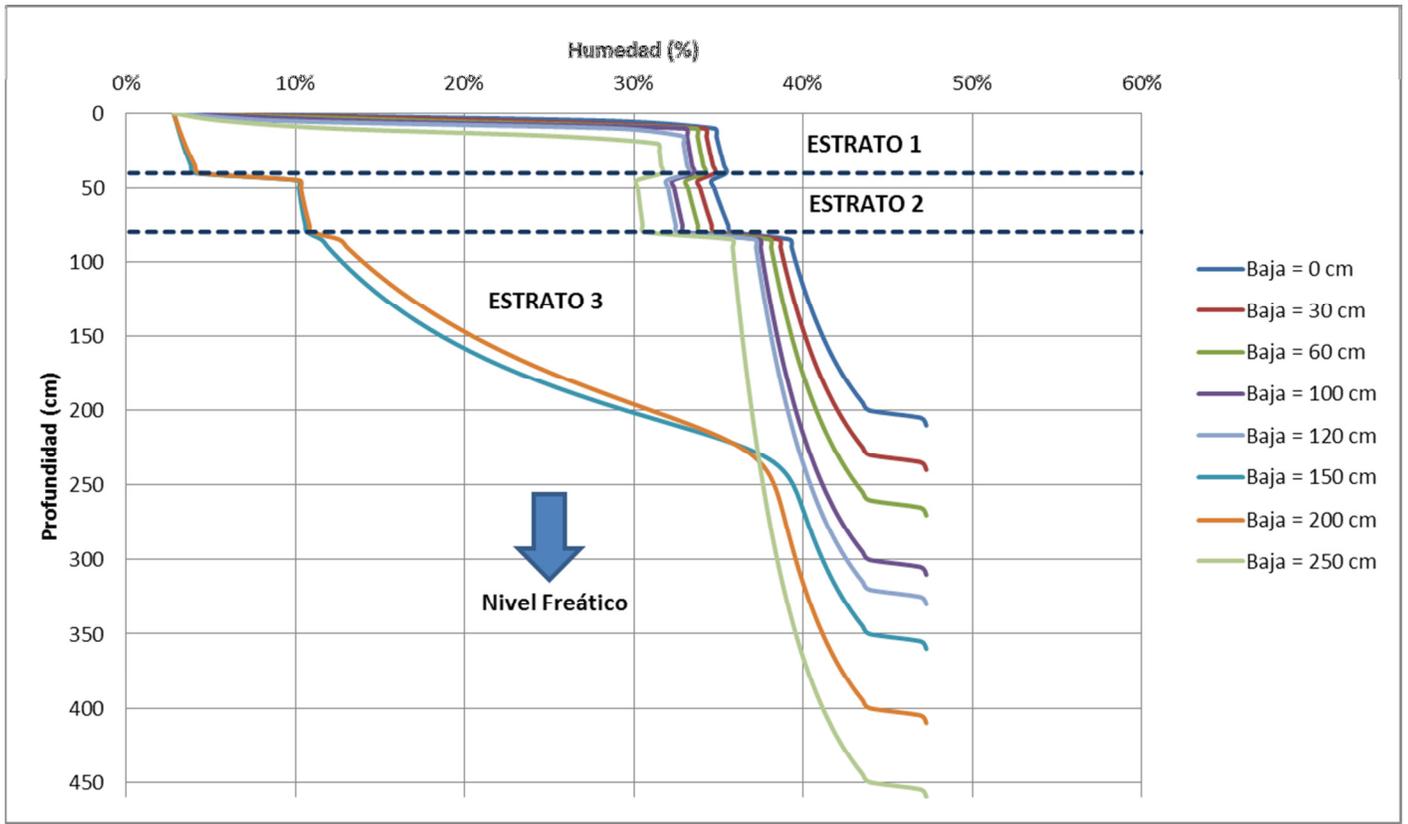


Fuente: Elaboración Propia.

En un comienzo, se realizarían 6 modelaciones para distintas reducciones del nivel freático, pero por los problemas que presentó el modelo para los descensos de 150 y 200 cm, se agregaron los descensos de 120 y 250 cm para comprobar que eran casos puntuales y que la tendencia es correcta. Así, el total de casos de disminución del nivel freático usados son 8.

Finalmente, en la Figura 5.12 se entrega el resultado obtenido por *FlujoNoSat* para los 8 casos nombrados anteriormente:

Figura 5.12
Distribución de la humedad obtenida con *FlujoNoSat* para caso con cambios en el nivel freático.



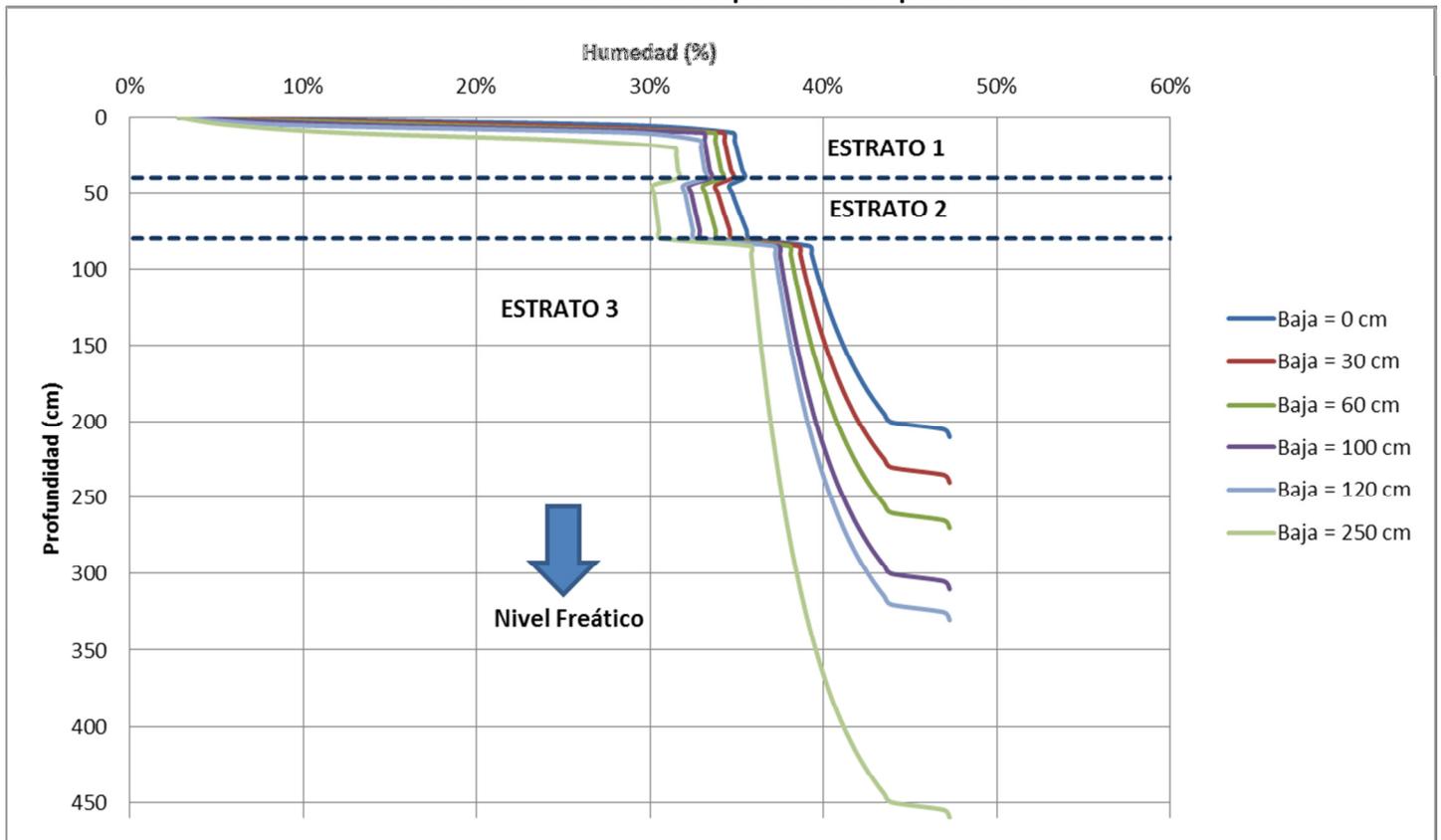
Fuente: Elaboración Propia.

