



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ciencias (Geotecnia)

Influencia de los ciclos de histéresis en el comportamiento mecánico
de un suelo no saturado

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestro en Ciencias (Geotecnia)

Presenta:

Ing. Javier Ramírez Jiménez

Dirigido por:

Dr. Jaime Moisés Horta Rangel

Dr. Jaime Moisés Horta Rangel

Presidente

Dr. Eduardo Rojas González

Secretario

Dra. María de la Luz Pérez Rea

Vocal

Dra. Teresa López Lara

Suplente

Dr. Omar Chávez Alegría

Suplente

Centro Universitario, Querétaro, Qro.

Diciembre 2020

México

“El primer principio es que no te debes engañar a ti mismo, y tú eres la persona que más fácilmente te engaña”

Richard Feynman

Dirección General de Bibliotecas de la UAQ

Dedicatoria

Por apoyarme toda la vida, este trabajo lo dedico a mi madre, padre y hermana.

Dirección General de Bibliotecas de la UAQ

Agradecimientos

A mi familia, por aconsejarme y desear lo mejor para mí, pero dejándome tomar mis propias decisiones; como cuando a partir de los doce años dediqué miles de horas a mi formación como ajedrecista o cuando les planteé mi interés por iniciar estudios de posgrado.

A Natalie, por su incondicional apoyo, amor, consejos y por estar ahí cada vez que necesitaba ser escuchado.

A mis amigos, Juan Pablo, Nayeli, Erick y Pamela, por compartir tanto risas como conocimiento a lo largo de más de dos años.

A mi director de tesis, Dr. Jaime Moisés Horta Rangel, por su entera disponibilidad, dedicación y apoyo oportuno en todas las fases de este proyecto de investigación.

A la Dra. María de la Luz Pérez Rea, por su incansable apoyo a todos los estudiantes, quien fue mi primer contacto con la Universidad Autónoma de Querétaro y fue mi guía en el proceso para ingresar.

A mis sinodales: Dr. Eduardo Rojas González, Dra. Teresa López Lara y Dr. Omar Chávez Alegría; quienes, con su entrega a la investigación y a la docencia, hicieron de mi paso por la Universidad Autónoma de Querétaro una de las experiencias más enriquecedoras que he tenido.

A las personas que han formado parte de mi vida, ya que creo firmemente en que somos el resultado de esas pequeñas interacciones con nuestra sociedad, me han conducido a este lugar y momento.

A la Universidad Autónoma de Querétaro, por darme la oportunidad de aprender tanto y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por la beca que me proporcionaron durante los dos años de mi formación.

Índice

Dedicatoria	2
Agradecimientos	3
Índice.....	4
Índice de tablas.....	8
Índice de figuras.....	9
Simbología	13
Resumen.....	15
Abstract	17
I. Introducción	19
I.1 Planteamiento del problema.....	19
I.2 Justificación	20
II. Antecedentes	22
II.1 El suelo no saturado.....	22
II.1.1 Fases del suelo.....	22
II.1.2 Grado de saturación.....	23
II.1.3 Succión	23
II.1.4 Capa activa	24
II.1.5 Flujo de agua en suelo no saturado.....	25
II.1.6 Conductividad hidráulica	26
II.1.7 Difusividad	26
II.1.8 El esfuerzo efectivo	27
II.1.8.1 Parámetro de esfuerzo efectivo	29
II.2 La Curva de Retención Agua-Suelo y la histéresis hidráulica	29

II.2.1	Obtención de la Curva de Retención Agua-Suelo.....	30
II.2.2	Ajuste de la Curva de Retención Agua-Suelo.....	31
II.2.3	Curvas de histéresis hidráulica o curvas secundarias.....	33
II.2.3.1	Cálculo por el método de Zhou.....	34
II.3	Problema de transferencia de calor y el método del elemento finito.....	35
II.3.1	Problema térmico transitorio.....	38
II.3.2	Método del elemento finito y ANSYS.....	38
II.3.2.1	Elemento aplicado en el modelo.....	40
III.	Hipótesis.....	41
IV.	Objetivos.....	42
IV.1	Objetivo general.....	42
IV.2	Objetivos específicos.....	42
V.	Metodología.....	43
V.1	Obtención de la CRAS.....	43
V.2	Conductividad hidráulica.....	45
V.3	Coefficiente de difusión.....	47
V.4	Succión del sitio de estudio.....	48
V.5	Modelo de precipitación-evapotranspiración.....	49
V.5.1	Método de Thornthwaite.....	50
V.5.2	Método cosinusoidal.....	51
V.6	Geometría del dominio.....	51
V.7	Análisis análogo térmico transitorio.....	52
V.8	Generación del perfil de succiones y capa activa.....	52
V.9	Selección del último ciclo de succiones máxima-mínima-máxima.....	52

V.10 Histéresis hidráulica	53
V.11 Cálculo del esfuerzo por succión	57
V.12 Estudio para el suelo en distintas condiciones	57
V.12.1 Comportamiento del esfuerzo por succión a distintas profundidades.....	58
V.12.2 Comportamiento del esfuerzo por succión a una misma profundidad.....	59
V.13 Macros del código	59
VI. Resultados y discusión	61
VI.1 Gráficas de propiedades hidráulicas	61
VI.2 Modelo de precipitación-evapotranspiración.....	64
VI.3 Dominio de suelo no saturado	66
VI.4 Análisis del suelo natural	67
VI.4.1 Cambios en la succión al paso del tiempo	67
VI.4.2 Capa activa.....	68
VI.4.3 Curvas de histéresis hidráulica	69
VI.4.4 Esfuerzos por succión	72
VI.5 Análisis del suelo con losa de cimentación.....	74
VI.5.1 Cambios en la succión al paso del tiempo	74
VI.5.2 Capa activa.....	76
VI.5.3 Curvas de histéresis hidráulica	78
VI.5.4 Esfuerzos por succión	80
VII. Conclusiones	85
VIII. Bibliografía	88
IX. Anexos	91
IX.1 Fundamentos de programación en lenguaje APDL	91

IX.1.1 Estructura del programa.....	91
IX.1.2 Parámetros o variables	91
IX.1.2.1 Parámetro escalar	91
IX.1.2.2 Parámetro ARRAY	92
IX.1.2.3 Parámetro TABLE	92
IX.1.3 Ciclos	94
IX.1.4 Condicionales.....	95
IX.1.5 Creación de macros.....	97
IX.1.6 Elaboración de gráficas.....	97
IX.1.6.1 Graficar parámetros TABLE.....	97
IX.1.6.2 Graficar dominio de elementos finitos.....	101
IX.2 Código en APDL	102

Índice de tablas

Tabla II-1 Ecuaciones de conductividad hidráulica en suelos no saturados en función de la succión.....	26
Tabla II-2 Ecuaciones de esfuerzos efectivos por distintos autores, tomada de Galaviz (2016).	28
Tabla II-3 Propuestas del parámetro de esfuerzo efectivo para suelos no saturados.....	29
Tabla II-4 Parámetros de ajuste de las trayectorias principales de la CRAS para los datos de Viaene et al. (1994).	32
Tabla V-1 Uso de la CRAS en distintos dominios dentro del análisis	44
Tabla V-2 Parámetros escalares de las condiciones climáticas.	50
Tabla V-3 Parámetros escalares con la información de la geometría del dominio.....	51
Tabla V-4 Variables utilizadas para el algoritmo de histéresis hidráulica.....	53
Tabla V-5 Macros en el código del modelo de flujo para suelos no saturados.....	59
Tabla VI-1 Permeabilidades saturadas calculadas con el método de Fredlund (2012).....	63
Tabla IX-1 Etiquetas de operación disponibles para el uso del comando *IF.....	95
Tabla IX-2 Acciones posibles en un condicional *IF.....	96
Tabla IX-3 Comandos para editar los ejes de una gráfica.	98
Tabla IX-4 Etiquetas más usuales en el comando /GROPT.	98
Tabla IX-5 Claves de los colores disponibles al usar el comando /COLOR.	99

Índice de figuras

Figura II.1 Fases del suelo.	22
Figura II.2 Atracción de las partículas sólidas debido a la membrana contráctil.	23
Figura II.3 Esquema de la zona o capa activa en un suelo no saturado (Flores y Zepeda, 2004).	24
Figura II.4 Curvas principales de secado para suelos arcillosos, limosos y arenosos, tomada de Fredlund, et al. (2012).	30
Figura II.5 CRAS típica con sus elementos para un suelo limoso, tomada de Fredlund, et al. (2012).	30
Figura II.6 Curvas de calibración para dos tipos de papel filtro, tomada de ASTM D5298-16	31
Figura II.7 Ajuste de las trayectorias principales de la CRAS con el método de Zhou, et al. (2012) utilizando datos experimentales (Viaene <i>et al.</i> , 1994).	32
Figura II.8 Esquema de las curvas de histéresis hidráulica al interior de la CRAS partiendo de puntos sobre las ramas principales.	33
Figura II.9 Elementos necesarios para el cálculo de las curvas de histéresis hidráulica con el método de Zhou, et al. (2012).	35
Figura II.10 Volumen de control diferencial para balance de energía (Alawadhi, 2010).	36
Figura II.11 Geometría del elemento finito PLANE55 de ANSYS.	40
Figura V.1 CRAS experimental empleada en el análisis (Galaviz, 2016)	44
Figura V.2 Variables del algoritmo para la obtención de la conductividad hidráulica (kw) a través de la CRAS en el dominio de succión-contenido volumétrico de agua (Fredlund <i>et al.</i> , 2012).	46
Figura V.3 Variación de la succión con la profundidad en suelo de Jurica (López, 1995).	49
Figura V.4 Diagrama de flujo del algoritmo de histéresis hidráulica basado en el modelo de Zhou, et al. (2012).	55
Figura V.5 Diagrama de flujo para utilizar el algoritmo de cálculo de las curvas de histéresis hidráulica en el modelo acoplado.	56

Figura V.6 Ubicación espacial de los nodos a ser analizados en el dominio marcados en rojo y azul.	58
Figura VI.1 CRAS experimental en el dominio succión-grado de saturación, datos de Galaviz (2016).	61
Figura VI.2 CRAS experimental en el dominio succión-contenido volumétrico de agua, datos de Galaviz (2016).	62
Figura VI.3 Conductividad hidráulica obtenida al aplicar el algoritmo de Fredlund (2012).	62
Figura VI.4 Coeficiente de difusión calculado a partir del método de Li (2006), a) Respecto a la succión, b) Respecto al contenido volumétrico de agua.	64
Figura VI.5 Precipitación (rojo) y precipitación-evapotranspiración (azul) de acuerdo al método de Thornthwaite.	65
Figura VI.6 Modelo de precipitación-evapotranspiración cosinusoidal.	66
Figura VI.7 Dominio y mallado para el análisis dentro de ANSYS.	66
Figura VI.8 Succiones en el dominio al paso del tiempo para el suelo en estado natural, a) 30 días, b) 1440 días.	67
Figura VI.9 Perfiles de succión para $x=1.8$ m en los meses 34 (lila), 40 (azul) y 46 (verde).	68
Figura VI.10 Capa activa considerando una variación menor a 2 kPa en los meses 34, 40 y 46.	69
Figura VI.11 Ciclos de histéresis hidráulica en nodos con coordenadas: a) (1.8,0.0), b) (3.6,0.0), c) (6.0,0.0).	70
Figura VI.12 Ciclos de histéresis hidráulica en nodos con coordenadas: a) (1.8,-0.5), b) (3.6,-0.5), c) (6.0,-0.5)	71
Figura VI.13 Ciclos de histéresis hidráulica en nodos con coordenadas: a) (1.8,-1.0), b) (3.6,-1.0), c) (6.0,-1.0)	71
Figura VI.14 Curvas del esfuerzo por succión a distintas profundidades con separación de 0.10 m en $x=1.8$ m.	72
Figura VI.15 Esfuerzos por succión a 0.0 m de profundidad para los meses 34 (lila), 40 (azul) y 46 (verde).	73

Figura VI.16 Esfuerzos por succión a 0.5 m de profundidad para los meses 34 (lila), 40 (azul) y 46 (verde).	73
Figura VI.17 Esfuerzos por succión a 1.0 m de profundidad para los meses 34 (lila), 40 (azul) y 46 (verde).	74
Figura VI.18 Succiones en el dominio al paso del tiempo para el suelo con losa en la superficie, a) 30 días, b) 1440 días.	75
Figura VI.19 Perfiles de succión para $x=1.8$ m en los meses 34 (lila), 40 (azul) y 46 (verde).	75
Figura VI.20 Perfiles de succión para $x=3.6$ m en los meses 34 (lila), 40 (azul) y 46 (verde).	76
Figura VI.21 Perfiles de succión para $x=6.0$ m en los meses 34 (lila), 40 (azul) y 46 (verde).	76
Figura VI.22 Capa activa considerando una variación menor a 2 kPa en los meses a) 34, b) 40 y c) 46.	78
Figura VI.23 Ciclos de histéresis hidráulica en nodos con coordenadas: a) (1.8,0.0), b) (3.6,0.0), c) (6.0,0.0)	79
Figura VI.24 Ciclos de histéresis hidráulica en nodos con coordenadas: a) (1.8,-0.5), b) (3.6,-0.5), c) (6.0,-0.5).	79
Figura VI.25 Ciclos de histéresis hidráulica en nodos con coordenadas: a) (1.8,-1.0), b) (3.6,-1.0), c) (6.0,-1.0)	80
Figura VI.26 Curvas del esfuerzo por succión a distintas profundidades con separación de 0.10 m en $x=1.8$ m.	81
Figura VI.27 Curvas del esfuerzo por succión a distintas profundidades con separación de 0.10 m en $x=3.6$ m.	82
Figura VI.28 Curvas del esfuerzo por succión a distintas profundidades con separación de 0.10 m en $x=6.0$ m.	82
Figura VI.29 Esfuerzos por succión a 0.0 m de profundidad para los meses 34 (lila), 40 (azul) y 46 (verde).	83
Figura VI.30 Esfuerzos por succión a 0.5 m de profundidad para los meses 34 (lila), 40 (azul) y 46 (verde).	83

Figura VI.31 Esfuerzos por succión a 1.0 m de profundidad para los meses 34 (lila), 40 (azul) y 46 (verde).	84
Figura IX.1 Elementos del parámetro TABLE de nombre TAB.	94
Figura IX.2 Ejemplo de gráfica en ANSYS.....	101
Figura IX.3 Ventana de Controles de Numeración en ANSYS con las instrucciones seleccionadas para graficar la numeración de los nodos.....	102

Dirección General de Bibliotecas de la UAG

Simbología

Esfuerzos efectivos

σ : Esfuerzo total

σ' : Esfuerzo efectivo

u_w : Presión de poro debida al agua

u_a : Presión de poro debida al aire

$(u_a - u_w)$: Succión mátrica

χ : Parámetro de Bishop (con rango de 0 a 1)

Relaciones volumétricas y gravimétricas

V_s : Volumen de sólidos

V_w : Volumen de agua

V_a : Volumen de aire

V_v : Volumen de vacíos

W_s : Peso de sólidos

W_w : Peso de agua

γ_m : Peso volumétrico húmedo

γ_d : Peso volumétrico seco

γ_w : Peso volumétrico del agua

e : Relación de vacíos

S_s : Gravedad específica de sólidos

w : Contenido de agua

S_w : Grado de saturación

S_e : Grado de saturación efectivo

Curvas de histéresis

S_{es} : Grado de saturación efectivo en la curva de histéresis

s_w : Succión en la curva principal de humedecimiento para un grado de saturación dado

s_d : Succión en la curva principal de secado para un grado de saturación dado

s : Succión

Siglas

ASTM: *American Society for Testing and Materials*

CRAS: Curva de Retención Agua-Suelo

SUCS: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos

Dirección General de Bibliotecas de la UAQ

Resumen

Se presenta un modelo de flujo para suelos no saturados que permite determinar las variaciones de succión y el esfuerzo generado por esta variable dentro de un dominio bidimensional de forma espacial y temporal. Esto se logra al considerar el problema de flujo como un problema térmico transitorio aplicando el método del elemento finito.

Los datos experimentales utilizados corresponden a diversos autores y el sujeto de estudio es el suelo arcilloso característico de Jurica, Querétaro. También fueron requeridos datos climatológicos como la precipitación, temperatura y horas de sol para definir la cantidad de agua que entra y sale del medio.

Para el cálculo de los esfuerzos por succión fue necesario obtener el parámetro de esfuerzos efectivos dentro de la ecuación de Bishop, el parámetro χ . Este es calculado considerando la Curva de Retención Agua-Suelo y los ciclos de histéresis hidráulica que se generan al interior de esta debido a los cambios en la succión.

El modelo es aplicado en dos situaciones distintas, la primera con el suelo en estado natural y la segunda con el suelo con una membrana impermeable en una porción de su superficie (simulando la acción de una losa de cimentación).

Los resultados del análisis revelan la distribución de la succión nodal, lo que lleva a valores no constantes del parámetro de esfuerzos efectivos, sino variables en tiempo y ubicación. Al obtener los valores de la succión en los nodos del dominio fue posible establecer tanto los perfiles de succión como la capa activa.

Los esfuerzos por succión al paso del tiempo van reduciéndose a medida que la profundidad aumenta; otro fenómeno que se pudo observar al evaluar los esfuerzos a distintas profundidades, es que tanto los valores máximos como mínimos no se presentan de manera simultánea, sino desfasada.

Al evaluar los esfuerzos por succión a una misma profundidad a lo largo del eje horizontal se pudo ver que son constantes para el caso del suelo natural, las variaciones se observan al comparar meses distintos. Para el caso del suelo con la membrana, independientemente del

mes de estudio, los esfuerzos bajo ella permanecen casi constantes, pero son distintos a los esfuerzos generados en la zona de entrada y salida de flujo, pudiendo ser menores o mayores dependiendo de la época de humedad o sequía.

Palabras clave: modelo de flujo, histéresis hidráulica, esfuerzo por succión, método del elemento finito.

Dirección General de Bibliotecas de la UAO

Abstract

A flow model for unsaturated soils is presented, this allows determining the suction and suction stress variations in a two-dimensional domain, both spatially and temporally. This is achieved by considering the problem as a transient thermal problem using the finite element method.

The used experimental data belong to different authors and the object of the study is the clayey soil from Jurica, Querétaro. Also, climatologic data were required, such as the monthly precipitation, sunlight hours and temperature, in order to define the amount of water that enters or leaves the medium.

For calculating the suction stresses is necessary to obtain the effective stress parameter of Bishop's equation, the χ parameter. This is calculated considering the Soil-Water Retention Curve and the hydraulic hysteresis cycles (scanning curves) generated inside the main branches because of the suction changes.

The model is applied in two different situations, firstly with the soil in its natural state and then with the soil with an impermeable membrane on a portion of its surface (simulating the action of a foundation slab).

The results of the analysis revealed the distribution of the nodal suction, which led to non-constant values of the effective stresses parameters, but dependent on time and location. By obtaining the suction values of the domain nodes, it was possible to establish both the suction profiles and the active zone.

The suction stresses over time are reduced as the depth increases; another phenomenon that could be observed when evaluating the stresses at different depths is that both the maximum and minimum values are not presented simultaneously.

When evaluating the suction stresses at the same depth along the horizontal axis, it could be observed that they are constant for the case of natural soil, the variations appeared when comparing different months. In the case of the soil with the membrane, regardless of the month of study, the stresses under it remain almost constant but are different from the stresses

generated in the flow entry and exit zone, and may be lower or higher depending on the rainy or dry season.

Key words: flow model, hydraulic hysteresis, suction stress, finite element method.

Dirección General de Bibliotecas de la UAQ

I. Introducción

El comportamiento del suelo no es fácil de simular dada la complejidad del sistema. Es un material compuesto de varias fases, cuyo comportamiento individual afecta el comportamiento general; aunado a esto, sus condiciones son cambiantes de un sitio a otro.