El resultado anterior muestra una tendencia correcta para descensos del nivel freático desde los 0 cm a los 120 cm. Luego, para los descensos de 150 cm y 200 cm, *FlujoNoSat* se comporta de manera inadecuada, ya que no sigue la tendencia correctamente. Finalmente, para un descenso de 250 cm, *FlujoNoSat* vuelve a representar correctamente el comportamiento del flujo de agua en el suelo.

Las razones por las que *FlujoNoSat* no representa correctamente los casos específicos de las bajas de 150 y 200 cm puede deberse a ciertos valores de $\Delta x / \Delta t$ que generan inestabilidades numéricas. Otra razón podría ser la combinación de conductividades hidráulicas del suelo y el paso de una a otra podría generar inestabilidad en casos específicos como los mencionados. Por otro lado, las dificultades que presenta la modelación de una ecuación no lineal como la ecuación de Richards (aún en su versión 1D) también pueden tener alguna consecuencia en los problemas señalados. De hecho, hay varias publicaciones enfocadas en la mejora de la forma en que se modela numéricamente la ecuación y en el desarrollo de explicaciones más detalladas de ésta (Kumar, 2002; Barari, 2009, entre otros).

Para visualizar de mejor manera el resultado, se eliminarán estos dos casos para los que el *FlujoNoSat* no se comporta de buena manera. El resultado se muestra en la Figura 5.13:

Figura 5.13
Distribución de la humedad obtenida con el *FlujoNoSat* numérico para caso con cambios en el nivel freático eliminando casos que muestran problemas.



Fuente: Elaboración Propia.

Considerando los resultados obtenidos para la distribución de la humedad con *FlujoNoSat*, ahora se analizará el potencial impacto que éstos tendrían sobre las distintas formaciones vegetales que extraen agua del sector.

En primer lugar, se detallarán las diferentes formaciones vegetales de la parte del salar correspondiente a aquella en donde se realizó la modelación.

Una clasificación de las formaciones vegetacionales en la referida zona del salar es la siguiente:

- **Vegas:** Corresponde a una formación vegetal asociada a áreas con mayor disponibilidad hídrica. Presentan alta cobertura absoluta, bajo número de especies y son dominadas por una o dos especies. Estas formaciones presentan límites discretos y claramente diferenciables.
- **Vegetación asociada:** Corresponde a una serie de asociaciones vegetacionales de transición cuya composición específica y distribución espacial se encuentra fuertemente influenciada por el tipo de sustrato y la humedad del suelo. Estepa arbustiva de baja cobertura absoluta.

En cuanto a los tipos de plantas que hay en el sector del salar referido, se cuenta con la siguiente información (nombres de cada grupo asignados por simplicidad):

- P1: Herbazal muy claro de Distichlis, Tessaria y Juncus. Sobre sustrato salino.
- P2: Herbazal muy claro de Distichlis y Tessaria (a veces Juncus). Sobre suelo desnudo.
- P3: Herbazal claro de Juncus, Distichlis y Phragmites.

La modelación correspondió al grupo de plantas P2.

Por otro lado, el tipo de suelo correspondiente al sector modelado es Profundo.

Sobre los tipos de planta específicos del sector, de la información disponible se sabe que Distichlis tiene una longitud de raíces promedio entre 10 y 40 cm, pudiendo llegar hasta 70 cm en casos de falta de agua. Tessaria, por su parte, muestra una gran diversidad de formas y profundidad de raíces. En promedio, no superó los 50 cm de profundidad, aunque a medida que disminuye la disponibilidad de agua, sus raíces pueden extenderse a profundidades cercanas a los 150 cm. Por último, Juncus muestra valores promedio entre 15 y 30 cm de profundidad de sus raíces, mientras que los valores de profundidad máximo estuvieron entre 38 y 69 cm.

El impacto específico no es parte del análisis, sólo la verificación de si habrá o no algún impacto. Se definió que variaciones del agua disponible (en forma de humedad) de alrededor de 2% generarían un impacto medio sobre las plantas, lo que puede involucrar desde cambios en su color, tamaño, forma, entre otros, y variaciones de 5% generan un alto impacto, que puede involucrar la muerte de parte de la vegetación respectiva.

A continuación, se presenta una tabla resumen de los impactos sobre la vegetación (bajo-medio-alto) según la disminución del nivel freático:

Tabla 5.6
Impacto de variaciones en el nivel freático sobre vegetación del sector modelado.

Disminución (cm) \ Planta	Distichlis	Tessaria	Juncus
0	Bajo	Bajo	Bajo
30	Bajo	Bajo	Bajo
60	Medio	Medio	Medio
100	Medio	Medio-Alto	Medio
120	Medio	Medio-Alto	Medio
250	Alto	Alto	Alto

Fuente: Elaboración Propia.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El flujo de agua a través de la zona no saturada del suelo es objetivo de una gran cantidad de investigación en la actualidad. Esto, pues a nivel mundial se está tomando conciencia del impacto que las diferentes actividades humanas tienen sobre el medio ambiente. Dado que el consumo humano y las actividades industriales tienen un alto nivel de consumo de agua, y la población y la actividad económica han aumentado de manera considerable en las últimas décadas, se han visto disminuciones importantes de los niveles freáticos en diferentes partes del mundo, con el consecuente impacto que esto acarrea para la superficie del suelo.

En relación a esto último, ha aumentado mucho la investigación que se realiza sobre el impacto de la variación del nivel freático en la vegetación de la superficie. A pesar de que hay investigación desde la década de 1920 en Estados Unidos, sólo en las últimas décadas se ha comenzado a investigar de mayor manera y más profundamente este tema.

De la revisión bibliográfica que se realizó sobre esto, se pudo constatar que en particular en China, con su rápido desarrollo (y el impacto de esto sobre el medio ambiente) este tema ha recibido especial atención en cuanto a investigación científica (lo que no significa que protejan de buena manera el medioambiente, atendidos la gran cantidad de problemas ambientales que presenta ese país en la actualidad). La importancia radica en muchos elementos, desde el ámbito económico, donde se necesita compatibilizar el desarrollo con la sustentabilidad, hasta el político-social, es decir, la necesidad de satisfacer la demanda de agua potable de la población, así como protegerla de la desertificación que genera la muerte de la vegetación y, en consecuencia, de una barrera natural contra tormentas de arena, por nombrar algunos ejemplos.

La sección correspondiente a la vegetación y su comportamiento frente a cambios del nivel freático fue más bien cualitativa, aunque también se agregaron algunos elementos cuantitativos que permitieran tener una idea del potencial impacto que predice *FlujoNoSat*. Esto es para un primer análisis, pero queda abierta la opción de generar de alguna forma distribuciones de vegetación según el lugar que se quiera analizar y así ver el impacto potencial de cambios del nivel freático sobre formaciones vegetacionales.

En una de las RCA y en el PAT revisados se ve que el organismo público competente demanda al proyecto el consabido límite de 25 cm, mientras en la otra RCA, si bien también se refiere a acotar la variación del nivel freático, se usó el concepto de “protección del acuífero” de donde derivan los 50 m en pozos de bombeo y 5 m en los de observación y no tiene relación con la vegetación.

En el mismo tema, están las recomendaciones que hace la “Guía para la Conservación y Seguimiento Ambiental de Humedales Andinos” del Ministerio del Medio Ambiente. Es un documento reciente sobre el que los proyectos que quieran instalarse en lugares cercanos a humedales altoandinos (exactamente el caso que se trata en este trabajo de título) deberán apoyarse para definir las medidas que se deben tomar. Ahí se describen las diferentes especies de vegetación que pueden ser afectadas. El trabajo fue desarrollado en una zona de salares, por lo que las recomendaciones entregadas en este caso son aplicables directamente. Así, como se establece que el umbral máximo del nivel freático de manera de no impactar negativamente en las vegas y bofedales típicos de humedales altoandinos es 1 a 1,5 metros, *FlujoNoSat* podría ser usado en casos como estos.

En cuanto a *FlujoNoSat*, se puede señalar en primer lugar que el trabajo previo con modelación numérica fue de gran utilidad para poder entender de mejor manera cómo trabajar con códigos numéricos y de qué manera enfrentar los errores y las correcciones cuando se corre el modelo y los resultados no son los correctos.