Dadas estas condiciones distintas para suelos de diferentes sitios, el material abordado en esta investigación ha sido estudiado a lo largo de varios años en la Universidad Autónoma de Querétaro y se encuentra bien documentado, siendo un suelo arcilloso, correspondiente a Jurica, Querétaro. Sin embargo, la metodología descrita es apta para ser usada en diferentes tipos de suelos y regiones al considerar las propiedades geotécnicas y ambientales del material y sitio de estudio.

A lo largo de estas páginas se presenta el desarrollo de un modelo de flujo para suelos no saturados que calcula las variaciones de la succión a lo largo del tiempo para un dominio bidimensional y, con base en la información anterior, se determina el parámetro de esfuerzos efectivos o parámetro χ considerando los ciclos de histéresis que se generan al interior de la Curva de Retención Agua-Suelo (CRAS) dados los cambios en la succión.

Teniendo la succión y su respectivo parámetro χ es posible calcular el esfuerzo por succión generado en el suelo de manera espacial y temporal. Se abordan dos condiciones en el estudio, la primera con el suelo en condición natural y la segunda con una membrana impermeable en su superficie que afecte la entrada y salida de agua al medio, esta membrana no transmite carga, pero cumple la función impermeable que generaría una losa de cimentación.

I.1 Planteamiento del problema

El comportamiento del suelo en condición no saturada es más complejo que el del suelo saturado, simplemente porque hay más fases en el primero que en el segundo. Una de las variables más importante en suelos no saturados es la succión; entender y predecir su comportamiento a través de un modelo de flujo es fundamental ya que gran cantidad de parámetros tanto hidráulicos como mecánicos dependen de ella.

Establecer un modelo de flujo en suelos no saturados puede representar todo un desafío, ya que es un problema en el que intervienen la succión, conductividad hidráulica, la difusividad, la irregularidad de los poros y la forma de las partículas sólidas (Zepeda *et al.*, 2004).

La ecuación de flujo que indica la variación de la succión al paso del tiempo involucra al coeficiente de difusión y a la conductividad hidráulica. Al estar estas variables relacionadas entre sí el problema se vuelve altamente no lineal y se requiere de un método numérico como el método de los elementos finitos para hallar una solución (Li, 2006; Fredlund *et al.*, 2012).

I.2 Justificación

En sus inicios la aplicación de la mecánica de suelos se basó en considerar al suelo como un medio saturado a pesar de que un tercio de la superficie de la tierra se encuentra en regiones semi-áridas. Eso funcionó bien por un tiempo, pero fueron surgiendo problemas asociados a “suelos problemáticos” como los expansivos o colapsables y la necesidad de una mecánica de suelos que abarcara todo el comportamiento de los suelos saturados y no saturados se hizo evidente dando paso al surgimiento de la mecánica de suelos no saturados entre 1960 y 1970 (Fredlund *et al.*, 2012).

En la práctica se desea conocer cómo se dan los cambios en la succión de un suelo no saturado debido a variaciones en la humedad del medio, así que este estudio presenta una alternativa a través de relativamente pocas variables para modelar dicho comportamiento. Dentro de las variables a emplear están la CRAS, precipitación, temperatura y horas de sol del lugar de estudio, así como datos tomados en el sitio para validar los resultados y asignar condiciones iniciales.

El problema que se aborda en este trabajo se justifica por la necesidad de un mayor entendimiento en los esfuerzos que se generan en un suelo debido a los cambios de humedad que pueden generarse por la precipitación y sequía estacional.

Dentro del Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024 está presente la realización de obras tales como: la construcción de caminos rurales, el Tren Maya y el Corredor Transístmico; estas transmiten poca carga al suelo y son susceptibles a deformaciones por cambios volumétricos

en el medio. Por lo tanto, esta y otras investigaciones en el área de suelos no saturados pueden brindar información valiosa en la toma de decisiones ingenieriles.

Dirección General de Bibliotecas de la UAQ

II. Antecedentes

II.1 El suelo no saturado

El suelo puede concebirse como un sistema constituido por fases y cada fase influye de distintas formas en su comportamiento. Es posible dividir el estudio de la mecánica de suelos en dos grandes grupos: la mecánica de suelos saturados y la de suelos no saturados.

El suelo saturado tiene sus poros llenos de agua y el no saturado tiene la presencia de una tercera fase, el aire. La adición de una fase más con respecto a la condición saturada hace que los problemas derivados se vuelvan más difíciles de resolver.

La diferencia más marcada entre los dos grupos de mecánica de suelos es la no linealidad en los problemas de suelos no saturados que conducen a ecuaciones diferenciales parciales, las cuales necesitan de un método numérico para ser resueltas (Fredlund, 2002).

II.1.1 Fases del suelo

Tradicionalmente el suelo no saturado puede establecerse como aquel que tiene presencia de las fases sólida, líquida y gaseosa (Figura II.1), sin embargo, hay que considerar la existencia de una cuarta fase llamada interface agua-aire o membrana contráctil (Budhu, 2011; Juárez y Rico, 2012).

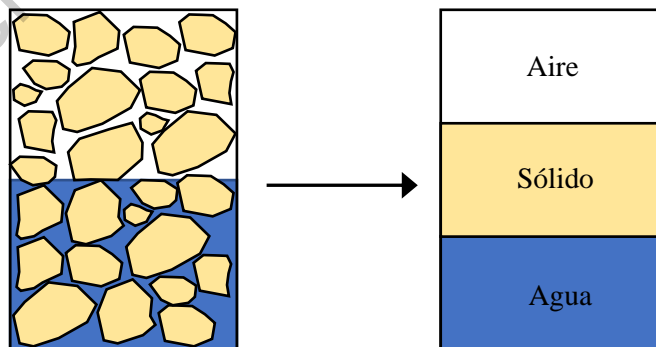


Figura II.1 Fases del suelo.

La membrana contráctil puede ser considerada dentro del volumen que ocupa el agua, pero tiene una propiedad que afecta el comportamiento del suelo. Debido a la tensión superficial

generada entre la fase líquida y gaseosa esta fase “tira” de las partículas sólidas atrayéndolas entre sí cuando el agua es removida del suelo. Su origen se debe a las fuerzas de Van der Waals que son fuerzas atractivas entre las moléculas (Fredlund *et al.*, 2012; Briaud, 2013).

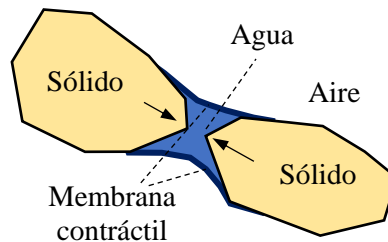


Figura II.2 Atracción de las partículas sólidas debido a la membrana contráctil.

II.1.2 Grado de saturación

El grado de saturación (II-1) se refiere al espacio vacío que se forma entre las partículas sólidas que contiene agua. Es una relación de volumen que oscila del cero al cien por ciento, siendo cero el grado de saturación de un suelo seco y del cien por ciento el de un suelo saturado. Si el grado de saturación está entre el cero y el cien puede decirse que el suelo se encuentra en condición no saturada (Budhu, 2011; Juárez y Rico, 2012).

$$S_w = \frac{V_w}{V_v} \quad (\text{II-1})$$

II.1.3 Succión

De acuerdo a la *American Society for Testing and Materials (ASTM)* en su norma “*Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper*”, la succión es una medida de la afinidad que tiene el suelo por retener agua. Esta provee información sobre los parámetros que son afectados por los cambios en el contenido de humedad, tales como el cambio de volumen, la deformación y la resistencia del suelo (ASTM D5298-16, 2016).

La succión total tiene dos componentes: la succión mátrica y la succión osmótica. La primera se puede suponer como la altura a la que el agua puede ser succionada en un suelo no

saturado, comúnmente a esto se le llama ascensión capilar; en la segunda el agua es atraída al suelo como resultado de la concentración de sal disuelta en el agua (Nelson, 2015).

II.1.4 Capa activa

La ubicación de la capa activa o zona activa (Figura II.3) es fundamental en los estudios enfocados al desarrollo de obras civiles sobre suelos expansivos. Esta capa va de la superficie a una profundidad en la no hay variaciones de humedad debido a los cambios estacionales (Flores y Zepeda, 2004).

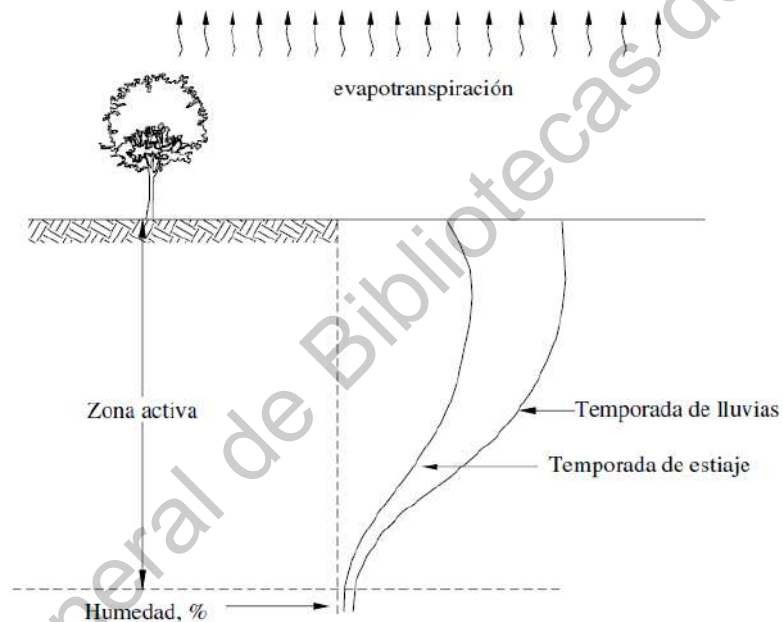


Figura II.3 Esquema de la zona o capa activa en un suelo no saturado (Flores y Zepeda, 2004).

El movimiento de agua en los suelos no saturados frecuentemente se considera como una migración uniforme de un frente de humedad, sin embargo, las discontinuidades en el medio tienen una influencia significativa en el movimiento de agua. A medida que el agua se mueve dentro del suelo, la zona activa cambia con el tiempo, y el movimiento de las estructuras construidas sobre o dentro del suelo varía con el tiempo (Nelson *et al.*, 2012).

II.1.5 Flujo de agua en suelo no saturado

El flujo de agua, sea en suelo saturados o no saturados, ocurre en dirección a la menor carga hidráulica. El agua tiende a fluir de lugares donde la succión es menor a donde es mayor, en valores absolutos (Zepeda *et al.*, 2004).

La ecuación general de flujo en suelos no saturados (II-2) queda definida por una ecuación análoga a la del flujo de calor, en la que se muestra cómo varía el contenido volumétrico de agua en el tiempo y posición.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right] \quad (\text{II-2})$$

Donde

θ = contenido volumétrico de agua

t = tiempo

x = distancia

$D(\theta)$ = coeficiente de difusión como función de θ

Otra manera de ver la ecuación de flujo es a través de las variaciones en la succión al paso del tiempo. Aplicando la ley de Darcy, las ecuaciones de continuidad y asumiendo al suelo como un material homogéneo e isotrópico, se define la ecuación de difusión (II-3) (Li, 2006).

$$\frac{1}{D} \frac{\partial s}{\partial t} = \frac{\partial^2 s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 s}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 s}{\partial z^2} + \frac{f(x, y, z, t)}{k_w} \quad (\text{II-3})$$

Donde:

$D = k_w / (c \gamma_d)$ = coeficiente de difusión

s = succión

t = tiempo

k_w = conductividad hidráulica

$c = \Delta \theta / \Delta s$ = capacidad específica del agua (pendiente de la CRAS en el dominio succión-contenido volumétrico de agua)

γ_d = peso volumétrico seco

x, y, z = coordenadas espaciales

$f(x, y, z, t)$ = fuente de humedad generada en el suelo

II.1.6 Conductividad hidráulica

La conductividad hidráulica k_w se ve afectada por la estructura de los poros, las características del fluido y la cantidad relativa de fluido de poro en el sistema. Puede ser descrita en función de la succión o la cantidad de agua en el suelo (grado de saturación y contenido volumétrico de agua) (Lu y Likos, 2004).

Actualmente no existe una ecuación general que relacione a dichas variables. Sin embargo, hay varias propuestas empíricas que se presentan en la Tabla II-1.

Tabla II-1 Ecuaciones de conductividad hidráulica en suelos no saturados en función de la succión.

Ecuación	Variables
$k_w = \frac{a}{s^n}$	s = succión mátrica a, n = constantes empíricas
$k_w = \frac{a}{b + s^n}$	s = succión mátrica a, b, n = constantes empíricas
$k_w = \frac{k_{sat}}{1 + b s ^n}$	s = succión mátrica k_{sat} = conductividad hidráulica en estado saturado b, n = constantes empíricas

La conductividad hidráulica puede representarse de manera gráfica respecto a la succión o al contenido volumétrico de agua y al igual que la CRAS habrá dos trayectorias, una para humedecimiento y otra para secado. El cálculo de esta variable en función de la CRAS es descrita en la metodología.

II.1.7 Difusividad

Así como el calor se transfiere debido a una diferencia de temperaturas, la transferencia de masa se da por una diferencia en la concentración de un componente dentro de una mezcla. La difusión de masa ocurre más fácilmente en gases que en líquidos y más fácilmente en líquidos que en sólidos (Incropera y DeWitt, 1999).

En mecánica de suelos no saturados, la difusividad o coeficiente de difusión define la tasa de difusión de la humedad bajo gradientes de cambios de succión, también puede verse como la relación de la velocidad con el gradiente de humedad (Zepeda *et al.*, 2004; Li, 2006).

Li (2006) presenta la ecuación (II-4) para calcular el coeficiente de difusión en función de la conductividad hidráulica, el peso volumétrico seco y la capacidad específica de humedad.

$$D = \frac{k_w}{c * \gamma_d} \quad (\text{II-4})$$

Donde

D = coeficiente de difusión

k_w = conductividad hidráulica no saturada

c = capacidad específica de humedad, $c = \frac{\Delta\theta}{\Delta s}$

γ_d = peso volumétrico seco

La capacidad específica de humedad es la pendiente en la CRAS en el dominio succión-contenido volumétrico de agua, este valor es cambiante y depende de la succión y de la trayectoria que se esté estudiando (de humedecimiento o de secado).

A un valor de succión dado le corresponde una capacidad específica de humedad y conductividad hidráulica, por lo que el coeficiente de difusión no es una constante, es dependiente de la succión y, al igual que con la CRAS, se tiene la trayectoria de humedecimiento y la de secado.

II.1.8 El esfuerzo efectivo

El esfuerzo efectivo se define como aquel al que están sometidas las partículas del suelo, su ecuación puede obtenerse de manera sencilla al considerar de manera separada el efecto de la presión de los fluidos en los poros y las cargas externas. Este principio es el más importante en la mecánica de suelos ya que la resistencia y deformación son una función del esfuerzo efectivo (Budhu, 2011; Shao *et al.*, 2019).

Reforzando lo anterior, es sabido que la resistencia del suelo es aportada por el esqueleto formado por la fase sólida, por lo que se deduce que la resistencia y deformación están gobernadas por el esfuerzo en dicha fase (esfuerzo efectivo). Lo anterior ha sido

completamente probado para suelos saturados pero no ha sido posible hacer lo mismo para los suelos no saturados, sin embargo, al considerar su definición y significado físico se considera que el esfuerzo efectivo también debe gobernar el comportamiento de los suelos no saturados (Shao *et al.*, 2019).

Se dan desarrollado distintas propuestas de ecuación de esfuerzos efectivos para suelos no saturados, dentro de las cuales destacan las resumidas en la Tabla II-2.

Tabla II-2 Ecuaciones de esfuerzos efectivos por distintos autores, tomada de Galaviz (2016).

Ecuación	Parámetros	Autor
$\sigma' = \sigma - \beta' u_w$	β' : Factor de unión	Croney et al. (1958)
$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w)$	χ : Parámetro hidromecánico	Bishop (1959)
$\sigma' = \sigma - k u_w$	k : Parámetro que toma en cuenta el efecto de las áreas de contacto	Skempton (1961)
$\sigma' = \sigma + \psi p''$	ψ : Parámetro que varía de 0 a 1 p'' : Deficiencia de la presión de agua en los poros	Aitchinson (1961)
$\sigma' = \sigma + \beta p''$	β : Factor estadístico de áreas de contacto p'' : Presión de poro negativa, en valor absoluto	Jennings (1961)
$\sigma' = \sigma - u_a + \chi_m p_m'' + \chi_s p_s''$	p_m'' : Succión mátrica p_s'' : Succión osmótica χ_m y χ_s : Parámetros respectivos	Aitchinson (1965)
$\sigma' = \sigma - u_a + \chi_m (h_m + u_w) + \chi_s (h_s + u_a)$	h_m : Succión mátrica h_s : Succión osmótica χ_m y χ_s : Parámetros respectivos	Richards (1967)
$\sigma' = \sigma - u_a + S_w (u_a - u_w)$	S_w : Grado de saturación	Alanis (2012)

Sin embargo, la que ha perdurado como la más usada es la propuesta por Bishop (1959), plasmada en (II-5).

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \quad (\text{II-5})$$

II.1.8.1 Parámetro de esfuerzo efectivo

El parámetro de esfuerzo efectivo o simplemente parámetro χ está relacionado con el grado de saturación del suelo y es necesario para calcular los esfuerzos generados en el suelo debidos a la succión. En la Tabla II-3 se presentan distintas propuestas de lo que es el parámetro χ para distintos autores.

Tabla II-3 Propuestas del parámetro de esfuerzo efectivo para suelos no saturados.

Ecuación	Autor
$\chi = S_w$	(Öberg y Sälfors, 1995)
$\chi = (S_w)^k$ Donde k es un parámetro de ajuste	(Vanapalli <i>et al.</i> , 1996)
$\chi = \left(\frac{s}{s_{ae}}\right)^{0.55}$ Donde s_{ae} es el valor de entrada de aire.	(Khalili y Khabbaz, 1998)
$\chi = f^s + S_w^u f^u$ Donde f^s es la fracción saturada, f^u es la fracción no saturada S_w^u es el grado de saturación de la fracción no saturada.	(Rojas, 2013)

II.2 La Curva de Retención Agua-Suelo y la histéresis hidráulica

La mecánica de suelos no saturados surge entre 1960 y 1970 y existía la necesidad de vincular la teoría, las mediciones de laboratorio y los métodos para resolver problemas ingenieriles. Fue la Curva de Retención Agua-Suelo (CRAS) la que vinculó el comportamiento y las propiedades de los suelos no saturados, en ella el grado de saturación y la succión son relacionados de manera gráfica (Fredlund *et al.*, 2012).

La CRAS es única para cada tipo de suelo, una representación general para la curva de secado de arcilla, limo y arena es presentada en la Figura II.4. Los elementos que integran la CRAS están señalados en la Figura II.5.

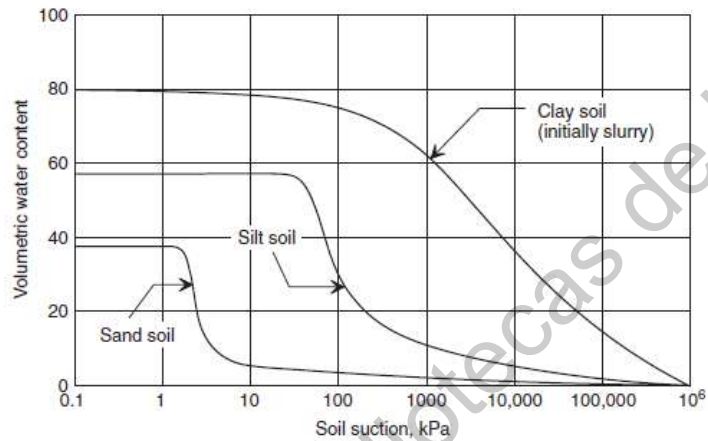


Figura II.4 Curvas principales de secado para suelos arcillosos, limosos y arenosos, tomada de Fredlund, et al. (2012).

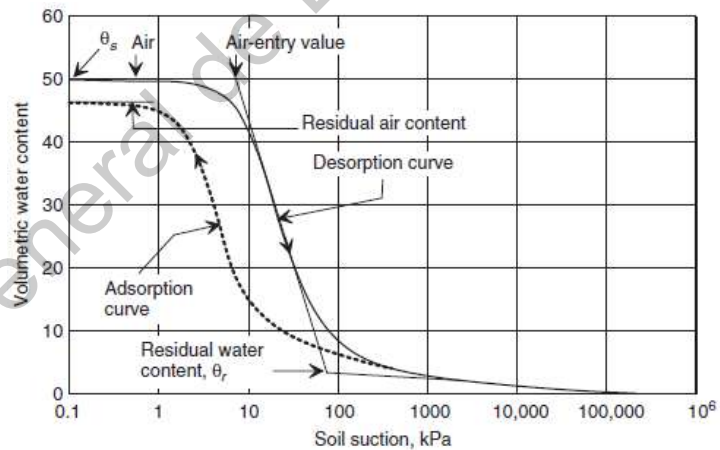


Figura II.5 CRAS típica con sus elementos para un suelo limoso, tomada de Fredlund, et al. (2012).

II.2.1 Obtención de la Curva de Retención Agua-Suelo

Para obtener la CRAS existen diferentes métodos experimentales, dentro de los cuales están el de la placa de succión, el de la centrifugación, el basado en la ecuación de Kelvin, el desecador de vacío, los tensiómetros, el sicrómetro de termopar y el del papel filtro calibrado (Zepeda y Pérez, 2004).

El método que requiere la menor cantidad de equipo especializado para su realización es el método del papel filtro calibrado. Este método está normado por la ASTM en su norma D5298-16. De manera breve, la prueba consiste en colocar dentro de un recipiente hermético una muestra de suelo y papeles de filtro durante siete días para permitir que el sistema alcance el equilibrio. Se determina el contenido de agua de los papeles filtro y la succión del suelo es hallada a partir de la curva de calibración (Figura II.6) del contenido de agua del papel de filtro con la succión para el tipo de papel de filtro usado.

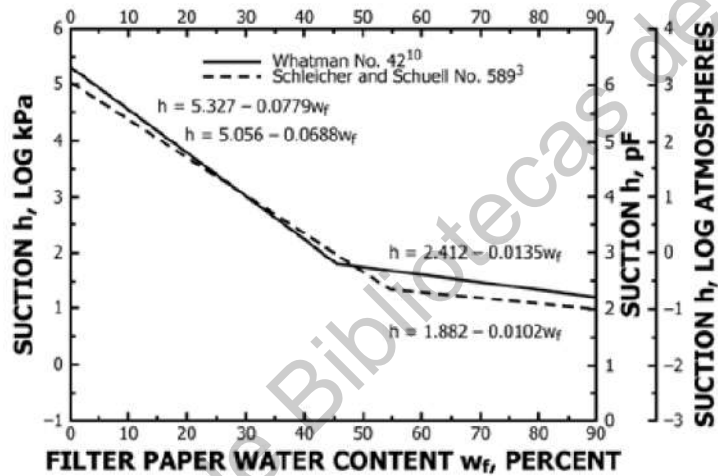


Figura II.6 Curvas de calibración para dos tipos de papel filtro, tomada de ASTM D5298-16

II.2.2 Ajuste de la Curva de Retención Agua-Suelo

Existe una gran variedad de ecuaciones empíricas que buscan predecir las trayectorias de la CRAS, generalmente tienen dos o tres parámetros de ajuste.

Dentro de los métodos con tres parámetros de ajuste se encuentra el propuesto por Zhou, Sheng, Sloan y Gens en 2012. Este brinda las ecuaciones (II-6) y (II-7) para asociar el grado de saturación (S_e) con la succión (s) en las ramas principales, utilizando los parámetros de ajuste a , m y n , el subíndice w se utiliza para el caso de humedecimiento y el subíndice d para el secado (Zhou *et al.*, 2012).

$$S_{ew} = \left[1 + \left(\frac{s}{a_w} \right)^{m_w} \right]^{-n_w} \quad (\text{II-6})$$

$$S_{ed} = \left[1 + \left(\frac{S}{a_d} \right)^{m_d} \right]^{-n_d} \quad (\text{II-7})$$

Los parámetros de ajuste difieren de la ecuación de la curva principal de humedecimiento a la de secado. El método se aplica partiendo de una dispersión con los puntos experimentales de la CRAS en cuestión, después se deben obtener las curvas que describen las funciones (II-6) y (II-7) y finalmente se iteran los valores de los parámetros de ajuste a modo de que las curvas sigan la trayectoria de los puntos experimentales.

En la Figura II.7 se muestran datos experimentales de las trayectorias principales de una CRAS (Viaene *et al.*, 1994) y los valores de los parámetros de ajuste para obtener las curvas ajustadas se concentran en

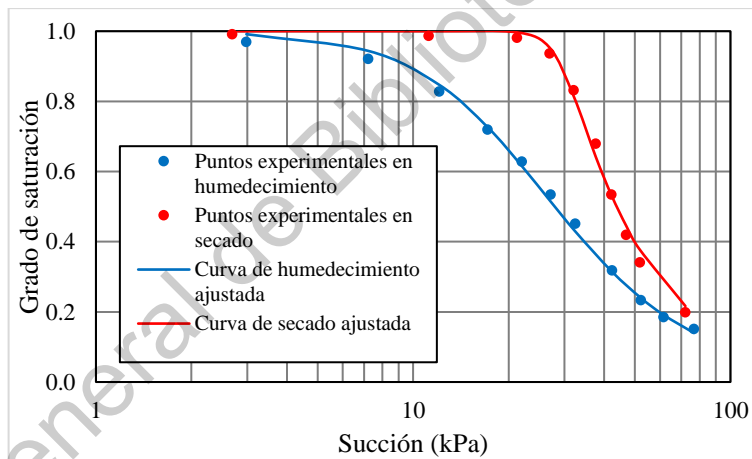


Figura II.7 Ajuste de las trayectorias principales de la CRAS con el método de Zhou, et al. (2012) utilizando datos experimentales (Viaene *et al.*, 1994).

Tabla II-4 Parámetros de ajuste de las trayectorias principales de la CRAS para los datos de Viaene et al. (1994).

Parámetro de ajuste	Magnitud
a_w	22
m_w	2.2
n_w	0.7
a_d	29

n_d	12
m_d	0.14

II.2.3 Curvas de histéresis hidráulica o curvas secundarias

Está claro que las curvas principales de la CRAS siguen caminos distintos, esto se debe a un fenómeno denominado histéresis, donde la respuesta actual de un sistema no se puede determinar sin saber su historia previa, es decir, la respuesta es dependiente de la dirección del proceso. Puede estar atribuida a la irregularidad de la geometría de los poros, el efecto del ángulo de contacto de los meniscos de agua, el aire atrapado y la expansión o contracción (Zepeda y Pérez, 2004; Dey *et al.*, 2017; Novák y Hlaváčiková, 2019).

Si bien, la CRAS puede obtenerse con relativa facilidad a través de pruebas experimentales partiendo de un suelo saturado a uno seco y viceversa, los ciclos de humedecimiento y secado en grados de saturación intermedios son los más frecuentes en la práctica de la ingeniería y no podrían evaluarse en laboratorio en su totalidad. Las curvas que se desarrollan dentro de la CRAS se conocen como ciclos de histéresis hidráulica o curvas secundarias (Figura II.8); estas pueden producirse de infinitas formas distintas, tienen como frontera las curvas principales y son asintóticas a estas (Fredlund *et al.*, 2012; Han *et al.*, 2019).

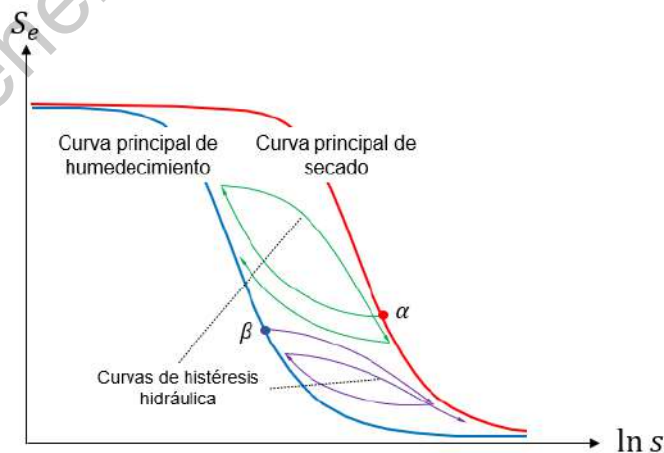


Figura II.8 Esquema de las curvas de histéresis hidráulica al interior de la CRAS partiendo de puntos sobre las ramas principales.

II.2.3.1 Cálculo por el método de Zhou

Previamente se ha descrito el método de ajuste de las curvas principales de la CRAS a través de las ecuaciones (II-6) y (II-7). Zhou, et al. (2012) también propone un método para calcular las trayectorias de los ciclos de histéresis hidráulica en donde el primer paso es obtener las derivadas parciales de las curvas principales con respecto a la succión con la finalidad de poder calcular las pendientes de las curvas para una succión dada. Dichas derivadas parciales están expresadas en las ecuaciones (II-8) y (II-9).

$$\frac{\partial S_{ew}}{\partial s} = -n_w \left[1 + \left(\frac{s}{a_w} \right)^{m_w} \right]^{-n_w-1} \left(\frac{m_w}{a_w} \right) \left(\frac{s}{a_w} \right)^{m_w-1} \quad (\text{II-8})$$

$$\frac{\partial S_{ed}}{\partial s} = -n_d \left[1 + \left(\frac{s}{a_d} \right)^{m_d} \right]^{-n_d-1} \left(\frac{m_d}{a_d} \right) \left(\frac{s}{a_d} \right)^{m_d-1} \quad (\text{II-9})$$

El gradiente de las curvas de histéresis hidráulica viene dado por (II-10) y (II-11) donde s_w y s_d son los valores de la succión en la curva principal de humedecimiento y secado respectivamente para el grado de saturación que esté evaluándose. Los elementos necesarios para el cálculo de las curvas de histéresis hidráulica pueden apreciarse en la Figura II.9.

$$\frac{\partial S_{es}}{\partial S} (\text{humedecimiento}) = \left(\frac{s_w}{s} \right)^b \left(\frac{\partial S_{ew}}{\partial S} \right) \quad (\text{II-10})$$

$$\frac{\partial S_{es}}{\partial S} (\text{secado}) = \left(\frac{s_d}{s} \right)^{-b} \left(\frac{\partial S_{ed}}{\partial S} \right) \quad (\text{II-11})$$

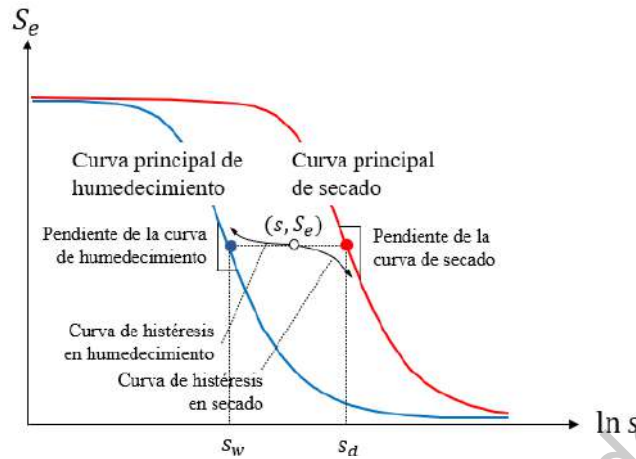


Figura II.9 Elementos necesarios para el cálculo de las curvas de histéresis hidráulica con el método de Zhou, et al. (2012).

II.3 Problema de transferencia de calor y el método del elemento finito

La transferencia de calor se define como la energía en tránsito debido a una diferencia de temperaturas. Existen distintos modos de transferencia de calor, los cuales son: la conducción a través de un sólido o un fluido estacionario, la convección de una superficie a un fluido en movimiento y la radiación a través de ondas electromagnéticas (Incropera y DeWitt, 1999).

La conducción es el modo de transferencia de calor de interés para la analogía con el modelo de flujo en este trabajo. En presencia de un gradiente de temperatura, el calor fluye de la región de alta temperatura a la de baja. Es posible cuantificar el proceso de acuerdo a la ley de Fourier (II-12); en la cual, para el caso de una placa con área A y espesor Δx , el flujo de calor Q es directamente proporcional al área y diferencia de temperaturas ($T_2 - T_1$), pero inversamente proporcional al espesor (Incropera y DeWitt, 1999; Alawadhi, 2010).

$$Q = kA \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} \quad (\text{II-12})$$

Donde:

k = conductividad térmica

La ley de Fourier también puede ser expresada para el flujo de calor multidimensional, quedando representada en la ecuación (II-13).

$$Q'' = -k\nabla T = -k \left(\frac{\partial T}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial T}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial T}{\partial z} \mathbf{k} \right) \quad (\text{II-13})$$

Al aplicar un balance de energía a un volumen diferencial para un análisis de conducción en coordenadas cartesianas, véase Figura II.10, se obtiene la distribución de temperaturas dentro del sólido.

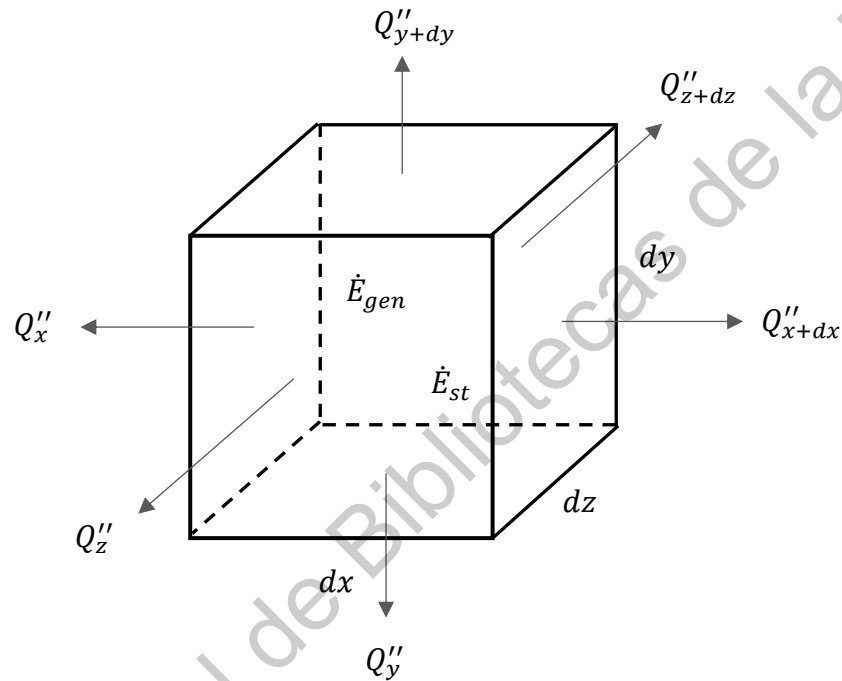


Figura II.10 Volumen de control diferencial para balance de energía (Alawadhi, 2010).

El flujo de calor perpendicular a la superficie del volumen de control está indicado por los términos Q''_x , Q''_y y Q''_z . El flujo de calor en la superficie contraria puede ser expresado, usando la serie de expansión de Taylor, de la siguiente forma:

$$Q''_{x+dx} = Q''_x + \frac{\partial Q''_x}{\partial x} dx \quad (\text{II-14})$$

$$Q''_{y+dy} = Q''_y + \frac{\partial Q''_y}{\partial y} dy \quad (\text{II-15})$$

$$Q''_{z+dz} = Q''_z + \frac{\partial Q''_z}{\partial z} dz \quad (\text{II-16})$$

La energía se puede generar en el medio de acuerdo a la ecuación (II-17), donde \dot{q} es el calor generado por volumen unitario, la energía del volumen de control puede crecer o disminuir. La energía almacenada está expresada en la ecuación (II-18).

$$\dot{E}_{gen} = \dot{q}dxdydz \quad (II-17)$$

$$\dot{E}_{st} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} dxdydz \quad (II-18)$$

Donde:

\dot{q} = calor generado por volumen unitario

ρ = densidad

C_p = calor específico

La suma de la energía generada en el volumen de control y el flujo neto de calor deben ser iguales a la energía almacenada. La ecuación de conservación de energía es la (II-19) y al sustituir en ellas las ecuaciones (II-14) a la (II-18) se obtiene la ecuación (II-20).

$$\dot{E}_{gen} + (\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out}) = \dot{E}_{st} \quad (II-19)$$

$$\dot{q}dxdydz + \left(\frac{\partial Q_x''}{\partial x} dydz + \frac{\partial Q_y''}{\partial y} dx dz + \frac{\partial Q_z''}{\partial z} dxdy \right) = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} dxdydz \quad (II-20)$$

En la ecuación (II-20) los términos Q_x'' , Q_y'' y Q_z'' se obtienen a través de la ley de Fourier. Al ser sustituidos se llega a la ecuación de conducción de energía por volumen unitario, en coordenadas cartesianas, se llega a la ecuación (II-21). Si la conductividad térmica k es la misma independientemente de la dirección, la ecuación se simplifica a la (II-22).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (II-21)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{\rho C_p}{k} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (II-22)$$

La ecuación de energía es una ecuación diferencial parcial de segundo orden en el espacio y primer orden en el tiempo. Las condiciones de frontera, así como la distribución de temperatura inicial en el sistema, deben ser provistas.

II.3.1 Problema térmico transitorio

Los análisis térmicos se basan en cumplir con una ecuación de balance de calor derivada del principio de conservación de la energía. Existen dos tipos de análisis térmicos que pueden efectuarse: los estacionarios y los transitorios (Alawadhi, 2010).

En un análisis térmico estacionario se determina la distribución de temperatura en condiciones estacionarias, es decir, condiciones en la que los efectos de almacenamiento de calor que varían con el tiempo pueden ignorarse.

Sin embargo, muchos problemas de transferencia de calor dependen del tiempo. Esos problemas reciben el nombre de problemas térmicos no estables o transitorios, en ellos se determina la distribución de la temperatura que varía al paso del tiempo (Incropera y DeWitt, 1999; Alawadhi, 2010).

Un análisis térmico puede ser lineal o no lineal, sería lineal si las propiedades del material no variaran con la temperatura, pero las propiedades térmicas de la mayoría de los materiales no cumplen esa condición, son cambiantes y esto hace que, usualmente, el análisis tenga que ser no lineal.

II.3.2 Método del elemento finito y ANSYS

Los principios en los que se basa el método del elemento finito son sencillos. Lo primero es dividir el dominio en elementos más pequeños, a este proceso se le conoce como discretización. La distribución de los elementos es conocida como malla. Los elementos se conectan los que tienen alrededor a través de nodos.

Después de la discretización, se establecen las ecuaciones gobernantes para cada elemento y estas se acoplan de una ecuación global que describe el comportamiento del cuerpo en su totalidad. Generalmente, la ecuación global tiene la forma descrita en la ecuación (II-23) (Alawadhi, 2010).

$$[K]\{A\} = \{B\} \quad (\text{II-23})$$

Donde

$[K]$ es la matriz de rigidez

$\{A\}$ es el vector con los grados de libertad en los nodos

$\{B\}$ es el vector de fuerzas externas aplicadas a los nodos

La ecuación (II-23) puede expresarse como en la ecuación (II-24) si lo que se desea conocer son los desplazamientos (o el cambio en la variable de estudio) debido a cargas externas.

$$\{A\} = [K]^{-1}\{B\} \quad (\text{II-24})$$

Donde:

$[K]^{-1}$ es la matriz de rigidez inversa

ANSYS es un programa comercial utilizado para simulaciones de problemas físicos utilizando el método del elemento finito. Se pueden abordar problemas estructurales, térmicos, de flujo, acústicos y multifísicos (Alawadhi, 2010).