El Caso Estudio, y la siguiente aplicación de *FlujoNoSat* al caso en que varía el nivel freático, fue una gran motivación, dado que se trata de un caso real en un lugar en que se da exactamente lo explicado anteriormente: la necesidad de generar las condiciones para que el desarrollo de un proyecto sea sustentable, protegiéndose así la vegetación y manteniendo las variaciones del nivel freático dentro de un margen razonable para que los impactos sean acotados. Las normativas ambientales de Chile, así como las exigencias de la ciudadanía para con los proyectos que pueden impactar fuertemente el medioambiente son cada vez más altas. Este es un proceso sin retorno, por lo que las empresas y las instituciones públicas que trabajan en el tema tienen que tener cada vez más claro los potenciales impactos, para así poder mitigarlos al mínimo posible. Es en este marco que se inscribe el presente trabajo.

Durante el desarrollo de *FlujoNoSat*, se enfrentaron varios problemas. El modelo presentó problemas de inestabilidad, los que obviamente están relacionados, en primer lugar, con el paso de tiempo (dt) usado, y en menor medida con el paso de espacio (dz). Como es sabido, los modelos numéricos son siempre sensibles al dt , y este caso no es la excepción. Pequeñas variaciones en el dt usado podían hacer que *FlujoNoSat* pasara de representar bien un escenario a la caída del programa. *FlujoNoSat* también mostró sensibilidad frente a cambios de dz . Así, tras varios intentos de modelación usando el dz que se consideró en el modelo en HYDRUS (1 metro), y en vista que los resultados no eran buenos, se cambió el dz a 5 m. Luego de ese cambio, el modelo comenzó a entregar mejores resultados.

Otro punto importante de mencionar es que el modelo entrega resultados iguales para diferentes números de iteraciones, lo que se repitió en todos los perfiles de suelo. Por ejemplo, para el perfil 2 el resultado es el mismo para 90 y para 1000 días de modelación. Una posible explicación para esto es que el modelo hace una especie de reinicio cada cierta cantidad de días de modelación.

De los gráficos obtenidos se ve que los resultados son mayormente buenos, aunque como se vio anteriormente, se presentaron algunos problemas. Además de los problemas mencionados derivados de distintos dz y dt , cuando *FlujoNoSat* se aplicó a la situación con variación del nivel freático hubo casos específicos a los que *FlujoNoSat* no respondió correctamente, mientras que para la mayoría sí lo hizo. El error en los dos casos mencionados puede deberse a inestabilidades numéricas generadas a partir de ciertos valores de $\Delta x / \Delta t$.

Hay posibles mejoras que se le podrían hacer a *FlujoNoSat* para corregir los errores que presenta en casos específicos. Una de ellas es hacer un cambio de lenguaje desde Fortran 90 a Matlab o algún otro similar para ver si así *FlujoNoSat* deja de mostrar los problemas descritos anteriormente. Otra posibilidad es modificar el código de forma que, en cada iteración el programa tomara como condición inicial la situación en que quedó al finalizar la iteración anterior. Esto podría corregir el problema de entregar resultados iguales para diferentes cantidades de días modelados.

7. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

1. BARARI, A., OMIÐVAR, M., GHOTBI, A.R., GANJI, D.D. Numerical Analysis of Richards' Problem for Water Penetration in Unsaturated Soils, *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 6, 6359–6385, 2009.
2. BRYAN, K. Change in Plant Association by Change in Ground Water Level. *Ecology* 9: 474-478, 1928.
3. CELIA, M. A., Bouloutas, E.T., ZARBA, R.L. A General Mass-Conservative Numerical Solution for the Unsaturated Flow Equation. *Water Resources Research*, Julio, 1990. Vol. 26, N°7, pp. 1483-1496.
4. CENTRO DE ECOLOGÍA APLICADA. Estudio de la Respuesta al Stress Hídrico de las Plantas del Sector Sur del Salar de Atacama. Septiembre 1996.
5. CHEN, Y., PANG, Z., CHEN, Y., LI, W., XU, C., HAO, X., HUANG, X., HUANG, T., YE, Z. Response of Riparian Vegetation to Water-Table Changes in the Lower Reaches of Tarim River, Xinjiang Uygur, China. *Hydrogeology Journal* 16: 1371-1379, 2008.
6. COMISIÓN NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE. Resolución de Calificación Ambiental Proyecto Pampa Puno Codelco Chile – División Codelco Norte. Diciembre, 2005.
7. COMISIÓN REGIONAL DEL MEDIO AMBIENTE II REGIÓN DE ANTOFAGASTA. Resolución de Calificación Ambiental Proyecto Mansa Mina Codelco Chile – División Codelco Norte. Diciembre, 2005.
8. DIEZ, Javier (2005), Apuntes Curso “Ciencias de la Tierra” Unidad 6 “Flujo en Medios Porosos No Saturados e Infiltración”, <http://users.exa.unicen.edu.ar/~jdiez/files/cstierra/apuntes/unidad6.pdf> Visitado el 6 de septiembre de 2012.
9. ESPINOZA, Carlos (2005), Apunte Curso “Hidráulica de Aguas Subterráneas y su Aprovechamiento”. Tema 6 “Flujo en Medios Porosos No Saturados”. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
10. ESPINOZA, Carlos (2009), Apuntes Curso “Modelación de Aguas Subterráneas”. “Modelo de Simulación Flujo No Saturado HYDRUS 2D”. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

11. EVANS, Robert., GILLIAM, J.W., LILLY, J.P. (1996), Wetlands and Water Quality, <http://www.bae.ncsu.edu/programs/extension/evans/ag473-7.html>. Visitado el 3 de septiembre de 2012.
12. HAVERKAMP, R., VAUCLIN, M. A Note Estimating Finite Difference Interblock Hydraulic Conductivity Values for Transient Unsaturated Flow Problems, *Water Resources Research*, Febrero, 1979. Vol. 15, N°1, pp. 181-187.
13. KUMAR, C.P. Modelling of Unsaturated Flow, National Conference on "Modern Trends in Water Resources Development and Environmental Management", 7-8 March 2002, Vellore Institute of Technology, Vellore (Tamil Nadu), pp. 1-9.
14. MEINZER, O.E. Plants as Indicators of Ground Water. U.S. Geological Survey Water Supply Paper 577, 1927.
15. MERINO, M. Modelación Numérica de la Generación de Líquidos Lixiviados en una Columna de Residuos Sólidos Domésticos. Memoria para optar el título Profesional de Ingeniero Civil. Universidad de Chile. 2005.
16. MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS. Plan de Alerta Temprana para el Acuífero de Monturaqui-Negrillar-Tilopozo, II Región, Antofagasta. Julio, 2001.
17. MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. Guía para la Conservación y Seguimiento Ambiental de Humedales Andinos. Mayo, 2011.
18. NAUMBURG, E., MATA-GONZALEZ, R., HUNTER, R., MCLENDON, T., MARTIN, D. Phreatophytic Vegetation and Groundwater Fluctuations: A Review of Current Research and Application of Ecosystem Response Modeling with an Emphasis on Great Basin Vegetation. *Environmental Management* Vol. 35, No. 6: 726-740, 2005.
19. NIMMO, J.R.. Vadose Water. **EN:** Gene E. Likens. *Encyclopedia of Inland Waters*, Volume 1. Oxford, Elsevier Inc., 2009. pp. 766-777.
20. RADCLIFFE, David E., SIMUNEK, Jiri. *Soil Physics with HYDRUS*. Boca Raton, CRC Press, 2010. 373 p.
21. SIMUNEK, J., SEJNA, M., VAN GENUCHTEN, M. Th. *HYDRUS 2-D Simulating Water Flow, Heat and Solute Transport in Two-Dimensional Variably Saturated Media*. Integrated Groundwater Modeling Center (IGWMC) de la Colorado School of Mines. Golden (CO), 1999.
22. SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA, <https://www.soils.org/>. Visitado el 6 de septiembre de 2012.