Dentro del menú principal en ANSYS se pueden hacer la mayoría de las tareas para solucionar un problema, desde construir el modelo hasta obtener resultados. Se enlistan las secciones más importantes lo que se define u obtiene en cada una:

- Preprocesador:
 1. Tipo de elemento
 2. Propiedades de los materiales
 3. Constantes reales
 4. Modelado
 5. Mallado
- Solución:
 1. Condiciones de frontera
 2. Parámetros de configuración de la solución
- Postprocesador:
 1. Graficar resultados
 2. Listar resultados
 3. Ruta de operación

II.3.2.1 Elemento aplicado en el modelo

El elemento utilizado en la analogía del modelo de flujo a un problema térmico está denominado dentro de ANSYS como PLANE55. Dicho elemento puede usarse en análisis térmicos estacionarios y transitorios en dos dimensiones.

La geometría del elemento finito es mostrada en la Figura II.11, cuenta con cuatro nodos con un grado de libertad asociado a la temperatura.

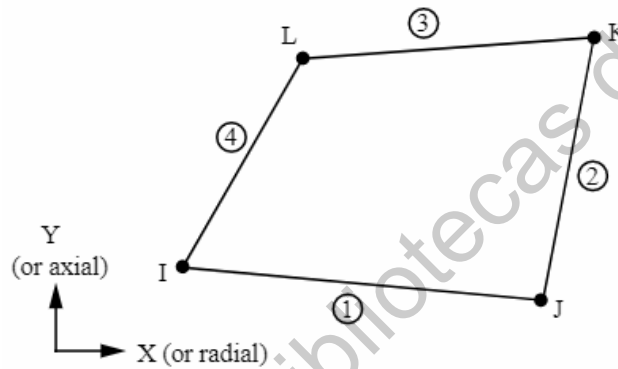


Figura II.11 Geometría del elemento finito PLANE55 de ANSYS.

Dentro de los supuestos y restricciones referentes al elemento se encuentran:

- El elemento no debe tener un área igual o menor que cero.
- El elemento debe estar en el plano X-Y
- Se puede utilizar el elemento para formar un elemento triangular asignando el mismo número a los nodos K y L.

III. Hipótesis

El parámetro de esfuerzos efectivos de la ecuación de Bishop, parámetro χ , no es constante al considerar periodos o ubicaciones distintas dentro de un dominio bidimensional de suelo no saturado. Es factible determinarlo al considerar dentro del modelo de flujo los ciclos de histéresis hidráulica generados por los cambios en la succión, al hacer lo anterior se dispondrá de un medio para calcular los esfuerzos por succión que influyen en el comportamiento mecánico del suelo.

Dirección General de Bibliotecas de la UAG

IV. Objetivos

IV.1 Objetivo general

Desarrollar en lenguaje APDL un modelo de flujo para calcular los cambios en la succión nodal de un dominio bidimensional de suelo no saturado aplicando una analogía con un problema térmico transitorio y resolviendo a través del método del elemento finito. Asimismo, se busca calcular los esfuerzos por succión considerando los ciclos de histéresis hidráulica para hallar el parámetro χ de la ecuación de esfuerzos efectivos de Bishop.

IV.2 Objetivos específicos

1. Determinar el comportamiento de la succión en un dominio bidimensional de suelo no saturado a través de una analogía con un problema térmico transitorio mediante el método del elemento finito.
2. Calcular los cambios en el grado de saturación debido a las distintas succiones resultantes del análisis análogo térmico transitorio considerando los ciclos de histéresis hidráulica.
3. Evaluar el comportamiento de los esfuerzos por succión tanto espacial como temporalmente.

V. Metodología

El estudio está basado en emplear un análisis análogo térmico transitorio usando el método del elemento finito para obtener los esfuerzos por succión en un dominio bidimensional de suelo no saturado tomando en cuenta los ciclos de histéresis hidráulica en la obtención del parámetro χ .

El primer paso es establecer las variables de interés, las cuales son: la CRAS, la conductividad hidráulica, el coeficiente de difusión y las condiciones ambientales para establecer la cantidad de agua que entra y sale del medio a través de precipitación y evapotranspiración.

El suelo abordado en el trabajo corresponde a un suelo de tipo expansivo, propio de Jurica, Querétaro.

V.1 Obtención de la CRAS

Obtener la CRAS es una tarea fundamental para el análisis, ya que, a partir de ella se generan nuevas variables. Los datos experimentales de succión y grado de saturación son tomados de la investigación de Galaviz (2016) y la CRAS se muestra en la Figura V.1. Esta información es almacenada en dos parámetros TABLA, una TABLA contendrá los datos de la curva principal de secado y otra los datos de la curva principal de humedecimiento.

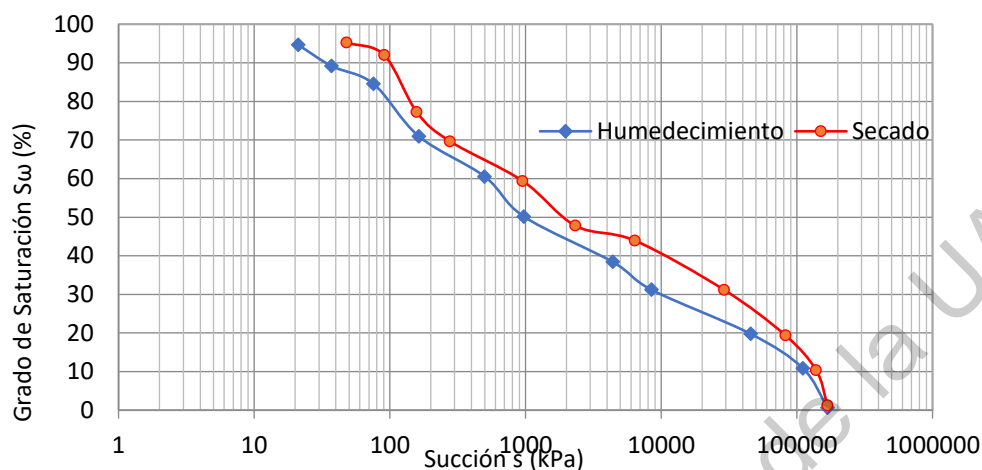


Figura V.1 CRAS experimental empleada en el análisis (Galaviz, 2016)

Dichos parámetros se dimensionan con base en los datos experimentales disponibles, siendo la cantidad de renglones igual al número de puntos experimentales en cada una de las trayectorias principales. El parámetro CCARH almacenará los puntos experimentales de la CRAS en la trayectoria de humedecimiento, mientras que el parámetro CCAR hará lo mismo, pero con la trayectoria de secado.

La CRAS puede asociar la succión con distintas variables que reflejen la cantidad de agua en el suelo, estas pueden ser: el grado de saturación, el contenido gravimétrico de agua o el contenido volumétrico de agua. En la Tabla V-1 se describen los dominios en que se encuentra la CRAS y el uso que se le dará en el análisis.

Tabla V-1 Uso de la CRAS en distintos dominios dentro del análisis

Tipo de CRAS	Uso en el análisis
Succión-Grado de saturación	Los datos experimentales son ingresados al programa en este dominio y sobre ellos se aplicará el algoritmo de histéresis hidráulica para determinar el grado de saturación.
Succión-Contenido volumétrico de agua	La CRAS en este dominio se utiliza para calcular la conductividad hidráulica y el coeficiente de difusión, ambas variables son dependientes de la succión.

Tanto el grado de saturación como el contenido volumétrico de agua son relaciones de los volúmenes de las fases del suelo. Para pasar de una relación a otra se emplea la relación de vacíos, estableciéndose la igualdad en la ecuación (V-1).

$$\theta = \frac{eS_w}{1 + e} \quad (\text{V-1})$$

V.2 Conductividad hidráulica

Para calcular la conductividad hidráulica (k_w) se modificarán los parámetros CCAR Y CCARH de manera temporal (no se crearán nuevos parámetros), convirtiendo el grado de saturación a contenido volumétrico de agua.

El algoritmo presentado por Fredlund et al. (2012) permite obtener k_w en función de la CRAS en el dominio de succión-contenido volumétrico de agua. La CRAS es dividida en intervalos iguales en el eje del contenido volumétrico de agua, yendo del mínimo al máximo valor para cada trayectoria.

La ecuación (V-2) muestra las variables requeridas y en la Figura V.2 se muestran las mismas en la CRAS en el dominio de succión-contenido volumétrico de agua.

$$k_w(\theta_w)_i = \frac{k_s}{k_{sc}} A_d \sum_{j=i}^m [(2j + 1 - 2i)(u_a - u_w)_j^{-2}] \quad (\text{V-2})$$

Donde:

$k_w(\theta_w)_i$ = Es la conductividad hidráulica en función del contenido volumétrico de agua para el i-ésimo punto sobre la CRAS.

k_s/k_{sc} = Es un factor de ajuste adimensional que se obtiene al dividir la conductividad hidráulica saturada medida en laboratorio entre la calculada con el algoritmo.

A_d = Es un parámetro que asocia el peso específico del agua, su viscosidad y tensión superficial.

$(u_a - u_w)_j$ = Es la succión del j-ésimo ciclo.

i = valor entero que va de 1 al número total de intervalos en la CRAS.

j = contador de i a m .

m = total de intervalos de la CRAS.

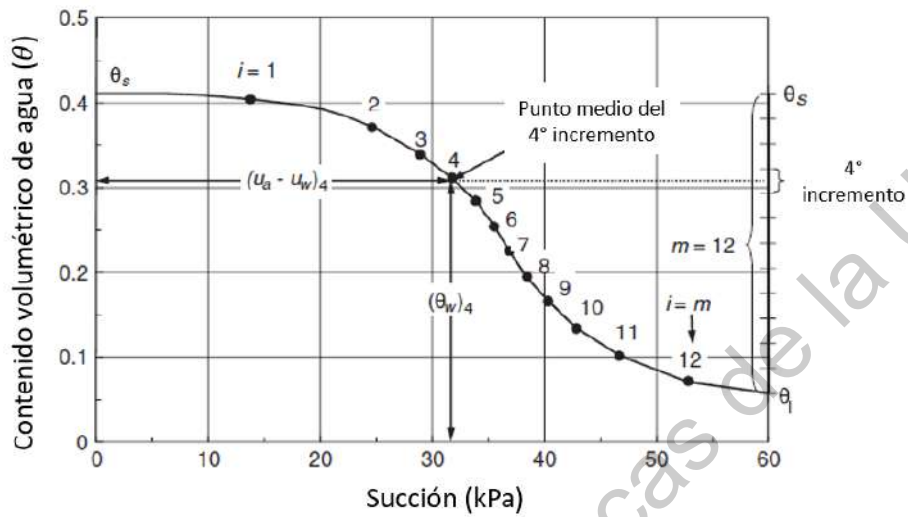


Figura V.2 Variables del algoritmo para la obtención de la conductividad hidráulica (k_w) a través de la CRAS en el dominio de succión-contenido volumétrico de agua (Fredlund *et al.*, 2012).

El parámetro A_d reúne las propiedades del agua en la ecuación (V-3) y al sustituir los valores constantes se llega a la ecuación (V-4) en unidades de $kPa^2 * m/s$.

$$A_d = \frac{T_s^2 \rho_w g \theta_s^2}{2\nu_w N^2} \quad (V-3)$$

Donde:

T_s = tensión superficial del agua, $7.26 * 10^{-5} \text{ kN/m}$.

ρ_w = densidad del agua, 1 ton/m^3 .

g = aceleración gravitacional, 9.81 m/s .

ν_w = viscosidad absoluta del agua, $1 * 10^{-6} \text{ kN} * \text{s/m}^2$

θ_s = contenido volumétrico de agua en estado saturado.

N = cantidad de intervalos en que se divide la CRAS.

$$A_d = 0.02585 \frac{\theta_s^2}{N^2} \quad (V-4)$$

El factor de ajuste k_s/k_{sc} es constante en cada trayectoria de la CRAS, sin embargo, no será el mismo para humedecimiento que para secado. Esto ocurre debido a que k_{sc} es la

conductividad hidráulica calculada con el algoritmo y tendrá una variación dada la diferencia entre las ramas principales.

La ecuación (V-5) es la empleada para calcular k_{sc} en ambas trayectorias de la CRAS. Se llega a ella al sustituir el valor de $i = 1$ en la ecuación (V-2) sin tomar en cuenta el factor k_s/k_{sc} , ya que justamente k_{sc} es el valor que se calcula.

$$k_{sc} = k_w(\theta_w)_1 = A_d \sum_{j=1}^m [(2j + 1 - 2)(u_a - u_w)_j^{-2}] \quad (V-5)$$

La permeabilidad saturada medida en laboratorio k_s para el suelo de Jurica, Querétaro, es considerada de $1.37e-07$ m/s (Galaviz, 2016).

Para ejemplificar el proceso se explica el cálculo de k_w para el punto 4. En la Figura V.2 se observan 12 intervalos con 12 puntos intermedios, los parámetros k_s/k_{sc} y A_d se mantienen constantes, la sumatoria inicia con $i = 4$, por lo que $j = 4$ y la succión $(u_a - u_w)$ que se toma es la del punto 4, después j valdrá 5, i seguirá valiendo 4 y se tomará la succión del punto 5, el proceso sigue hasta llegar al punto 12.

Entre menor sea j , es decir, entre mayor sea el contenido volumétrico de agua del punto que se va a analizar, la conductividad hidráulica será más alta porque hay más elementos en la sumatoria.

Al aplicar el proceso descrito a la CRAS en secado y humedecimiento, se almacenarán los resultados en dos parámetros TABLA con 20 renglones cada uno (la cantidad de renglones corresponde a los intervalos elegidos, estos pueden variar a elección del usuario). KSUC tendrá los valores de succión y conductividad hidráulica para la trayectoria de secado y KSUCH para la de humedecimiento.

V.3 Coeficiente de difusión

El coeficiente de difusión será obtenido a través de la ecuación (V-6) presentada por Li (2006). En ella se establece al coeficiente de difusión como una función de la conductividad hidráulica, que a su vez es función del contenido volumétrico de agua y de la succión.

$$D = \frac{k_w}{c * \gamma_d} \quad (V-6)$$

Donde:

D = coeficiente de difusión.

k_w = conductividad hidráulica.

c = capacidad específica de agua.

γ_d = peso volumétrico seco.

La capacidad específica de agua se refiere a la relación de cambio que hay entre el contenido volumétrico de agua y la succión en la CRAS en dicho dominio, queda definida por la ecuación (V-7) y sería equivalente a la pendiente en la CRAS en un punto dado.

$$c = \frac{\Delta\theta}{\Delta s} \quad (V-7)$$

Serán generados dos nuevos parámetros TABLA que contengan el coeficiente de difusión asociado con la succión, uno para la trayectoria de secado y otro para la de humedecimiento, llevarán por nombre DSUC y DSUCH respectivamente. Ambos tendrán el mismo tamaño que KSUC y KSUCH.

Al terminar el proceso, se regresará a los parámetros CCAR y CCARH al dominio de succión-contenido volumétrico de agua aplicando la ecuación (V-8) con el fin de posteriormente trabajar el algoritmo de histéresis hidráulica.

$$S_w = \frac{\theta(1 + e)}{e} \quad (V-8)$$

V.4 Succión del sitio de estudio

Dado que el modelo está siendo construido en torno al suelo característico de Jurica, Querétaro, se introducen valores de succión y profundidad con el fin de comparar los resultados que arroje el análisis con valores experimentales tomados en el sitio.

La información corresponde a López Lara (1995) y en la Figura V.3 se muestra un perfil de succiones. La succión inicial para todos los nodos del dominio es tomada de estos valores y corresponde a la succión de equilibrio, siendo de 2,600 kPa.

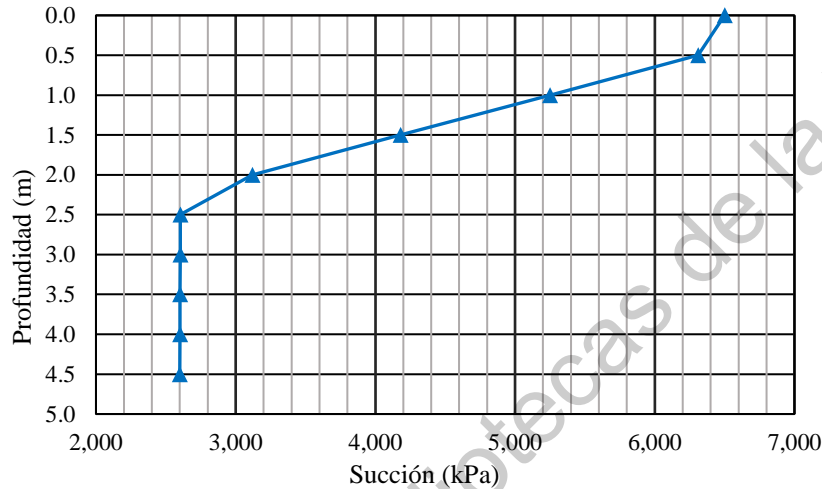


Figura V.3 Variación de la succión con la profundidad en suelo de Jurica (López, 1995).

V.5 Modelo de precipitación-evapotranspiración

La succión en el medio no sólo se ve afectada por el paso del tiempo. La precipitación y la evapotranspiración agregan o quitan humedad al medio, lo que afecta al grado de saturación y en consecuencia a la succión.

La evapotranspiración comprende la evaporación del suelo y la transpiración de las plantas, generalmente envuelve una fracción grande de la precipitación, en climas áridos corresponde hasta al 90%, mientras que en climas húmedos puede ir del al 70% (Haan *et al.*, 1994).

La precipitación se introducirá en milímetros de agua a través de parámetros escalares que posteriormente serán almacenados en una tabla que asocie el mes con su precipitación. La evapotranspiración será calculada en las mismas unidades y las variables que intervienen en su cálculo son la temperatura media mensual y cantidad de horas de sol por día. Los nombres asignados a los parámetros escalares están en la Tabla V-2.

Tabla V-2 Parámetros escalares de las condiciones climáticas.

Parámetro	Descripción
MES	Mes de estudio, siendo el número 1 para el mes de enero
PREC	Precipitación promedio mensual en milímetros
TEM	Temperatura media mensual en °C
HSOL	Horas de sol promedio por día
TIEMT	Tiempo total del estudio

V.5.1 Método de Thornthwaite

El método consiste en obtener la evapotranspiración mensual a través de dos variables: la temperatura y la cantidad de horas al día. La relación queda definida en la ecuación (V-9).

$$ETP = 16 \left(\frac{10t}{I} \right)^a \left(\frac{N}{12} \right) \quad (V-9)$$

Donde:

ETP = evapotranspiración para un mes dado, en mm de agua.

t = temperatura media mensual, en °C.

I = índice de calor anual, $I = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{t}{5} \right)^{1.514}$

$a = (675E - 09) * I^3 + (771E - 07) * I^2 + (1792E - 05) * I + 0.49239$

N = número máximo de horas del sol, dependiendo del mes y la latitud.

En cada mes se restará a la precipitación el valor de la evapotranspiración para obtener la cantidad de agua que está entrando o saliendo del medio. Se creará un nuevo parámetro TABLA que llevará por nombre LLUVF de 48 renglones que asociará el mes con la precipitación menos la evapotranspiración.

El tamaño del parámetro LLUVF se debe a que el análisis se efectuará en un periodo de 48 meses. Los resultados mensuales de los primeros doce meses se repetirán otras tres veces para llegar a un total de 48.

V.5.2 Método cosinusoidal

Una alternativa al cálculo de la precipitación-evapotranspiración es a través de una función cosinusoidal. Las funciones trigonométricas tienen un comportamiento cíclico que podría ser útil para modelar la cantidad de agua que entra y sale del medio.

Aquí no intervienen las variables de precipitación, temperatura y horas de sol, pero la ecuación (V-10) requiere ser calibrada con base en las succiones resultantes del análisis y los valores tomados en el sitio.

$$PRECFM = A * \cos\left(\frac{\pi}{6} * m - \frac{\pi}{2}\right) \quad (V-10)$$

Donde:

PRECFM = cantidad neta de agua que ingresa o sale del dominio, en mm de agua.

A = amplitud de la función, se establece inicialmente de 70 mm.

m = mes, de 1 a 12.

El ángulo empleado en la función está expresado de tal manera que se cumplirá un ciclo cuando el mes *m* sea un múltiplo de 12 (un ciclo se completa cada 2π) y tendrá un desfase dado por el ángulo de fase que es igual a $-\pi/2$.

V.6 Geometría del dominio

Para el análisis se propone un dominio de 12 metros de longitud y 2.4 metros de profundidad, con elementos finitos cuadrados de 0.1 metros por lado. Los parámetros escalares, así como las magnitudes a emplear en el análisis se muestran en la Tabla V-3.

Tabla V-3 Parámetros escalares con la información de la geometría del dominio

Parámetro	Descripción	Magnitud
LEST	Longitud del estrado de suelo en estudio	12 metros
H1	Espesor del estrato	2.4 metros
SEPM	Separación de la malla de elementos finitos	0.1 metros

V.7 Análisis análogo térmico transitorio

El problema de flujo se analiza de manera análoga a un problema térmico transitorio, donde se obtendrá la variación de la succión en el dominio a lo largo del tiempo en el que actúa el modelo de precipitación-evapotranspiración. Las variables análogas son:

- La succión s como la temperatura.
- La conductividad hidráulica k_w como la conductividad térmica.
- El coeficiente de difusión D como el recíproco de la capacidad específica.

La información generada al término del análisis será almacenada en un parámetro matricial que se nombrará como SUCTIE. Su tamaño estará dado por la cantidad de nodos y el tiempo en meses, resultando en 3025 renglones y 48 columnas. Su estructura se presenta en la ecuación (V-11).

$$\text{SUCTIE} = \begin{matrix} & \xrightarrow{\text{Tiempo}} & & & & \\ \text{Nodos} \downarrow & \begin{pmatrix} s_{11} & s_{12} & \dots & s_{1n} \\ s_{21} & s_{22} & \dots & s_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ s_{n1} & s_{n2} & \dots & s_{nn} \end{pmatrix} & & & \end{matrix} \quad (\text{V-11})$$

V.8 Generación del perfil de succiones y capa activa

Al obtener la matriz SUCTIE se tendrán todos los valores de la succión en los nodos del dominio al paso del tiempo, esto da información muy valiosa que ayudará a determinar los perfiles de succión y la ubicación de la capa activa en distintas ubicaciones a lo largo del eje horizontal (para los perfiles de succión) y el tiempo.

V.9 Selección del último ciclo de succiones máxima-mínima-máxima

Debido a que el análisis parte con todos los nodos con un mismo valor de succión (correspondiente a la succión de equilibrio), el algoritmo de histéresis hidráulica no se

aplicará desde el inicio, la propuesta es usarlo únicamente para el último ciclo de succiones máxima-mínima-máxima.

Dicho ciclo en los nodos superficiales corresponde al último periodo de sequía-humedad-sequía de acuerdo al modelo de precipitación-evapotranspiración. Sin embargo, a medida que la profundidad aumenta se presentan variaciones en el tiempo en que esto ocurre.

Dado ese comportamiento se elabora una rutina capaz de detectar los últimos valores máximos de succión para un rango de meses dado.

V.10 Histéresis hidráulica

El método desarrollado por Zhou et al. (2012) para calcular los ciclos de histéresis hidráulica se aplica a todos los nodos en el periodo definido en el punto anterior. Se parte de la curva principal de secado, ya que se inicia con un máximo de succión, por lo que el suelo estaba en la trayectoria de secado y es la mejor aproximación que se tienen para iniciar.

Para el proceso de histéresis hidráulica se requerirán de parámetros escalares y matriciales. Dentro de la Tabla V-4 se describe cada parámetro a usar en el algoritmo.

Tabla V-4 Variables utilizadas para el algoritmo de histéresis hidráulica.

Variable	Descripción
VECT_HIST	Parámetro TABLE que almacena los valores de succión y grado de saturación del ciclo de histéresis para definir su trayectoria.
SUC_INI	Parámetro escalar, succión inicial.
SUC_FIN	Parámetro escalar, succión final.
DELTA_S	Incremento de succión que se irá sumando hasta que la variable SUC_INI se iguale a SUC_FIN.
SAT	Parámetro escalar, grado de saturación.
SW	Parámetro escalar, succión en la SWRC_W para un valor de grado de saturación conocido.
SD	Parámetro escalar, succión en la SWRC_D para un valor de grado de saturación conocido.
CRAS_H	Parámetro TABLE que contiene los puntos experimentales de humedecimiento de la CRAS.

CRAS_S	Parámetro TABLE que contiene los puntos experimentales de secado de la CRAS.
PENDIENTE	Pendiente de la Curva de Retención Agua-Suelo para un valor de grado de saturación dado.
DIF	Gradiente de escaneo calculado con las ecuaciones (II-10) y (II-11)
b	Parámetro empírico siempre positivo, tomado igual a 4.5 (Zhou <i>et al.</i> , 2012)

Dirección General de Bibliotecas de la UAQ

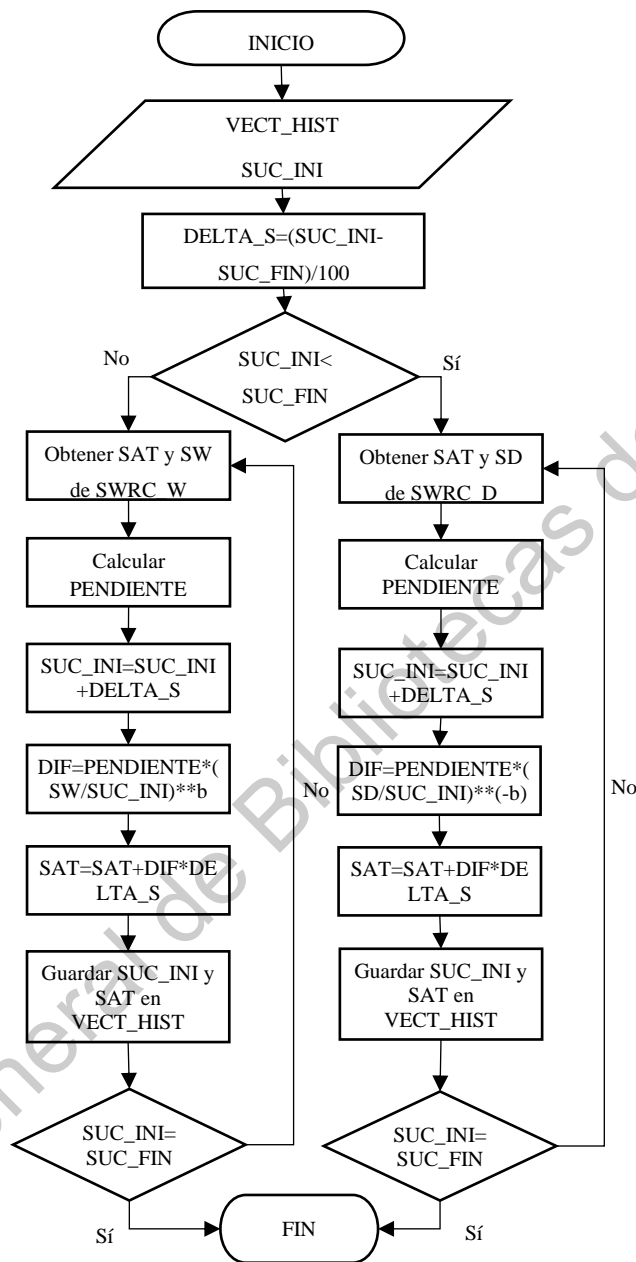


Figura V.4 Diagrama de flujo del algoritmo de histéresis hidráulica basado en el modelo de Zhou, et al. (2012).

La succión inicial y final en cada ciclo no se indicará de manera manual, esta información será tomada de la matriz SUCTIE aplicando el algoritmo descrito en la Figura V.5.

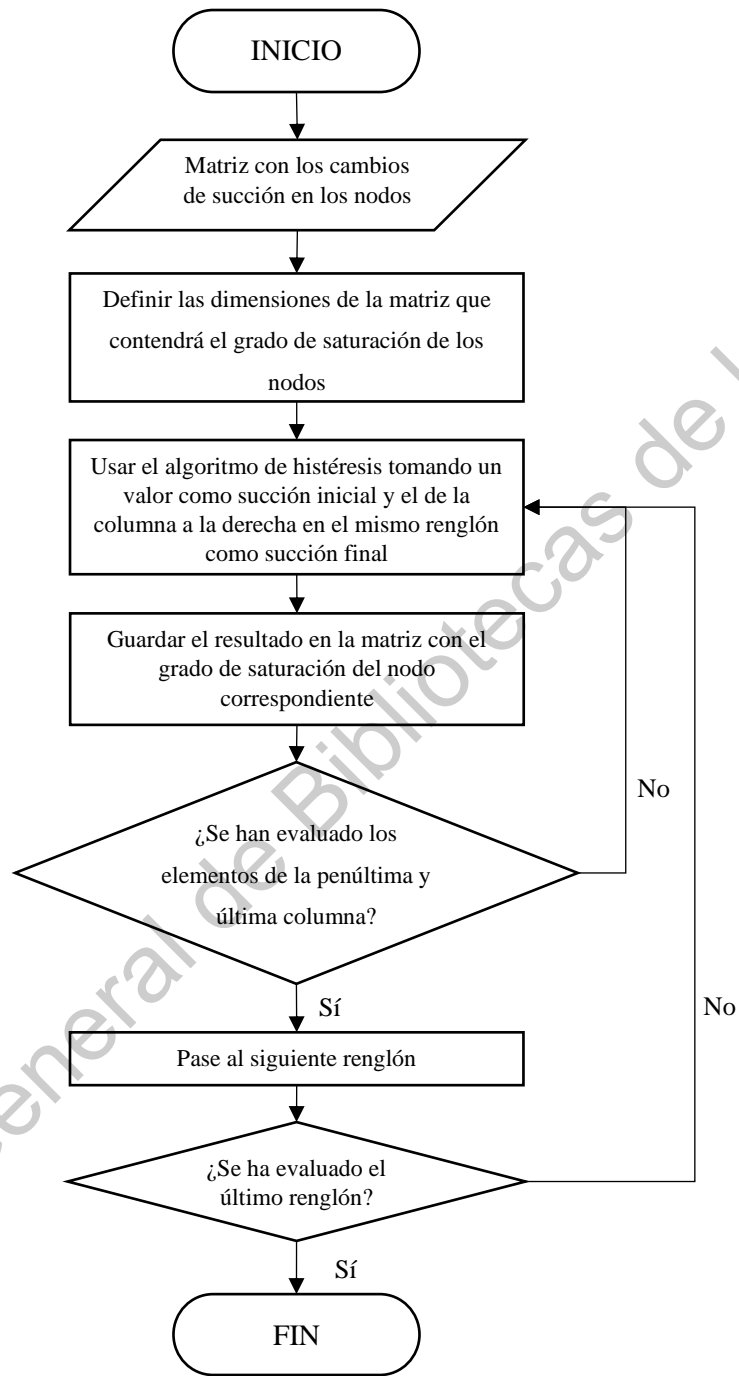


Figura V.5 Diagrama de flujo para utilizar el algoritmo de cálculo de las curvas de histéresis hidráulica en el modelo acoplado.

La matriz generada al aplicar el proceso de histéresis hidráulica se nombrará como CHI y tendrá el mismo tamaño que SUCTIE, pero no tendrá valores en todas sus celdas, sólo en

aquellas que correspondan al ciclo analizado. La matriz tiene la estructura de la ecuación (V-12).

$$\text{CHI} = \begin{matrix} & \xrightarrow{\text{Tiempo}} \\ \begin{matrix} \downarrow \text{Nodos} \\ \left(\begin{array}{cccc} s_{11} & s_{12} & \dots & s_{1n} \\ s_{21} & s_{22} & \dots & s_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ s_{n1} & s_{n2} & \dots & s_{nn} \end{array} \right) \end{matrix} \end{matrix} \quad (\text{V-12})$$

V.11 Cálculo del esfuerzo por succión

Una vez aplicado el algoritmo de histéresis hidráulica para obtener la matriz de los cambios de grado de saturación al paso del tiempo se calculan los esfuerzos debidos a la succión. Como ya se ha comentado el grado de saturación será considerado igual al parámetro χ .

La matriz resultante tendrá las mismas dimensiones que SUCTIE y CHI, su estructura queda plasmada en la ecuación (V-13).

$$\text{ESFEFE} = \begin{matrix} & \xrightarrow{\text{Tiempo}} \\ \begin{matrix} \downarrow \text{Nodos} \\ \left(\begin{array}{cccc} \chi s_{11} & \chi s_{12} & \dots & \chi s_{1n} \\ \chi s_{21} & \chi s_{22} & \dots & \chi s_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \chi s_{n1} & \chi s_{n2} & \dots & \chi s_{nn} \end{array} \right) \end{matrix} \end{matrix} \quad (\text{V-13})$$

Si bien, para generar la matriz CHI se tomaron en cuenta las características individuales de cada nodo, en el caso de la matriz ESFEFE se evaluarán en todos los nodos las mismas columnas, siendo estas las del último periodo sequía-humedad-sequía de los nodos superficiales.

V.12 Estudio para el suelo en distintas condiciones

El análisis se efectuará considerando dos condiciones para el dominio de suelo no saturado, en la primera el suelo no tendrá ningún elemento adicional, mientras que en la segunda se tendrá una losa actuando en la superficie.

Se presenta esto ya que antes de iniciar cualquier obra civil el suelo se encuentra en un estado natural, que es lo que se pretende representar con la primera condición del estudio. Posteriormente se evaluará el comportamiento con un elemento que altere la cantidad de flujo que entra y sale del medio, dado que la losa se considera impermeable.

Se analizará la evolución del esfuerzo por succión en nodos que se consideren significativos, tales como los que se encuentren: a una misma profundidad a lo largo del eje horizontal para la superficie, medio y un metro de profundidad; para distintas profundidades cuando la coordenada horizontal sea de 1.8, 3.6 y 6.0 metros, se muestra las zonas de interés en la Figura V.6.

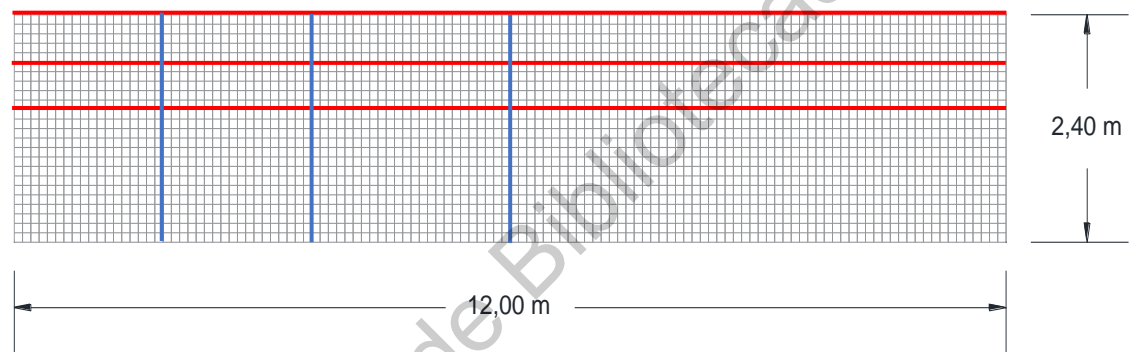


Figura V.6 Ubicación espacial de los nodos a ser analizados en el dominio marcados en rojo y azul.

V.12.1 Comportamiento del esfuerzo por succión a distintas profundidades

Se evaluarán los esfuerzos por succión a distintas profundidades, para ello se utilizará la matriz ESFEFE y se solicitará al programa que ubique los nodos en una misma coordenada x a todas las profundidades posibles (desde 0 hasta 2.4 metros de profundidad en incrementos de 0.1 metros).

Una vez ubicados los nodos se almacenarán de manera temporal los valores del mes de estudio y el esfuerzo por succión en un parámetro TABLA, que será nombrado GRAFICA_ESFUERZOS. Con ello será posible graficar en el eje de las abscisas el mes y en el de las ordenadas el esfuerzo.

V.12.2 Comportamiento del esfuerzo por succión a una misma profundidad

De manera similar a los esfuerzos a distintas profundidades y a través de otra rutina, se solicitará al programa que localice todos los nodos a una misma profundidad. Con esa información se creará una TABLA llamada ESF_MISMA_PROF en la cual se almacenarán los datos de la coordenada x y el esfuerzo por succión correspondiente.

Los elementos dentro de la TABLA se irán reescribiendo para poder observar el comportamiento en distintos tiempos, siempre graficando la posición x con el esfuerzo respectivo.

V.13 Macros del código

A continuación, se presentan las macros necesarias en el código para el modelo de flujo. Sus nombres y funciones están en la Tabla V-5.

Tabla V-5 Macros en el código del modelo de flujo para suelos no saturados.

Macro	Funciones
GRAFICA_SUCSAT	Se ingresan los valores experimentales de la CRAS, así como otras propiedades del suelo, como el peso volumétrico seco y la relación de vacíos.
GRAFICA_SUCTHETA	Convierte la CRAS del dominio succión-grado de saturación al de succión-contenido volumétrico de agua para obtener tanto la conductividad hidráulica como la difusividad.
CURVA_PERMEAB	Calcula las curvas de conductividad hidráulica con base en la CRAS.
CURVA_DIFUSION	Calcula la difusividad con base en las curvas de conductividad hidráulica y la CRAS. Al final se regresa a la CRAS al dominio de succión-grado de saturación.
SUC_PROF	Se grafica el perfil de succiones del sitio de estudio.
LLUVIAS	Se generan dos posibles modelos de evapotranspiración considerando la precipitación media mensual, horas de sol y temperatura del sitio de estudio.
GEOMETRIA	Se define el tamaño del dominio (longitud y profundidad).
MALLADO	Se crea el mallado y se asignan las condiciones al modelo.

CASOPREC	Se indica que la acción de precipitación- <i>evapotranspiración</i> tiene efecto en toda la superficie del dominio.
CASOLOS	Se indica que la acción de la precipitación- <i>evapotranspiración</i> tiene efecto en la superficie del dominio, excepto en la zona central de la membrana impermeable.
ANALISIS	Se realiza el análisis análogo térmico transitorio.
VISU	Se generan las gráficas del dominio con los valores de la succión al paso del tiempo.
PREPAN	Se crea la matriz con las succiones en los nodos al paso del tiempo (SUCTIE).
PREVIO_CHI	Se halla el mes que corresponde al valor máximo de succión para cada nodo entre los meses 12 a 34.
GEN_CHI	Se genera la matriz CHI con base en los ciclos de histéresis hidráulica partiendo del mes encontrado en la macro PREVIO_CHI hasta el mes 46.
CONTROL_CHI	Se establece un control para determinar si el rango para encontrar la succión máxima es correcto o se debe ampliar, esto se hace porque los ciclos de histéresis hidráulica parten de la curva principal de secado hacia la trayectoria de humedecimiento.
ESF_EFEC	Se crea la matriz con los esfuerzos por succión (ESFEFE).
VECTOUT	Se extraen en forma de vectores los esfuerzos por succión de todos los nodos, un vector por cada mes, del 34 al 46.
PERFIL_SUCCIONES	Con base en la matriz SUCTIE se crea el perfil de succiones indicando la ubicación en el eje horizontal y el mes de estudio.
CAPA_ACTIVADA	Evaluando las diferencias de succión en todos los nodos de manera vertical se determinan los puntos que forman la capa activa para una diferencia determinada por el usuario.
ESFUERZOS_SUCCION_NODOS	Se elaboran las gráficas de la evolución del esfuerzo por succión al paso del tiempo para distintas profundidades y una misma coordenada horizontal.
ESFUERZOS_MISMA_PROFUNDIDAD	Se elaboran las gráficas del esfuerzo por succión a una misma profundidad a lo largo del eje horizontal.