23. STROMBERG, J.C., TILLER R., RICHTER B. Effects of Groundwater Decline on Riparian Vegetation of Semiarid Regions: The San Pedro, Arizona. *Ecol Appl* 6(1): 113-131, 1996.
24. TINDALL, James A., KUNKEL, James R. *Unsaturated Zone Hydrology for Scientists and Engineers*. Nueva Jersey, Prentice Hall, 1999. 624 p.
25. USGS Groundwater Information: Unsaturated zone, <http://water.usgs.gov/ogw/unsaturated.html>. Visitado el 3 de septiembre de 2012.
26. USGS Unsaturated Flow Processes, <http://wwwrcamnl.wr.usgs.gov/uzf/unsatflow/unsatflow.html>. Visitado el 3 de septiembre de 2012.
27. WANG, P., ZHANG, Y., YU, J., FU, G., AO, F. Vegetation Dynamics Induced by Groundwater Fluctuations in the Lower Heihe River Basin, Northwestern China. *Journal of Plant Ecology* 4, Number 1-2: 77-90, 2011.
28. ZHAO, C., WANG, Y., CHEN, X., LI, B. Simulation of the Effects of Groundwater level on Vegetation Change by Combining FEFLOW Software. *Ecological Modelling* 187: 341-351, 2005.
29. ZHUANG, L., CHEN, Y. Physiological Responses of Three Contrasting Plant Species to Groundwater Level Changes in an Arid Environment. *Journal of Integrative Plant Biology* 48 (5): 520-526, 2006.

8. ANEXOS

EFFECTOS DE CAMBIOS EN LOS NIVELES DE AGUA SOBRE LA VEGETACIÓN

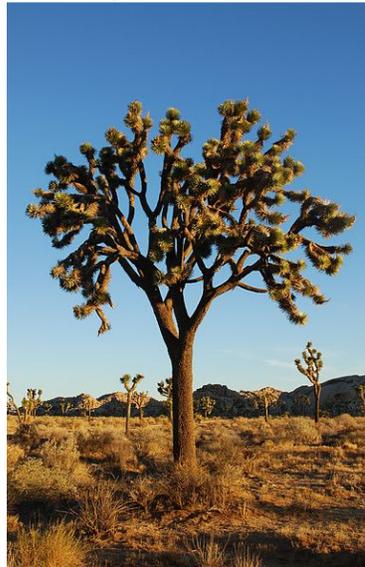
Dado que el tema de la vegetación es de gran importancia en el presente Trabajo de Título, y que ese tema se trabajará de manera conceptual y cualitativa, se decidió separar en un acápite distinto del resto de la revisión bibliográfica. Por lo mismo, sobre este tema en específico se realizó una investigación particularmente profunda.

El tema de la relación entre el agua subterránea y sus variaciones y la vegetación en la superficie no es en ningún caso un tema nuevo. El primer documento extenso y macizo sobre el tema es “*Plants as Indicators of Groundwater*” publicado en 1927 cuyo autor es Oscar Edward Meinzer, investigador del United States Geological Survey (USGS) y que dada su importancia sigue siendo muy citado hasta hoy. Se trata del primer intento por intentar explicar con base científica el comportamiento de varios tipos de vegetación al haber cambios en los niveles de agua subterránea. Así, este documento comienza con la definición de los dos tipos de flora que se dan en climas áridos o semiáridos:

- Xerófitas: plantas adaptadas a una economía extrema del agua, las cuales dependen de las lluvias que ocurren en largos intervalos de tiempo para su suministro escaso de agua y las cuales durante prolongados períodos de sequía se mantienen prácticamente en una condición latente. Un ejemplo de planta xerófita en la Figura 8.1:

Figura 8.1

Ejemplo de una planta xerófita (*Joshua Tree*).



Fuente: Wikipedia.

- Freatofitas: plantas que crecen generalmente en lugares donde puedan extender sus raíces hasta la capa freática o a la zona de ascenso capilar, y que por lo tanto son capaces de obtener un suministro de agua de largo plazo y seguro. Un ejemplo de planta xerófita en la Figura 8.2:

Figura 8.2
Ejemplo de una planta freatofita (*Poplar Grove*).



Fuente: Wikipedia.

Meinzer (1927) establece que la evidencia de que hay cierto tipo de plantas que se adapta y obtiene el agua a partir de agua subterránea se puede separar en 5 grupos:

1. Observaciones de raíces que penetran profundamente el suelo.
2. Experimentos en que se mide la extracción de agua subterránea.
3. Determinación de la humedad del suelo mostrando que las plantas son suministradas mediante humedad levantada desde la capa freática por capilaridad.
4. Crecimiento de las plantas freatofitas durante temporadas secas.
5. Correlación de la distribución de plantas freatofitas en áreas que tienen profundidades características a la capa freática.

Se indica que si bien la textura y alcalinidad del suelo tienen un rol importante en el tipo de vegetación, el factor principal es la profundidad a la capa freática.

Luego, se revisa la historia del tema. Y va desde Vitruvio (arquitecto e ingeniero romano del tiempo de Cristo) quien fue el primero en señalar que ciertas plantas eran indicadores de la presencia de agua subterránea en determinados lugares, hasta G. E. P. Smith y J. J. Thornber, quienes fueron pioneros del tema a comienzos del siglo XX. Se menciona también que gran parte de los avances se dieron en Estados Unidos, principalmente por la necesidad generada a partir de tener una gran parte del territorio (aproximadamente un sexto) de desierto, a diferencia de Francia o Alemania donde no tenían este problema.

Por otro lado, un artículo académico de 1928 (1 año después del de Meinzer) llamado “*Change in Plant Associations by Change in Groundwater Level*” de Kirk Bryan, profesor de la

Universidad de Harvard. Tiene como punto de inicio el documento de Meinzer, pero se enfoca en la baja en niveles de agua subterránea generados por la formación y ensanchamiento de cursos de agua (“*arroyo-cutting*”), y en el consecuente impacto en la vegetación.

Se refiere en particular a casos de estudio en el suroeste de Estados Unidos, donde en esa época se observaron cambios muy profundos en el paisaje. De hecho, el impacto de asentamientos humanos y sus diversas actividades comenzó a hacerse más fuerte desde la década de 1870-1880, y el artículo es apenas 40 a 50 años posterior. Así, donde antes se veían naturalmente álamos, sauces y mezquite (especies botánicas que se encuentran principalmente en zonas áridas y semi-áridas de México y Estados Unidos), y en los ríos habitaban numerosos castores, ahora sólo se veían plantas y vegetación características de las aguas subterráneas, con presencia mayoritaria de mezquite.

Se señala por último que la razón de la profundización de los cauces de los diferentes cursos de agua es el pastoreo excesivo de animales domésticos. La consecuente pérdida de cobertura vegetativa aumentó el poder erosivo de los cursos de agua. Aunque también había razones para creer que la razón en realidad es el cambio a un clima más seco, lo que dejaría en un segundo plano el pastoreo excesivo como causa de la profundización de los cauces. Ejemplos de este proceso se presentan en la Figura 8.3:

Figura 8.3

Ejemplos de formación de arroyos en el suroeste de EE.UU.



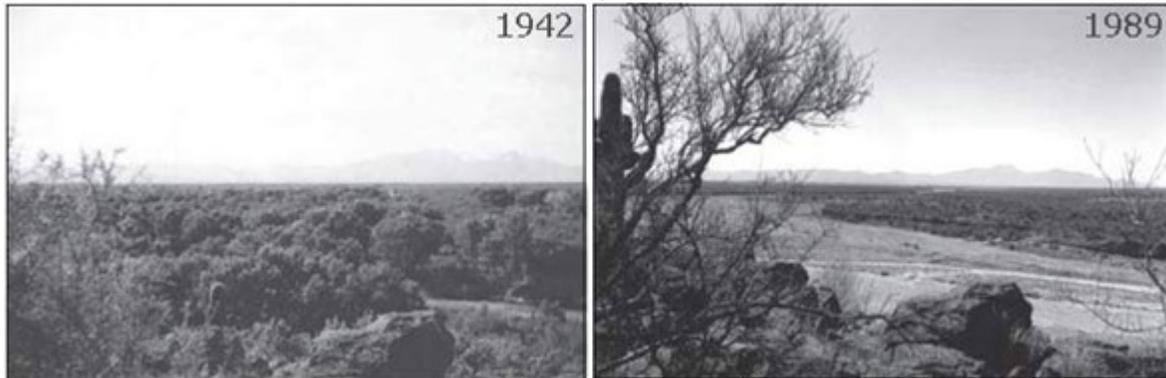
Fuente: USGS.

En cuanto al efecto de las variaciones en el nivel de aguas subterráneas, en “*Effects of Groundwater Decline on Riparian Vegetation of Semiarid Regions: the San Pedro, Arizona*” (Stromberg et al, 1996) se señala que las bajas en los niveles de agua subterránea y el secado de cursos de agua han contribuido a la pérdida y alteración de ecosistemas húmedos y ribereños en todo el mundo. Esto es particularmente cierto en regiones áridas y semiáridas, dado que la superficie y el agua subterránea tienen una gran demanda para uso humano y también ejercen una fuerte influencia en la abundancia y composición de la vegetación ribereña. En el suroeste de Estados Unidos, donde se ha presentado con mucha fuerza este problema (Figura 8.4), se menciona que en algunos sectores la combinación de desvíos de cursos de agua superficial y

extracción de agua subterránea por sobre la capacidad de recarga han causado que ríos perennes se conviertan en efímeros, y ha causado que aguas subterráneas poco profundas bajen su nivel hasta 200 metros. Los efectos de la reducción del agua van desde la pérdida total de la vegetación ribereña hasta impactos más sutiles.

Figura 8.4

Río Santa Cruz cerca de Tucson, Arizona. Se puede ver que en 1942 la vegetación tenía agua suficiente para crecer en la ribera del río, mientras que en 1989 el nivel ha bajado tanto que los árboles han desaparecido.



Fuente: USGS.

A continuación, se hace una descripción del área de estudio y la forma en que se llevó a cabo el estudio, además de organizar la vegetación entre plantas que pueden vivir en humedales exclusivamente, las que tienen la capacidad de vivir en humedales, las que tienen igual probabilidad de vivir tanto en humedales como no humedales, las que tienen la capacidad de vivir en no humedales y las que pueden vivir exclusivamente en no humedales.

Se concluye que futuras bajas en los niveles de agua subterránea generarían un gran impacto en las pocas zonas en que quedan plantas que requieren niveles de agua subterránea cercanos a la superficie, disminuyendo aún más su presencia y aumentando significativamente la de plantas características de grandes profundidades hasta el agua subterránea. Se predice que futuras bajas en los niveles de agua generarán una desertificación de la zona ribereña al río, con la consecuente pérdida de biodiversidad debido a la desaparición de plantas de humedales sensibles. Para mantener la integridad biológica de los ecosistemas sería esencial mantener redes de monitoreo permanente de la vegetación; monitorear la profundidad al agua subterránea en una cantidad adecuada de pozos en el sector, y establecer políticas de gestión sustentable del agua en el sector, que disminuyan o a lo menos estabilicen las bajas en el nivel de agua subterránea.

En los últimos años, ha aumentado considerablemente la investigación y las publicaciones académicas sobre el tema en China, donde debido al aumento de la población y a la intensa actividad económica se han generado los mismos problemas debidos al descenso del nivel de agua subterránea. Este esfuerzo ha sido liderado por la Academia China de Ciencias.

“Simulation of the Effects of Groundwater Level on Vegetation Change by Combining FEFLOW Software” de Zhao et al (2005) comienza estableciendo que la relación acoplada entre cambios en la vegetación y profundidad del agua subterránea es importante en zonas áridas, y en consecuencia ha recibido gran atención en los últimos 20 años. Dada la disminución de la

disponibilidad del agua superficial, el crecimiento de las plantas pasa a depender de la precipitación y del agua subterránea en las cuencas de ríos continentales.

Se señala que hay dos dificultades principales en lo relativo a la modelación de la relación acoplada entre los efectos del flujo de agua subterránea y los cambios en la vegetación a escala regional. Estos son el procesamiento de una gran cantidad de datos espaciales regionales y cálculos numéricos complejos.

Por otro lado, se explica que la recarga vertical de aguas subterráneas incluye mayormente la percolación del agua irrigada, la precipitación y el agua condensada, mientras que la descarga vertical es en su mayoría el bombeo de agua subterránea, la evapotranspiración de las plantas y la evaporación desde la superficie del suelo en áreas donde la profundidad al agua subterránea es baja. Pero muchos años de sobreexplotación en las cuencas de ríos continentales ha derivado en un reemplazo de la descarga natural por explotación artificial, una baja en los niveles de agua subterránea en las partes altas, desecación de pantanos y manantiales en la zona marginal de los abanicos aluviales, salinización secundaria del suelo en extensas áreas en las zonas bajas y degeneración de la vegetación natural en los desiertos.

Luego se explica cómo se llevará a cabo la observación de los cambios en la vegetación, la medición de los niveles de agua subterránea, el desarrollo de los modelos matemáticos y los parámetros que se tomarán en cuenta. También se determina el comportamiento para cada una de las plantas analizadas, viendo si funcionan como fuente o pérdida de agua y de qué forma lo hacen según sea el caso.

Finalmente, luego de procesar la información espacial de la vegetación con GIS y el modelo FEFLOW para la cuenca del río Sangong en China, se concluye que el nivel de agua subterránea tiene una tendencia a la baja en la parte alta de los abanicos aluviales, mientras que tiene una tendencia al alza en las planicies, de mantenerse más o menos constante la situación actual. Por lo tanto, en ese momento se necesitaban más estudios para determinar el volumen racional de explotación de agua subterránea y el rango adecuado para la variación del nivel piezométrico, y desarrollar modelos de explotación agua-suelo basados en la utilización sustentable de los recursos (agua y suelo).

Otro artículo sobre el tema proveniente de China es "*Physiological Responses of Three Contrasting Plant Species to Groundwater Level Changes in an Arid Environment*" de Zhuang y Chen (2005). Se sostiene que en regiones áridas y semiáridas, el agua es el factor más limitante para el asentamiento y crecimiento de las plantas, su fisiología, la dinámica de los nutrientes y la productividad del ecosistema. Entender los impactos de las limitaciones ambientales que prevalecen y la respuesta de las plantas es fundamental para entender el manejo efectivo de ecosistemas bajo condiciones de cambio climático y creciente actividad antropogénica.

Son muchos los procesos fisiológicos y bioquímicos que pueden reflejar la respuesta de las plantas frente a estrés medioambiental. Un ejemplo es cuando las células de las plantas, frente a la falta de agua, acumulan cierto tipo de solutos para mejorar su resistencia a la sequía disminuyendo su potencial hídrico y manteniendo la presión de turgencia. La respuesta de las plantas mediante mecanismos como el anterior frente a restricciones ambientales puede indicar niveles de adaptación de las plantas ante hábitat adversos.

El caso de estudio es la cuenca del río Tarim en Xinjiang, al oeste de China (Figura 8.5). Ahí, severas condiciones de sequía, viento y salinidad contribuyen a tener una escasa cobertura vegetal.

Los cambios en los niveles de agua subterránea a lo largo del río Tarim debido al histórico embalsamiento y a recientes esfuerzos de recarga artificial de acuíferos han afectado fuertemente el crecimiento y los procesos ecosistémicos de la vegetación local.

Figura 8.5
Ubicación de la cuenca del río Tarim en China.



Fuente: Yale Environment 360.

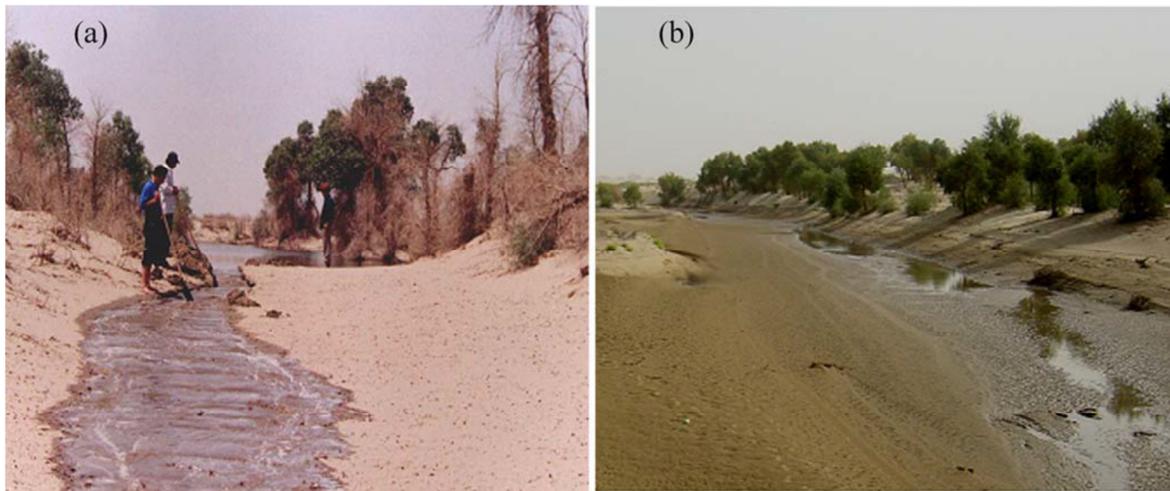
Finalmente, se entregan los resultados de la correlación de diversos parámetros y compuestos de los 3 tipos de plantas analizadas con el nivel de agua subterránea, obteniéndose relaciones de mayor a menor sensibilidad de los compuestos, así como de las plantas (cuál es más resistente a las sequías por ejemplo). Se explica que todos los tipos de plantas estudiados están experimentando una marcada degradación debido a cambios en los niveles de agua subterránea. En un esfuerzo por restaurar la vegetación local a lo largo del río Tarim, desde el 2000 se instauró un programa de recarga artificial de agua, lo que ha elevado los niveles de agua subterránea. El entendimiento de la influencia del agua subterránea sobre el crecimiento y la función fisiológica de las plantas en cuestión no sólo promoverá un entendimiento de los mecanismos de resistencia a la sequía, sino que también proveerá de un respaldo científico y una guía teórica para estimar el monto de agua ecológica necesaria (denominado actualmente caudal ecológico) para acelerar la recuperación del “Corredor Verde” (se le llama así a las partes bajas del río Tarim que van entre el desierto de Taklimakan y el desierto de Kuluk).