VI. Resultados y discusión

VI.1 Gráficas de propiedades hidráulicas

La CRAS obtenida con los datos experimentales de Galaviz (2016) se muestra en la Figura VI.1. En todas las gráficas que asocian propiedades hidráulicas del suelo, el color rojo es empleado para representar la trayectoria de secado y el azul para la de humedecimiento. Posteriormente se convierte el grado de saturación a contenido volumétrico de agua a través de la ecuación (V-1) presentada en la metodología. La CRAS resultante es presentada en la Figura VI.2 y es la que se empleará en el cálculo de la conductividad hidráulica y el coeficiente de difusión.

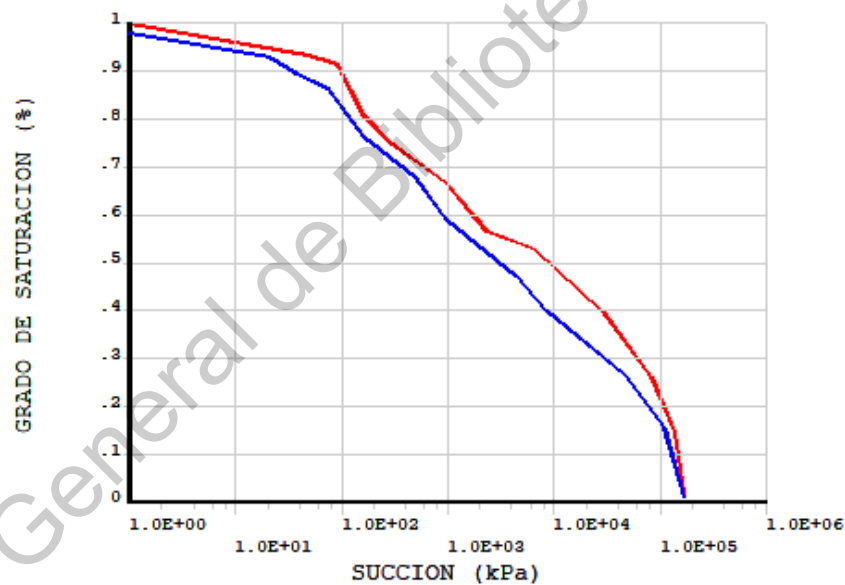


Figura VI.1 CRAS experimental en el dominio succión-grado de saturación, datos de Galaviz (2016).

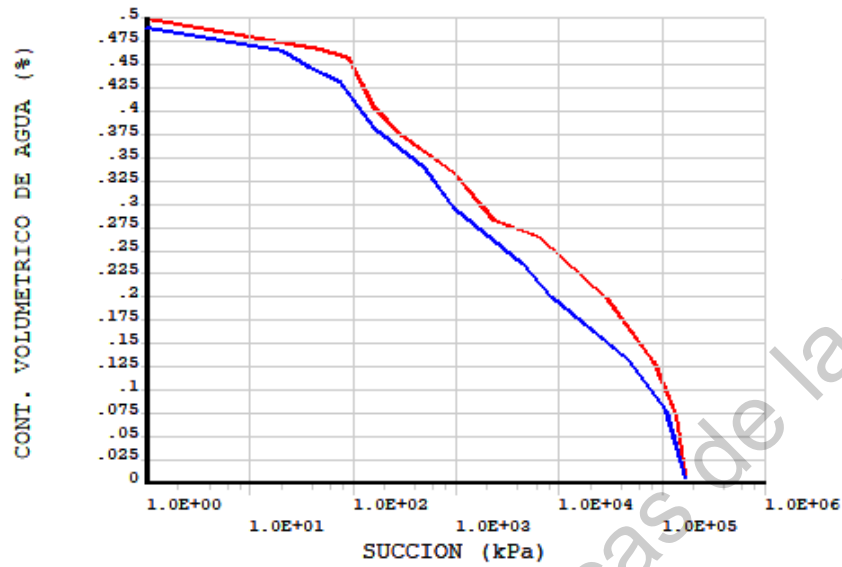


Figura VI.2 CRAS experimental en el dominio succión-contenido volumétrico de agua, datos de Galaviz (2016).

Las curvas de conductividad hidráulica se presentan en la Figura VI.3 están en el dominio de succión-conductividad hidráulica, ya que estas variables deben estar relacionadas al momento de ejecutar el análisis análogo térmico transitorio. Las permeabilidades saturadas calculadas (parámetro k_{SC} en cada una de las trayectorias) están en la Tabla VI-1.

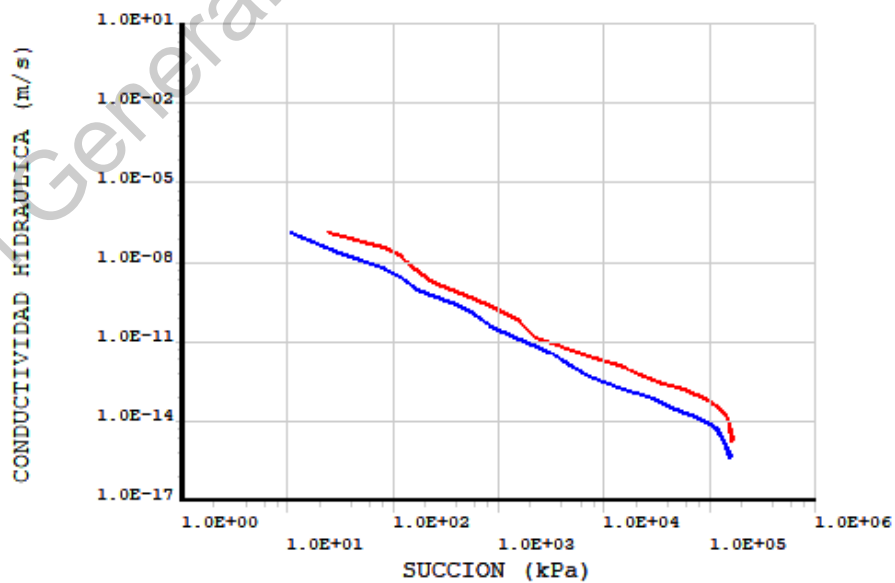
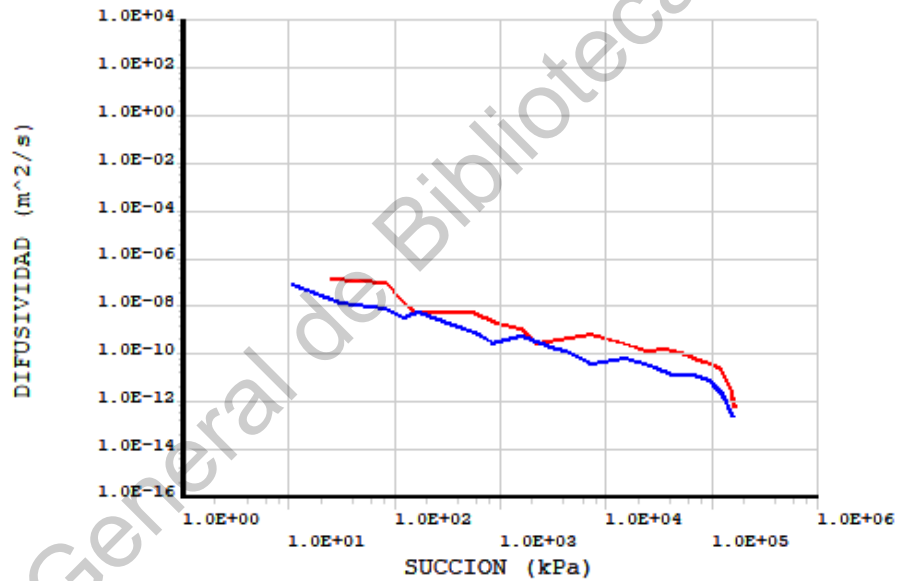


Figura VI.3 Conductividad hidráulica obtenida al aplicar el algoritmo de Fredlund (2012).

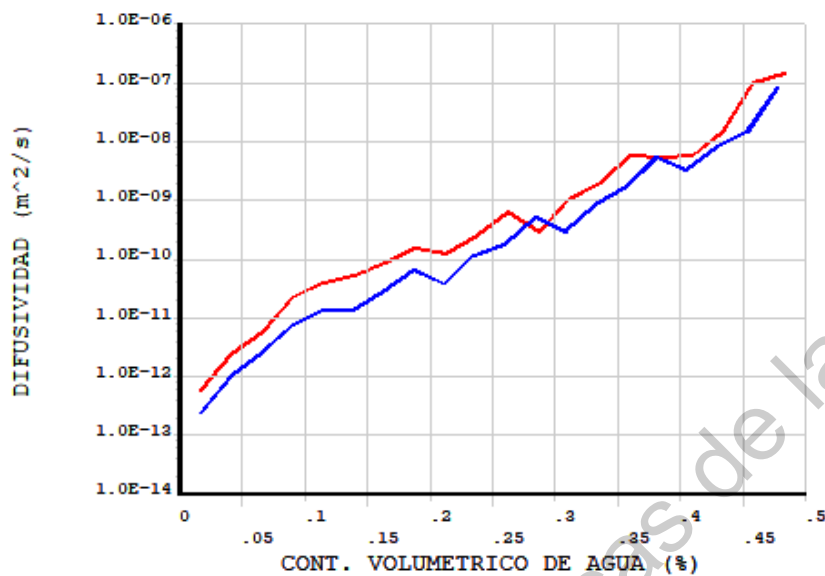
Tabla VI-1 Permeabilidades saturadas calculadas con el método de Fredlund (2012).

Variable	Valor
k_{sc} humedecimiento	2.10e-07 m/s
k_{sc} secado	4.74e-08 m/s

Las gráficas del coeficiente de difusión se muestran en la Figura VI.4, la que está en el dominio de succión-coeficiente de difusión será la empleada en el análisis, pero también se grafica respecto al contenido volumétrico de agua, que es como comúnmente aparece reportado en la literatura.



a)



b)

Figura VI.4 Coeficiente de difusión calculado a partir del método de Li (2006), a) Respecto a la succión, b) Respecto al contenido volumétrico de agua.

VI.2 Modelo de precipitación-evapotranspiración

En la Figura VI.5 se muestran las gráficas correspondientes a la precipitación-evapotranspiración de la zona de estudio para los 48 meses (1440 días). La curva roja muestra únicamente los valores de precipitación, mientras que la azul, presenta esa misma precipitación descrita por la curva roja menos la evapotranspiración calculada con base en la temperatura media mensual y la cantidad de horas de sol diarias a través del método de Thornthwaite.

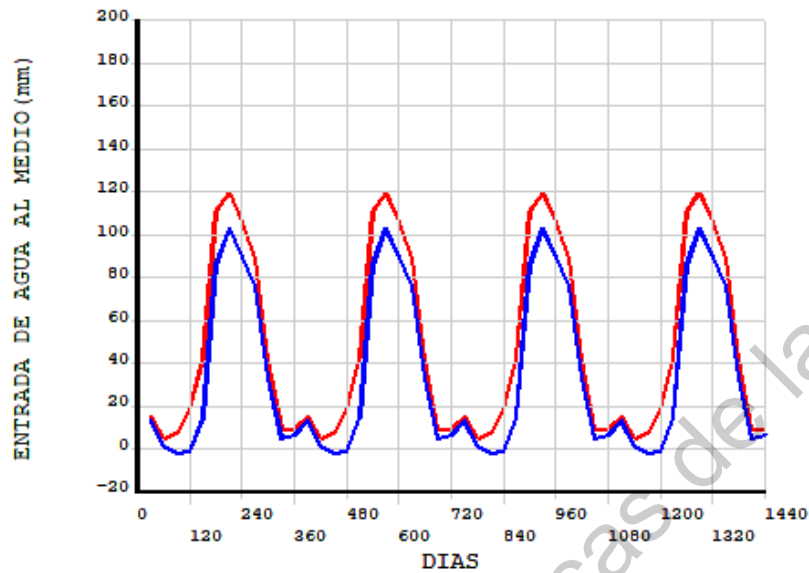


Figura VI.5 Precipitación (rojo) y precipitación-evapotranspiración (azul) de acuerdo al método de Thornthwaite.

De este método destaca que, prácticamente, no hay salida de agua del medio, ya que los valores mínimos de entrada de agua están cerca del cero y para que hubiera salida debería haber valores negativos.

Considerando lo anterior, el modelo de precipitación-evapotranspiración de Thornthwaite queda descartado y en la Figura VI.6 se presenta la alternativa de utilizar una función cosinusoidal para modelar el comportamiento de entrada y salida de agua del medio.

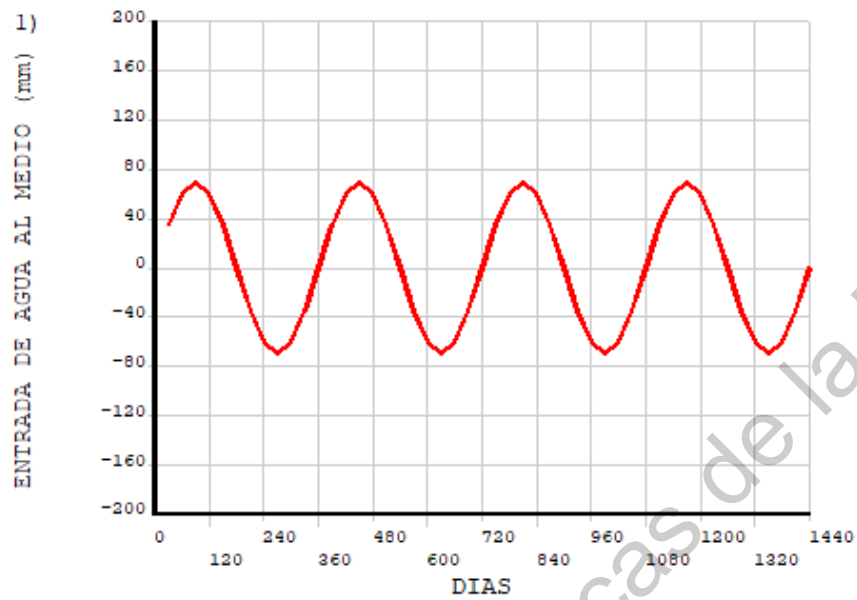


Figura VI.6 Modelo de precipitación-*evapotranspiración* cosinusoidal.

VI.3 Dominio de suelo no saturado

El dominio se grafica dentro de ANSYS como se muestra en la Figura VI.7, está comprendido por 2880 elementos finitos *PLANE55* y 3025 nodos con un grado de libertad cada uno, estos grados de libertad corresponden a la succión.

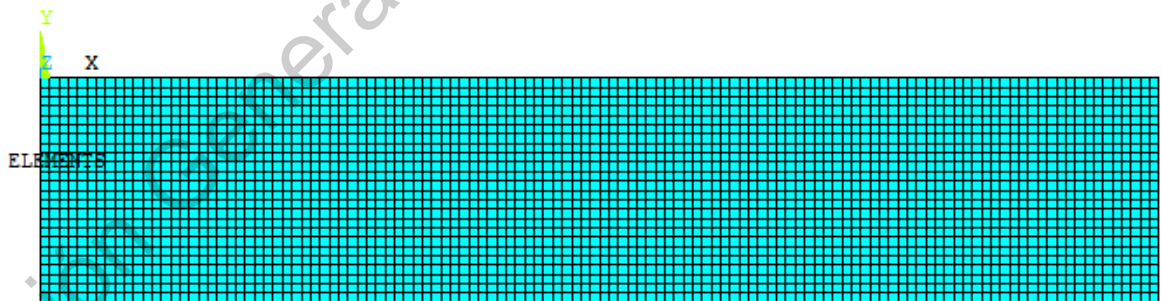


Figura VI.7 Dominio y mallado para el análisis dentro de ANSYS.

VI.4 Análisis del suelo natural

VI.4.1 Cambios en la succión al paso del tiempo

En la Figura VI.8 puede observarse cómo varía la succión en el medio tanto de manera espacial como temporal. Es importante recalcar que a lo largo del eje horizontal para un mismo tiempo y profundidad la succión no exhibe variación.

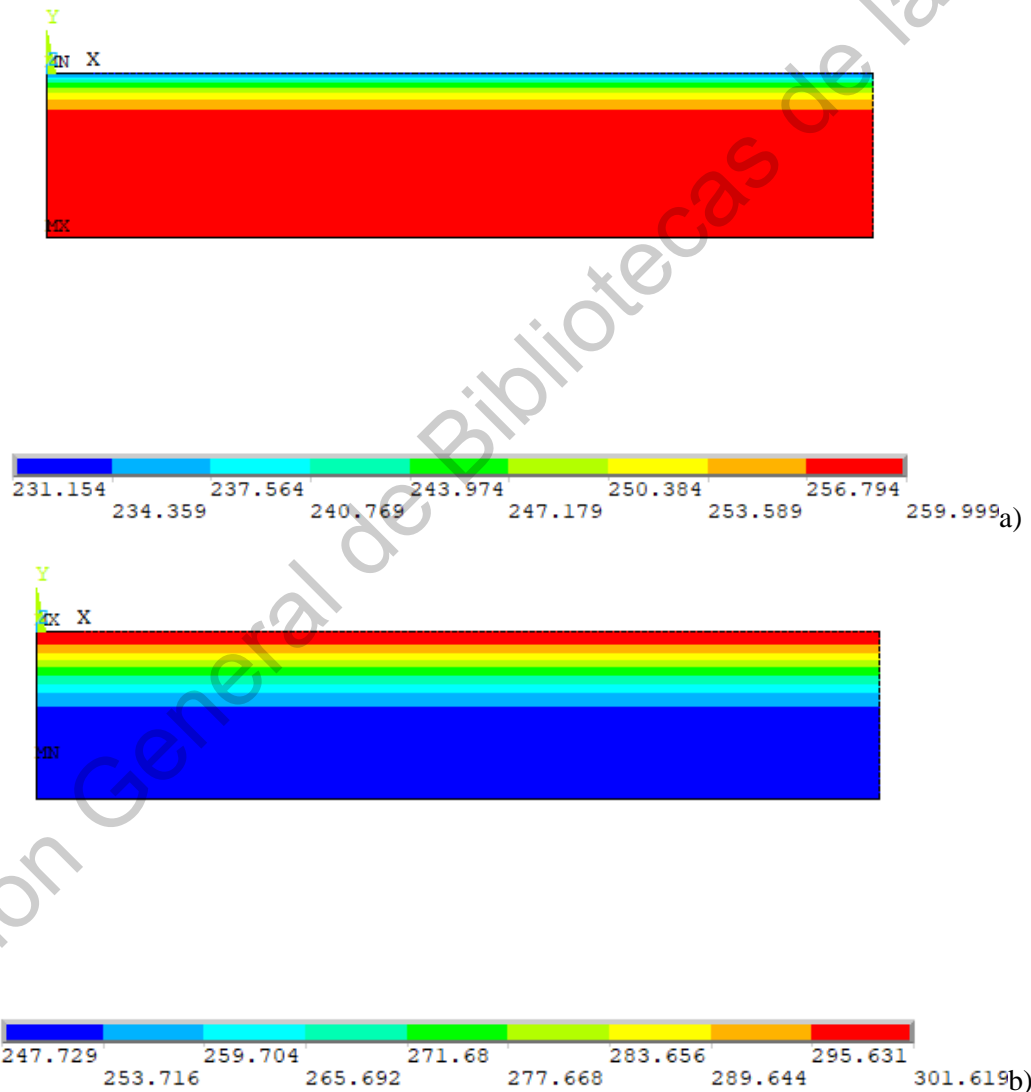


Figura VI.8 Succiones en el dominio al paso del tiempo para el suelo en estado natural, a) 30 días, b) 1440 días.