Diferentes plantas han desarrollado distintos mecanismos de resistencia a la sequía. En el río Tarim, la composición, distribución y vigor de crecimiento de la vegetación están fuertemente

relacionados con el nivel de agua subterránea. Desde la parte alta a la baja, la comunidad vegetal cambia con el descenso del nivel de agua subterránea desde una mezcla de árboles, arbustos y hierbas a simplemente matorrales de arbustos.

Un artículo que también se desarrolla enfocándose en el río Tarim es “*Response of Riparian Vegetation to Water-Table Changes in the Lower Reaches of Tarim River, Xinjiang Uygur, China*” de Chen et al (2008). Este artículo se concentra en el impacto que ha tenido en la vegetación del sector las variaciones en los niveles freáticos como consecuencia de un proceso de recarga artificial de acuíferos que se ha llevado a cabo desde el 2000 para mejorar el sistema ecológico ribereño. Este consiste en el traspaso de agua desde el río Konqi a través de un canal de 927 km de largo, y se habían realizado 8 entregas hasta el año de publicación del artículo, aumentando considerablemente el nivel del agua desde una profundidad de 9,87 m antes de las entregas hasta 3,16 m después de la tercera entrega. En la Figura 8.6 se puede ver una comparación entre antes y después de las entregas. El acuífero ha sido afectado hasta 1050 metros desde la orilla del río después de la cuarta entrega de agua. La vegetación ribereña ha cambiado su composición, tipo, distribución y comportamiento de crecimiento, lo que muestra que las entregas intermitentes de agua han tenido efectos significativos en la restauración de los sistemas ecológicos ribereños.

Figura 8.6
Condiciones de la vegetación a) antes de las entregas y b) después de las entregas en las partes bajas del río Tarim.



Fuente: YN Chen (2008).

Se señala que la vegetación natural en zonas áridas juega un rol muy importante en la conservación de la biodiversidad y reducción de la desertificación. En estas zonas la actividad biológica es limitada y los ecosistemas son pequeños e inestables, por lo que cambios en el nivel de agua afectan directamente el desarrollo y la composición de la vegetación.

Cuando los otros factores ecológicos no limitan el crecimiento de las plantas, hay un nivel de agua óptimo sobre el cual la vegetación se puede desarrollar al máximo, y bajo el cual el crecimiento de las plantas se ve significativamente limitado. La vegetación puede morir de mantenerse tales condiciones por períodos largos de tiempo. De todas formas, la relación entre cambios en el nivel de agua y el estado de la vegetación es complejo, representando un equilibrio

dinámico entre agua subterránea, suelo y vegetación. Esta relación se ha convertido en un elemento clave en el estudio mundial de los recursos hídricos en regiones áridas.

El río Tarim, con 1321 km de largo, es el río interior más largo en China con la dualidad de poseer abundantes recursos naturales y un ambiente ecológico frágil. En los últimos 50 años, bajo el impacto de actividades antropogénicas intensivas en el uso de agua, los procesos biológicos naturales han experimentado cambios mayores, y los conflictos entre economía y ecología sobre el uso del agua se han hecho cada vez más fuertes.

El nivel del agua ha disminuido de un rango de 3-5 m a 8-12 m en las décadas pasadas. La vegetación natural que se mantenía con el agua subterránea ha sido significativamente degradada. Esto, a su vez, ha aumentado la erosión del viento y el movimiento de arena han aumentado, acelerando la desertificación y destruyendo ecosistemas naturales.

La región es extremadamente árida. La precipitación anual varía en el rango de 17-42 mm, y la evaporación potencial total anual es de 2500-3000 mm. Fuertes vientos soplan frecuentemente en la región. La vegetación de la orilla del río provee de una defensa natural contra el viento obstruyendo el movimiento de la arena.

Entre los resultados obtenidos a partir del trabajo, hay dos que interesan particularmente: la relación entre vegetación y el nivel de agua antes y después de las entregas de agua.

Para antes de la entrega, se obtuvo que características como la composición, distribución y crecimiento de la vegetación ribereña están estrechamente relacionados con la condición de aguas subterráneas. Luego de desarrollar los resultados para los diferentes tipos de plantas en las diferentes secciones del río, se establece que la cobertura, densidad y abundancia de la comunidad vegetal decrecen con el aumento de la profundidad del agua subterránea. Y también la estrecha relación que hay entre la vegetación natural y la profundidad del nivel del agua en la zona de estudio.

Después de la entrega, en el artículo se afirma que se pudo ver que el cambio en el nivel de aguas subterráneas someras tiene influencia directa en el desarrollo de la vegetación natural. Una vez hechas las entregas, el cambio de la vegetación natural estuvo estrechamente relacionado con el aumento del nivel freático tanto en la dirección longitudinal como transversal del río. Algunos tipos de planta aparecieron de nuevo profusamente en el área de estudio. Algunos árboles y arbustos tolerantes a la sequía fueron restaurados juntos cuando el agua alcanzó su profundidad óptima común de entre 4-6 m.

Dado que diferentes plantas requieren profundidades óptimas diferentes, las sensibilidades de las plantas a cambios en los niveles del agua subterránea son distintas. Para un tipo de planta por ejemplo, se vio que las características de las hojas son altamente sensibles a cambios en los niveles de agua. En la dirección transversal, el peso, largo y el ancho de las hojas son mayores a 50 metros del río y disminuyen a medida que se hace más grande la distancia desde el canal del río.

La medición de las nuevas ramas de otro tipo de planta y el número, largo, ancho y peso de 50 de las hojas de esas nuevas ramas muestran que el crecimiento de la planta tiene una respuesta activa al aumento en el agua subterránea en todas las locaciones. Se determinó que el rango de respuesta en la dirección transversal va desde 200 a 250 m.

Por último, se concluye que la duración y el volumen de agua de cada entrega están estrechamente relacionados con la restauración de la vegetación en el curso inferior del río Tarim.

El último artículo revisado con aplicación a un caso de estudio en China es “*Vegetation dynamics induced by groundwater fluctuations in the lower Heihe River Basin, northwestern China*” de Wang et al (2011).

Figura 8.7
Imagen de la sección media de la cuenca del río Heihe.



Fuente: College Of Engineering, Peking University.

El artículo está en el marco del Proyecto de Controles de Flujo Medioambiental (EFCP por sus siglas en inglés) que se ha llevado a cabo desde el 2000 en la parte baja de la cuenca del río Heihe, una típica cuenca árida interior del noroeste de China (Figura 8.7), para restaurar el deteriorado medioambiente ecológico de esta región.

Se afirma que las dinámicas espacio-temporales de la vegetación en regiones áridas y semiáridas están determinados en gran medida por la disponibilidad de agua. El agua subterránea es una importante fuente de agua para muchas plantas, sobre todo en zonas áridas y semiáridas, donde el agua subterránea mantiene una gran densidad de vegetación proporcionando agua adicional para el crecimiento y la transpiración de las plantas. Además, el agua subterránea, como parte del total de los recursos hídricos, juega un rol dominante en la protección del medioambiente. Entender las respuestas de la dinámica de las plantas a los cambios en los niveles de agua subterránea es crucial para la mejora sustentable de los ecosistemas en regiones áridas.

En las zonas áridas, dada la marcada falta de lluvias, la vegetación natural en estas regiones se distribuye mayoritariamente a lo largo de ríos o donde el agua subterránea tiene una profundidad y salinidad adecuadas para permitir el crecimiento de las plantas. En los últimos años, la baja en los niveles de agua subterránea ha amenazado muchos ecosistemas ribereños en

las regiones áridas y semiáridas del planeta. Las interacciones vegetación-agua subterránea se están convirtiendo en el foco de un renovado interés relacionado con los efectos de las fluctuaciones del nivel de agua subterránea sobre las plantas y comunidades vegetales. Estudios recientes han entregado más información y cada vez más precisa sobre la respuesta de la cobertura vegetal y del funcionamiento de los ecosistemas frente a cambios en los niveles de agua subterránea en regiones áridas y semiáridas.

Luego, después de hacer una descripción de la zona de estudio (el río Heihe es el segundo más largo de China) y de la metodología con la que se llevó a cabo el artículo, se presentan los resultados. Se concluye que el agua subterránea es un factor clave que controla la dinámica de la vegetación en esta zona árida. Además, las fluctuaciones del nivel freático fueron a menudo acompañadas por un aumento en la salinidad del agua. Así, el aumento del estrés de salinidad en las plantas puede compensar la restauración de la vegetación que se da gracias al alivio del estrés hídrico.

Se mencionan tres tipos de vegetación que son las predominantes en el oasis de la zona de estudio. Estas especies juegan un rol muy importante en la mantención de la función del ecosistema en la zona árida, dada su tolerancia a una sequía severa y a una alta salinidad y alcalinidad en los suelos. El foco está en la *P. Euphratica* (Figura 8.8) que se sabe de estudios anteriores que depende fuertemente de los cambios en los niveles de agua y que su profundidad para desarrollarse normalmente es aprox. 4,5 metros, y la profundidad crítica de supervivencia está entre los 9-10 m. En la zona de estudio, la profundidad del nivel freático medido fue desde 0,8 a 8,3 m, con un valor promedio de 3 m y una mediana de 2,9 m. Por lo tanto, la profundidad permite el desarrollo de vegetación ribereña desértica.

Figura 8.8
Imagen de *Populus Euphratica*.



Fuente: Technische Universität Bergakademie Freiberg.

Por otro lado, la salinidad del agua subterránea, que es otro importante factor que directa o indirectamente afecta el crecimiento de las plantas, varió entre 1,2% a 9,8% durante el período de estudio.

Se pudo observar que la vegetación mejoraba o empeoraba con el nivel freático aumentando o disminuyendo, respectivamente. La aparente respuesta de la vegetación a cambios en los niveles de agua subterránea sucede cuando la profundidad del nivel freático varía entre 1,8 y 3,5 m. Anteriormente se había encontrado que este rango era de 2-4 m, por lo que es consistente.

Se encontró que para niveles de agua subterránea bajo un nivel crítico, la influencia de ésta sobre la vegetación es muy limitada. El nivel crítico es una profundidad de 4,5 m. Con la implementación del EFCP, hubo una recuperación de los ríos, que trajo aparejado una mejora en la condición medioambiental del agua subterránea. Se señala que es claro que la mejora integral de las condiciones del agua subterránea es el factor más crucial para la restauración de la vegetación.

Otro punto importante es que, con el aumento de la población y la actividad económica, se construyeron muchos canales para reemplazar ríos naturales a lo largo de toda el área de estudio. Esto ha prevenido de forma directa que agua superficial llegue a las llanuras de inundación y recarguen el agua subterránea como lo hacían antes de la construcción de los canales.

Finalmente, se concluye que se tiene una notable correlación entre el estado de la vegetación y el nivel freático cuando éste último fluctúa entre 1,8 y 3,5 m. Cuando la profundidad fue mayor a 5 o 6 m, las condiciones de la vegetación no mostraron una respuesta clara frente a fluctuaciones del nivel freático. Después de la implementación de controles al flujo medioambiental, el nivel freático varió notablemente en toda el área de estudio (0,5 m en la parte alta y 1,5 m en la parte abajo, en promedio). Esto tuvo como consecuencia una mejora integral de la vegetación. Las áreas de restauración de la vegetación se distribuyeron en su mayoría en zona ribereñas entre 500-1000 m de los cursos naturales de los ríos.

A futuro, se señala que el aumento de la salinidad del suelo neutralizará la restauración de la vegetación que se da por el relajo del estrés hídrico, aún cuando el nivel freático aumente. En este caso, el mecanismo de respuesta de la vegetación a los cambios del agua subterránea, tanto en su nivel como su salinidad, parece ser particularmente complicado. En ese momento se recomendaba hacer más investigación científica para ahondar en la explicación de este fenómeno. Para finalizar, se revisó un artículo que hace un recorrido por lo que se está investigando en el ámbito de la relación entre la vegetación y cambios en los niveles de agua subterránea. El artículo lleva por nombre "*Phreatophytic Vegetation and Groundwater Fluctuations: A Review of Current Research and Application of Ecosystem Response Modeling with an Emphasis on Great Basin Vegetation*", de Naumburg et al (2005).

Comienza señalando, como la mayoría de los artículos revisados, que el agua subterránea es una fuente importante para las plantas y los seres humanos, especialmente en las zonas áridas y semi áridas. Ahí, las aguas subterráneas someras mantienen una densidad mayor de vegetación que en áreas con niveles freáticos más profundos aportando agua adicional para el crecimiento y transpiración de las plantas. Entender la relación entre la vegetación y las dinámicas del agua

subterránea es crucial para gestionar y mantener ecosistemas saludables, al mismo tiempo que para proveer agua para el uso humano.

Es ampliamente reconocido que un aumento en la profundidad del agua subterránea puede ser perjudicial para la vegetación, aunque puede no ser tan reconocido que un aumento del nivel freático también puede ser perjudicial.

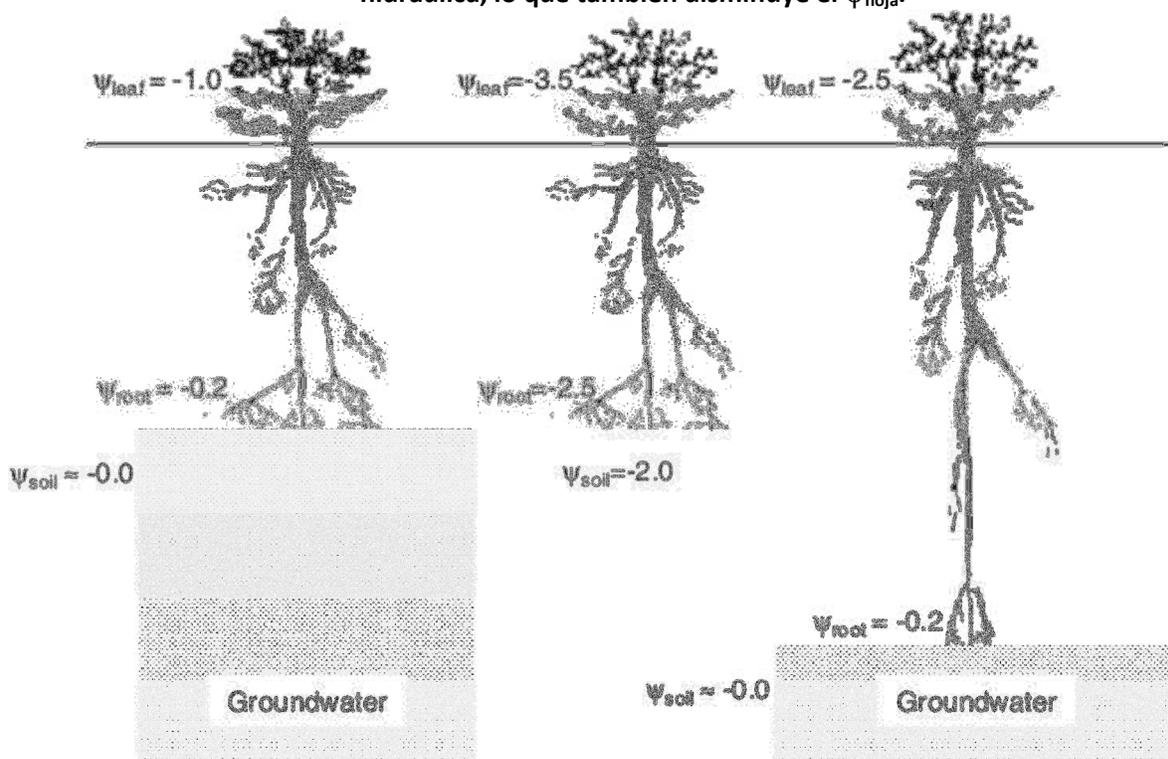
Se define freatofita como una planta que crece ahí donde la precipitación es insuficiente para sobrevivir en el largo plazo y, en consecuencia, requiere de agua subterránea en ese ambiente específico. El destino de plantas más tolerantes al estrés hídrico puede ir desde pérdida menor de biomasa hasta una muerte descendiente significativa.