Los perfiles de cómo varía la succión en distintos meses de análisis se muestra en la Figura VI.9.

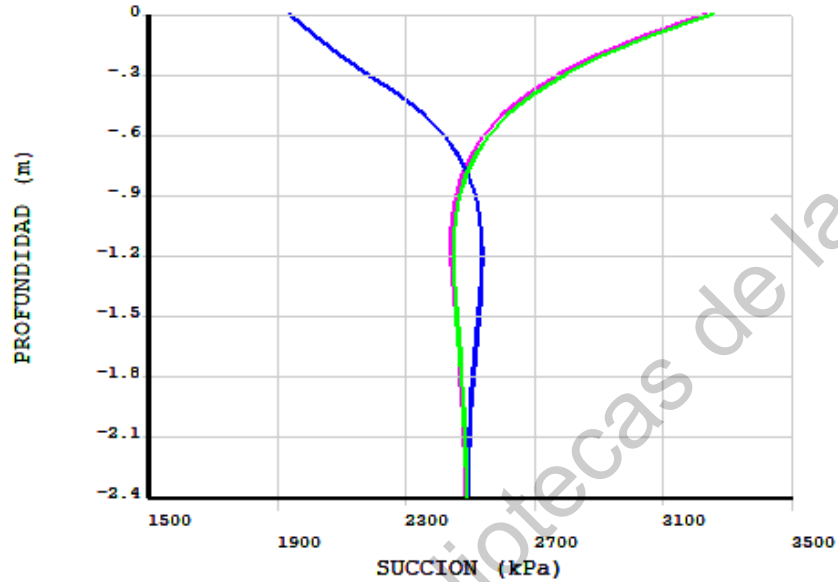


Figura VI.9 Perfiles de succión para $x=1.8$ m en los meses 34 (lila), 40 (azul) y 46 (verde).

VI.4.2 Capa activa

El método para definir la capa activa dio como resultado la curva presentada en la Figura VI.10 a 1.20 m de profundidad, está construida para que ante una diferencia menor a 2 kPa en dos nodos consecutivos en el eje vertical se defina como un punto para la capa activa. Si el resultado no fuese satisfactorio se podría disminuir esa variación entre la succión de los nodos y aumentar la profundidad del dominio.

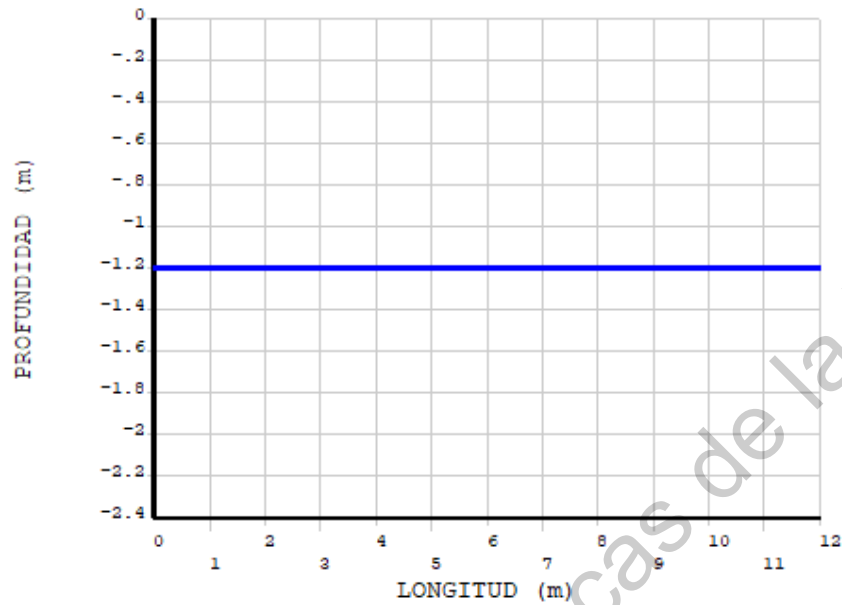


Figura VI.10 Capa activa considerando una variación menor a 2 kPa en los meses 34, 40 y 46.

VI.4.3 Curvas de histéresis hidráulica

El algoritmo de histéresis hidráulica se aplicó a todos los nodos en el último periodo de succión máxima-mínima-máxima, el cual para los nodos superficiales corresponde al último ciclo de sequía-humedad-sequía. Algunas modificaciones tuvieron que hacerse al esquema descrito en la Figura V.4 ya que el tiempo de procesamiento se hacía muy largo, entre los cambios está el uso de un parámetro TABLE con pendientes de la CRAS en lugar de calcular su valor en cada ciclo.

El periodo en la superficie quedó comprendido del mes 34 al 46. Con el fin de aplicar correctamente el proceso en los demás nodos, se buscó el máximo valor de succión para meses previos al mes 34, ya que los máximos y mínimos no se presentan de forma simultánea en todos los nodos, y al iniciar el algoritmo partiendo de la curva de secado se estaría cayendo en un error si la succión inicial no es la máxima de un ciclo.

En la Figura VI.11 se muestran las curvas de histéresis hidráulica (en color verde) de nodos superficiales para distintas posiciones en el eje horizontal y se observa que no existe variación alguna, en la Figura VI.12 tampoco hay diferencia entre ellas al igual que en la Figura VI.13.

Si bien no existe variación en las curvas de histéresis para una misma profundidad, sí la hay a distintas profundidades y la variación en el grado de saturación se va haciendo menor a medida que la profundidad crece.

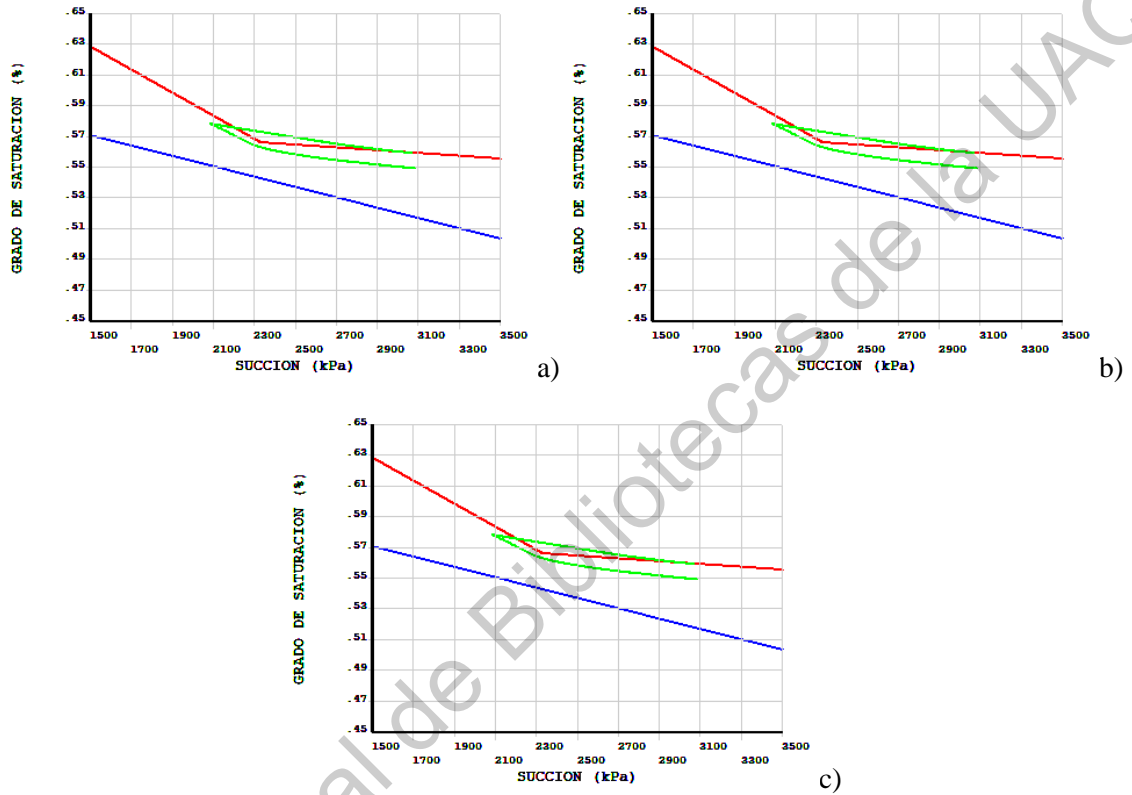
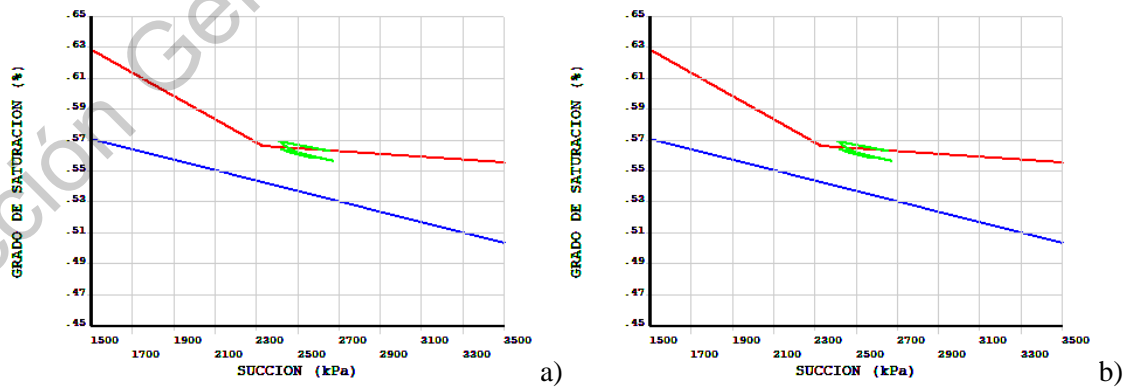


Figura VI.11 Ciclos de histéresis hidráulica en nodos con coordenadas: a) (1.8,0.0), b) (3.6,0.0), c) (6.0,0.0).



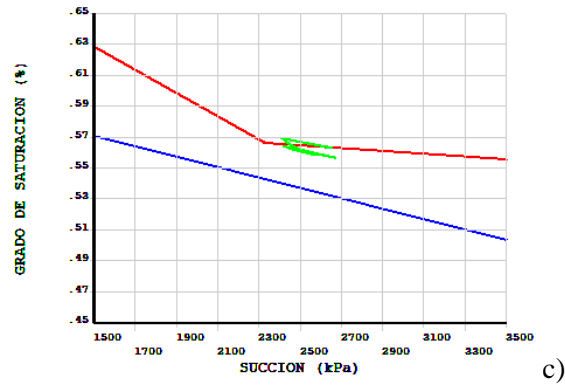


Figura VI.12 Ciclos de histéresis hidráulica en nodos con coordenadas: a) (1.8,-0.5), b) (3.6,-0.5), c) (6.0,-0.5)

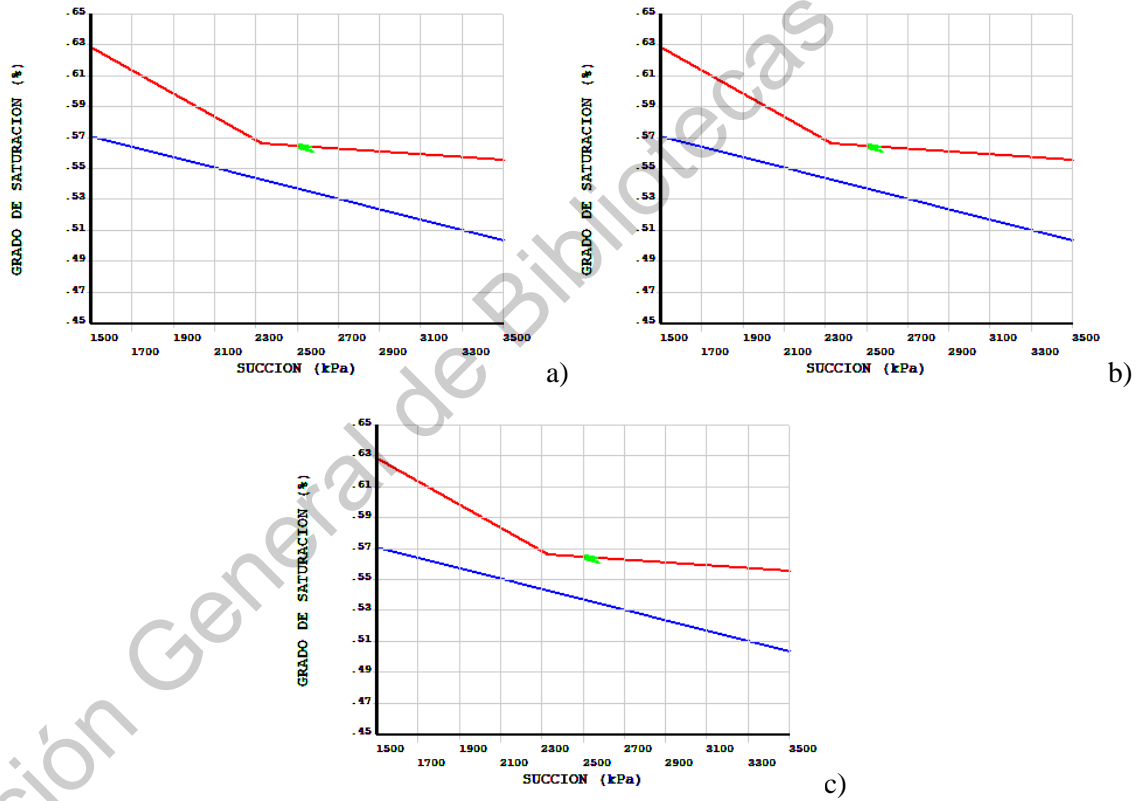


Figura VI.13 Ciclos de histéresis hidráulica en nodos con coordenadas: a) (1.8,-1.0), b) (3.6,-1.0), c) (6.0,-1.0)

Las curvas de histéresis hidráulica salen parcialmente de las fronteras delimitadas por las curvas principales de la CRAS. Sin embargo, esto no es un error en la implementación del método de Zhou et al. (2012), lo que sucede es que las ecuaciones (II-10) y (II-11) hacen

que la curva de histéresis sea asintótica a la curva principal en la trayectoria a la que se dirija, pero no impiden que cruce la otra curva principal.

Lo anterior deja dos opciones: trabajar en nuevas ecuaciones para que las curvas de histéresis definan su trayectoria considerando ambas curvas principales para que no abandonen el área delimitada o realizar un ajuste con base en los puntos experimentales para definir la CRAS.

VI.4.4 Esfuerzos por succión

En la Figura VI.14 se presentan distintas curvas con el esfuerzo por succión a lo largo de los meses 34 a 46 para $x=1.8$ metros a distintas profundidades. Cada curva tiene una separación de 0.10 metros (la longitud de un lado del elemento finito usado) y la que tiene mayores variaciones en el esfuerzo al paso del tiempo corresponde al nodo superficial, se observa que los esfuerzos varían menos a medida que la profundidad crece.

Dado que la succión es la misma al variar la posición en el eje horizontal para una misma profundidad y tiempo, las curvas de esfuerzos por succión son iguales independientemente de dónde se evalúen en el eje horizontal.

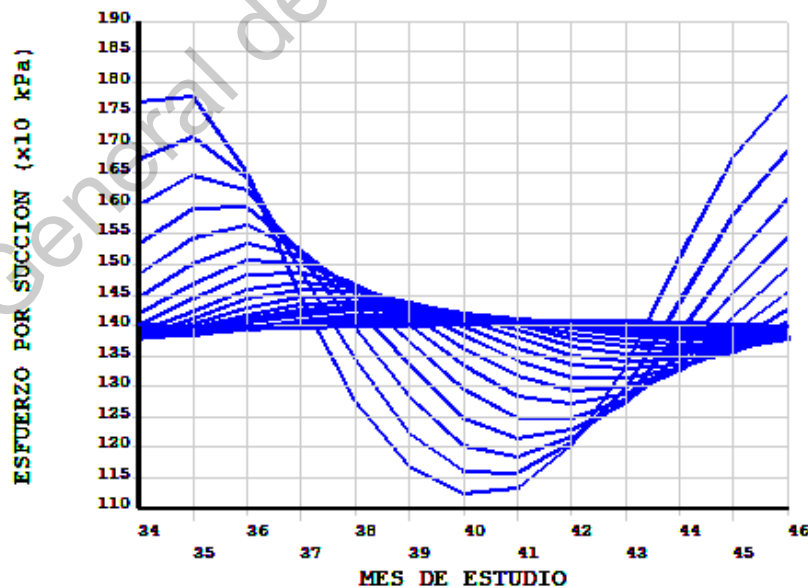


Figura VI.14 Curvas del esfuerzo por succión a distintas profundidades con separación de 0.10 m en $x=1.8$ m.

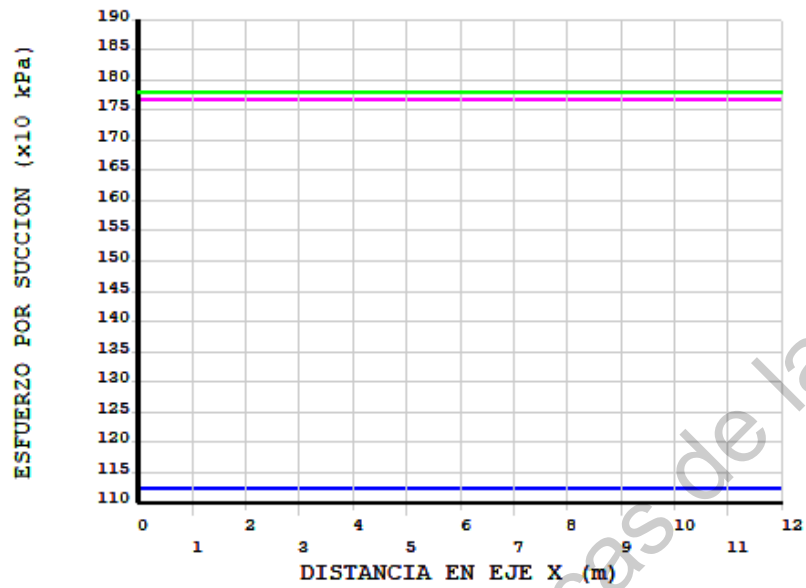


Figura VI.15 Esfuerzos por succión a 0.0 m de profundidad para los meses 34 (lila), 40 (azul) y 46 (verde).