Un nivel freático descendiente disminuye el acceso a una fuente permanente de agua y puede causar estrés hídrico. También deja a su paso perfiles de suelo aireados en capacidad de campo que están disponibles para la exploración de nuevas raíces. Sí el agua subterránea restringe severamente la zona radicular activa, este escenario puede beneficiar a la vegetación. Hasta un límite, aguas subterráneas más profundas también aumentan el volumen de suelo disponible para el almacenamiento de la precipitación y del agua elevada hidráulicamente, la que puede aumentar significativamente el uso de agua y el crecimiento de las plantas. Aunque un nivel freático que disminuye puede beneficiar a la vegetación, en la literatura contiene relativamente pocos ejemplos de ello.

Continuando con el artículo, se señala que entre los efectos perjudiciales que tiene para la vegetación una disminución del nivel freático, está la disminución del agua disponible en el suelo en áreas donde el nivel freático está dentro de la zona radicular. Los déficit hídricos le ponen presión a la vegetación que está creciendo y pueden llevar a numerosos cambios fisiológicos. Como la transpiración sucede en la superficie de la hoja, el agua es elevada desde el suelo a las raíces y conducida a través de los conductos del xilema en las plantas. El agua dentro del xilema está bajo tensión, por lo que la presión del xilema es negativa. Con una disminución del agua disponible en el suelo, la tensión en el xilema aumenta y el potencial hídrico de las hojas se hace más negativo. Un esquema de la situación descrita se presenta en la Figura 8.9:

Figura 8.9

Esquema idealizado de las relaciones entre vegetación y agua bajo diferentes regímenes de agua subterránea (agua subterránea alta, ausente y baja). Para que las hojas reciban agua, su potencial hídrico debe ser más negativo que el del suelo, lo que lleva a ψ_{hoja} más bajos cuando el suelo se seca. También, el camino del transporte de agua se hace más largo, disminuyendo la conductancia hidráulica, lo que también disminuye el ψ_{hoja} .



Fuente: Naumburg (2005).

Las plantas pueden tolerar disminuciones del nivel freático hasta cierto umbral específico de cada especie, más allá del cual se genera cavitación en el xilema, lo que impide cualquier movimiento en éste. Una pérdida parcial de hojas y ramas a consecuencia de la sequía puede, sin embargo, facilitar la sobrevivencia de las plantas ya que reduce las necesidades de la planta como un todo.

Mientras los árboles ribereños, debido a su baja tolerancia a la cavitación en el xilema, sufren mortalidad de las ramas y/o de las copas cuando se les corta el acceso al agua subterránea, los arbustos freatofitos pueden sobrevivir a bajas significativas del nivel freático, pero pueden sufrir la pérdida de ramas y hojas. Así, existen grandes diferencias en su habilidad para resistir estrés hídrico entre especies que usan agua subterránea en zonas áridas. Conocer las diferencias específicas entre tipos de vegetación en sus habilidades para soportar bajos potenciales hídricos se convierte en una pieza clave para entender el grado de daño a la vegetación bajo estrés hídrico. La raíz de las plantas puede permanecer en contacto con un nivel freático decreciente si la tasa de disminución no excede la tasa de crecimiento potencial de las raíces. Los espacios húmedos que quedan en el suelo tras una baja en el nivel freático pueden facilitar la proliferación de raíces con la profundidad. Diversos estudios han mostrado que la tasa a la que disminuye el nivel freático puede ser tan importante como el cambio absoluto en éste. Se estima que la máxima tasa de crecimiento de arbustos y especies de hierbas áridas varía en un rango de 3 a 15 mm/día, mientras que las raíces del maíz pueden crecer a tasas de 60 mm/día. Sin embargo, como las plantas

freatofitas xéricas pueden tolerar el estrés hídrico mejor que las especies ribereñas, el contacto constante con el agua subterránea puede ser menos crucial, y las capas de suelo húmedas que la baja en el nivel freático deja atrás pueden ser suficientes para mantener la biomasa.

La vegetación puede adaptarse a la baja en el nivel freático usando otras fuentes de agua. Las plantas usan la humedad superficial del suelo preferentemente si es abundante y cambian a aguas subterráneas o a capas más profundas del suelo a medida que las capas más superficiales se van secando. Así, el impacto de una baja en el nivel freático debiera ser menos severo en años con alta precipitación. Aunque hay que considerar que hay límites en el uso de la humedad superficial si las raíces superficiales han perdido su capacidad de absorción de agua después de temporadas secas.

Cuando el agua subterránea disminuye, la cantidad de agua disponible para las raíces en capas de suelo más profundas disminuye también, pero el alzamiento hidráulico (*hydraulic lift*) puede proveer humedad adicional en las capas de suelo superiores. El alzamiento hidráulico ocurre cuando la transpiración cesa (usualmente de noche) y el agua se mueve desde capas de suelo más profundas y húmedas a otras más superficiales y secas mediante los sistemas de raíces de las plantas. Cantidades importantes de agua pueden ser elevadas a lo largo de la noche, contribuyendo hasta la mitad de la transpiración del día siguiente dada la mayor cantidad de humedad disponible. Así, este proceso puede mitigar los efectos de niveles de agua decrecientes mientras las raíces mantengan contacto con la zona saturada.

La severidad del estrés hídrico que enfrentan las plantas durante una baja del nivel freático depende parcialmente de factores externos, tales como la cantidad de precipitaciones, tipo de suelo y conductividad hidráulica, profundidad, tasa, y duración y tiempo de la disminución del agua, y la estabilidad histórica del nivel freático. En diferentes áreas sometidas a una baja de las aguas subterráneas, el estado hídrico de la vegetación puede variar significativamente dependiendo del tipo de suelo.

En cuanto a la respuesta de las plantas frente a aumentos del nivel freático, esto puede saturar la zona radicular, y la anoxia resultante presiona el crecimiento de la vegetación dada la falta de oxígeno requerida para la respiración aeróbica. En respuesta a esto, las plantas pasan a metabolismo anaeróbico, lo que inicialmente causa una acumulación de productos tóxicos y muerte celular. Las plantas que no toleran largos períodos de anoxia usualmente mueren. Como consecuencia de la baja en el funcionamiento de las raíces y su muerte, el transporte de agua disminuye. Así, las respuestas de la planta completa se asemejan a las que entrega frente a estrés hídrico.

Las especies vegetales tolerantes a las inundaciones han desarrollado un número de adaptaciones que les permiten hacer frente a períodos de saturación del suelo y anoxia, primordialmente aumentando el suministro de oxígeno a las raíces.

Como el aumento del nivel freático puede disminuir la zona radicular y causar la muerte de las raíces existentes, puede haber efectos negativos en el crecimiento sobre el suelo. Por ejemplo, períodos de alta escorrentía tuvieron como resultado un aumento del nivel freático, lo que gatilló una disminución de la biomasa superficial, muerte de raíces y mortalidad de freatofitas xéricas. Incluso las especies que tienen altos requerimientos de agua muestran respuestas negativas frente a incrementos o niveles muy altos del agua subterránea.

Por último, como los suelos saturados son dañinos para la salud de las plantas por el menor oxígeno disponible, mecanismos que mejoran el transporte de oxígeno pueden aumentar la resistencia de las plantas a la anoxia. Las aerénquimas son tejidos porosos que actúan como un sistema de transporte de gases disminuyendo la resistencia al flujo de oxígeno y otros gases en las plantas. Esto permite la llegada de oxígeno a raíces anegadas.