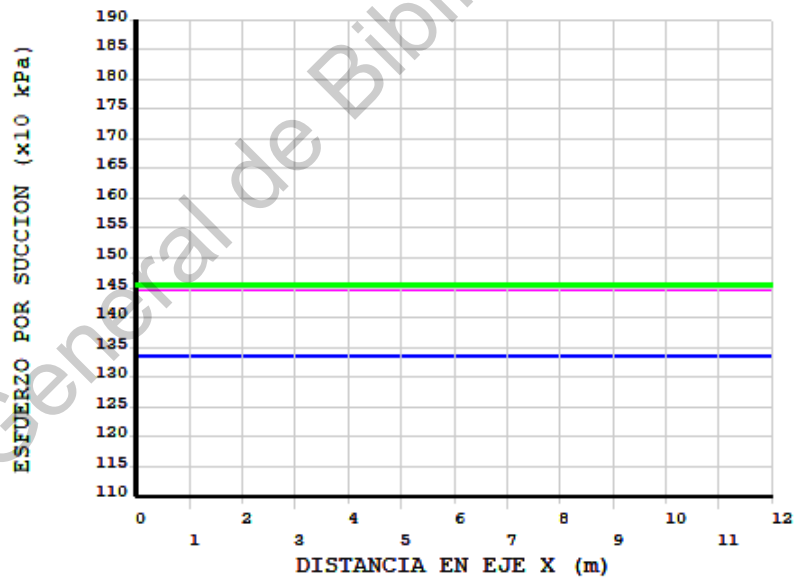


Figura VI.16 Esfuerzos por succión a 0.5 m de profundidad para los meses 34 (lila), 40 (azul) y 46 (verde).

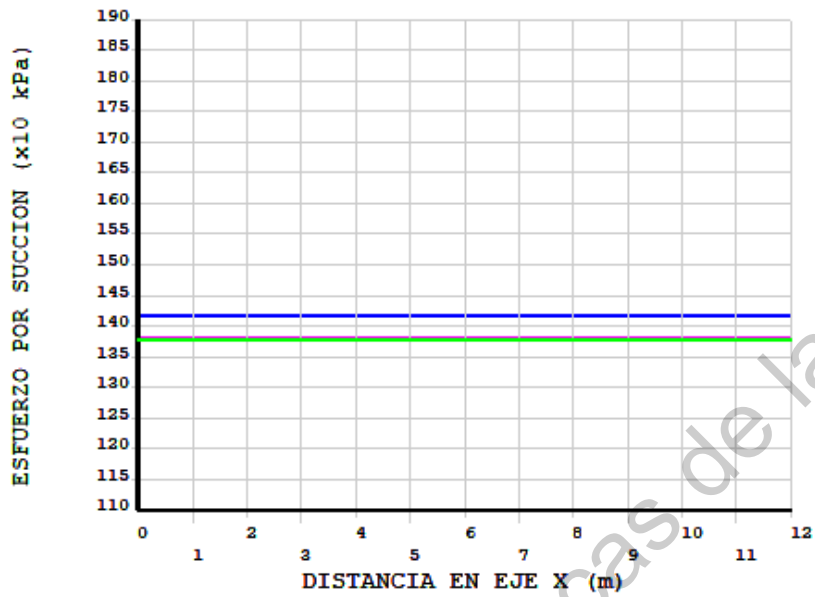
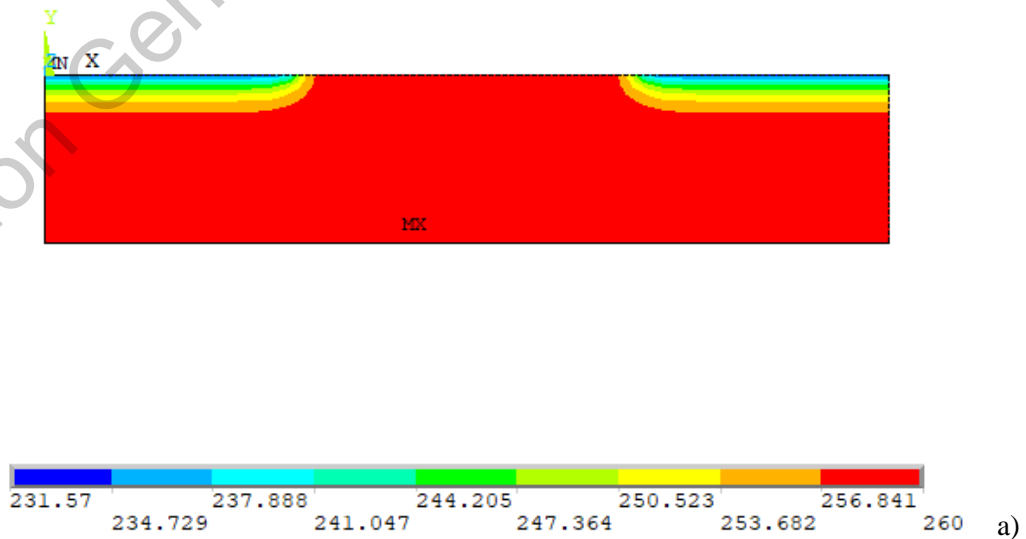


Figura VI.17 Esfuerzos por succión a 1.0 m de profundidad para los meses 34 (lila), 40 (azul) y 46 (verde).

VI.5 Análisis del suelo con losa de cimentación

VI.5.1 Cambios en la succión al paso del tiempo

A diferencia del caso del suelo natural, en este segundo análisis sí se presentan diferencias en los valores de la succión para una misma profundidad y tiempo, esto se da al tener un elemento en la superficie que intervenga en la cantidad de agua que entra y sale del medio.



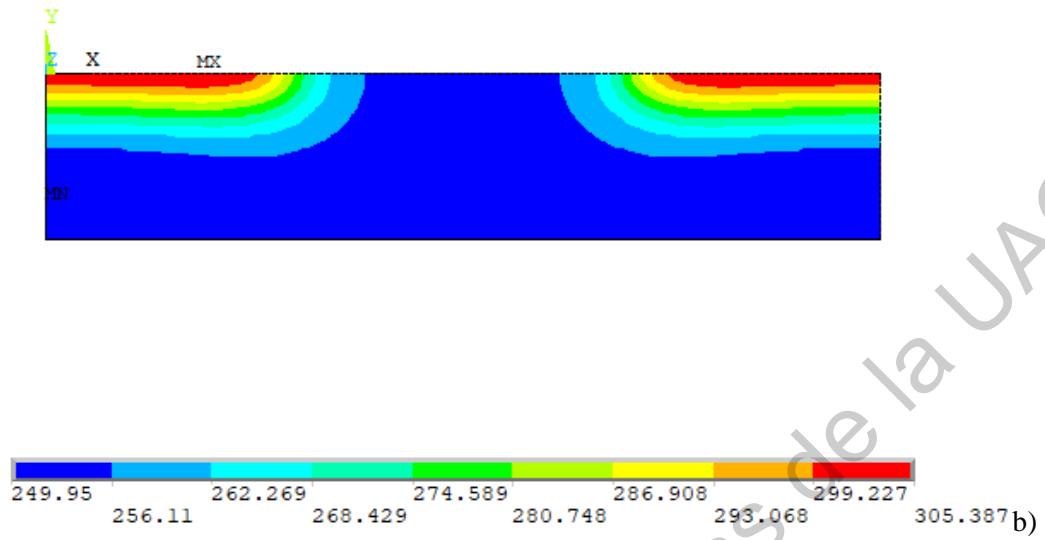


Figura VI.18 Succiones en el dominio al paso del tiempo para el suelo con losa en la superficie, a) 30 días, b) 1440 días.

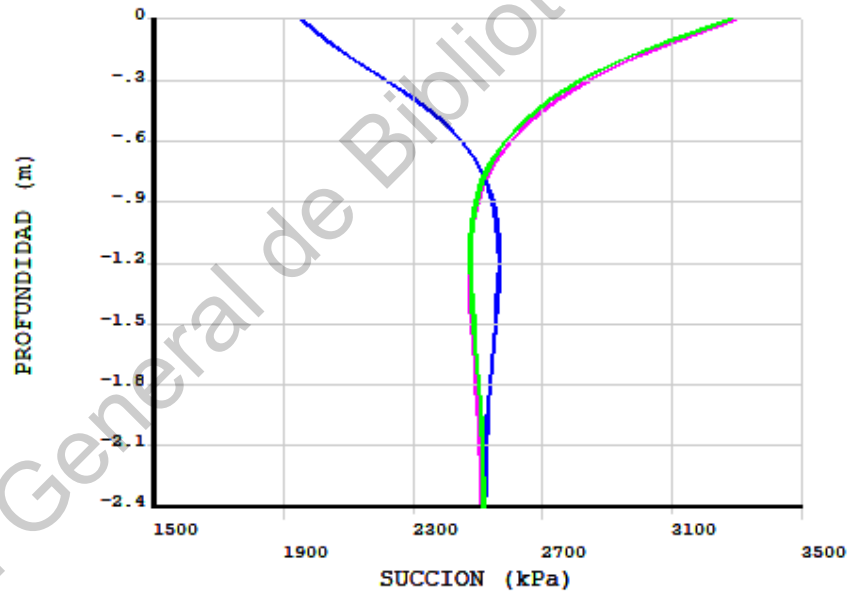


Figura VI.19 Perfiles de succión para $x=1.8$ m en los meses 34 (lila), 40 (azul) y 46 (verde).

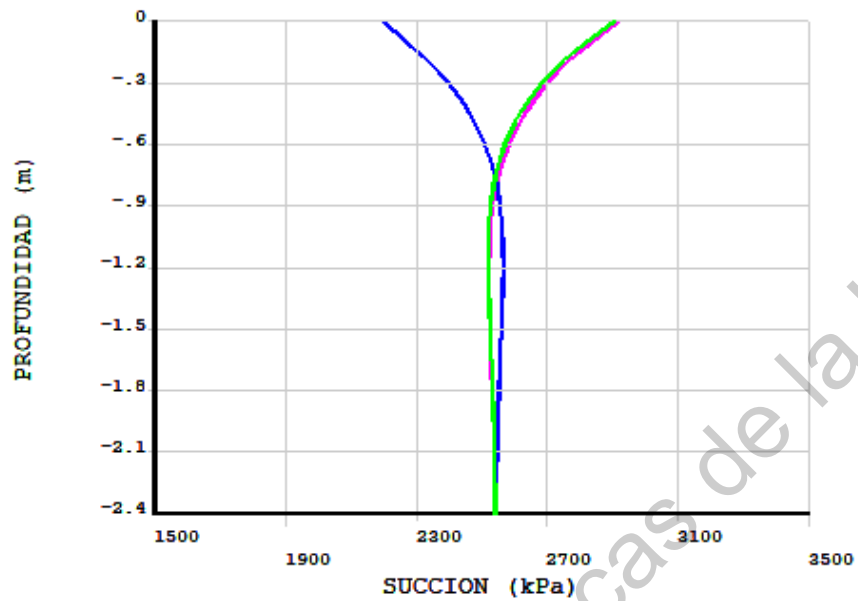


Figura VI.20 Perfils de succió per a $x=3.6$ m en els mesos 34 (lila), 40 (azul) i 46 (verde).

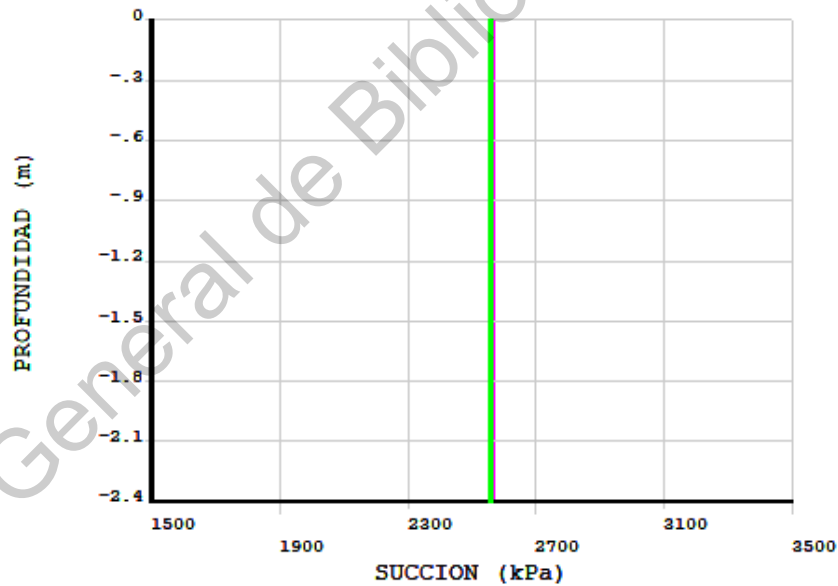
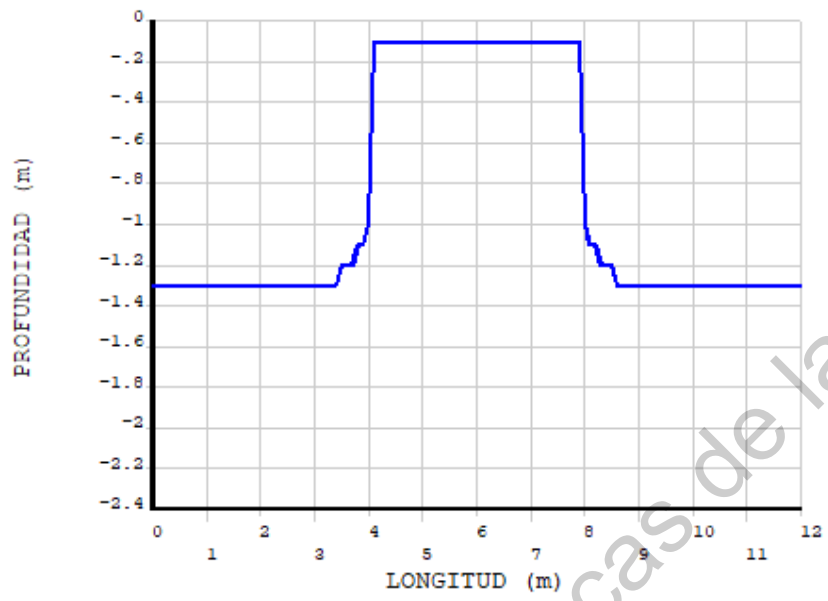


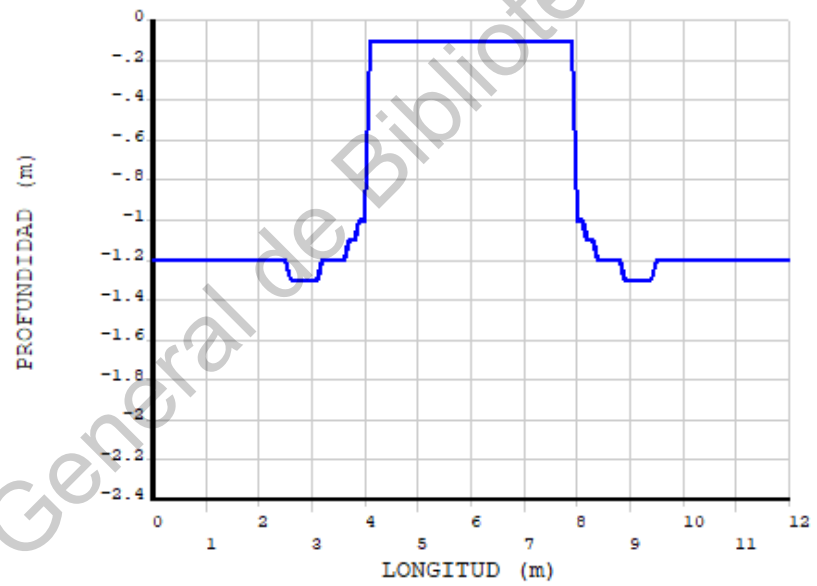
Figura VI.21 Perfils de succió per a $x=6.0$ m en els mesos 34 (lila), 40 (azul) i 46 (verde).

VI.5.2 Capa activa

A diferència de la Figura VI.10, en la Figura VI.22 la capa activa no se presenta com una línia horitzontal, sino que debajo de la capa impermeable ascende hasta casi llegar a la superficie.



a)



b)

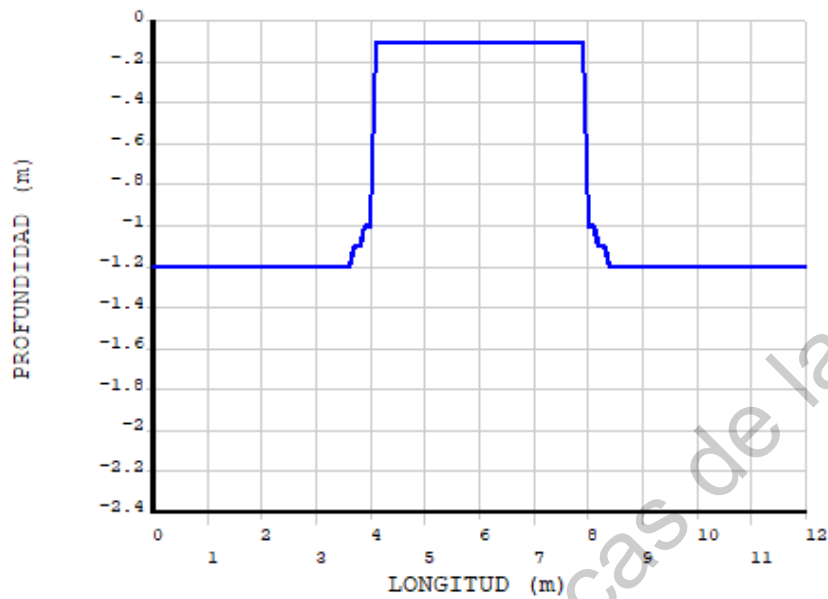
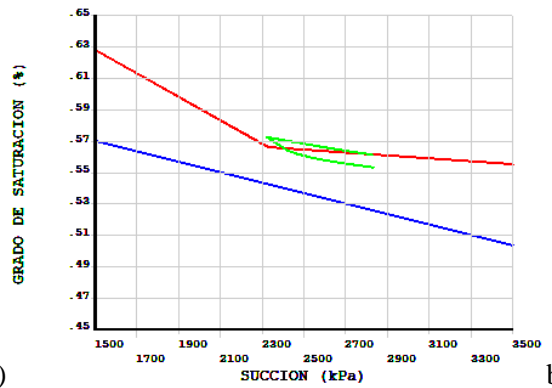
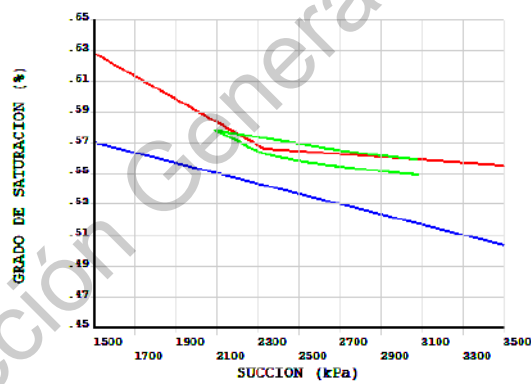


Figura VI.22 Capa activa considerando una variación menor a 2 kPa en los meses a) 34, b) 40 y c) 46.

VI.5.3 Curvas de histéresis hidráulica

Nuevamente los ciclos en los que se aplicará la histéresis hidráulica son definidos y ahora sí se observa variación en las curvas para una misma profundidad en distintas coordenadas horizontales.



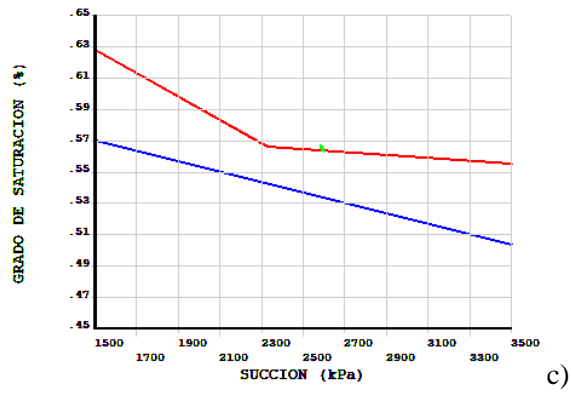


Figura VI.23 Ciclos de histéresis hidráulica en nodos con coordenadas: a) (1.8,0.0), b) (3.6,0.0), c) (6.0,0.0)

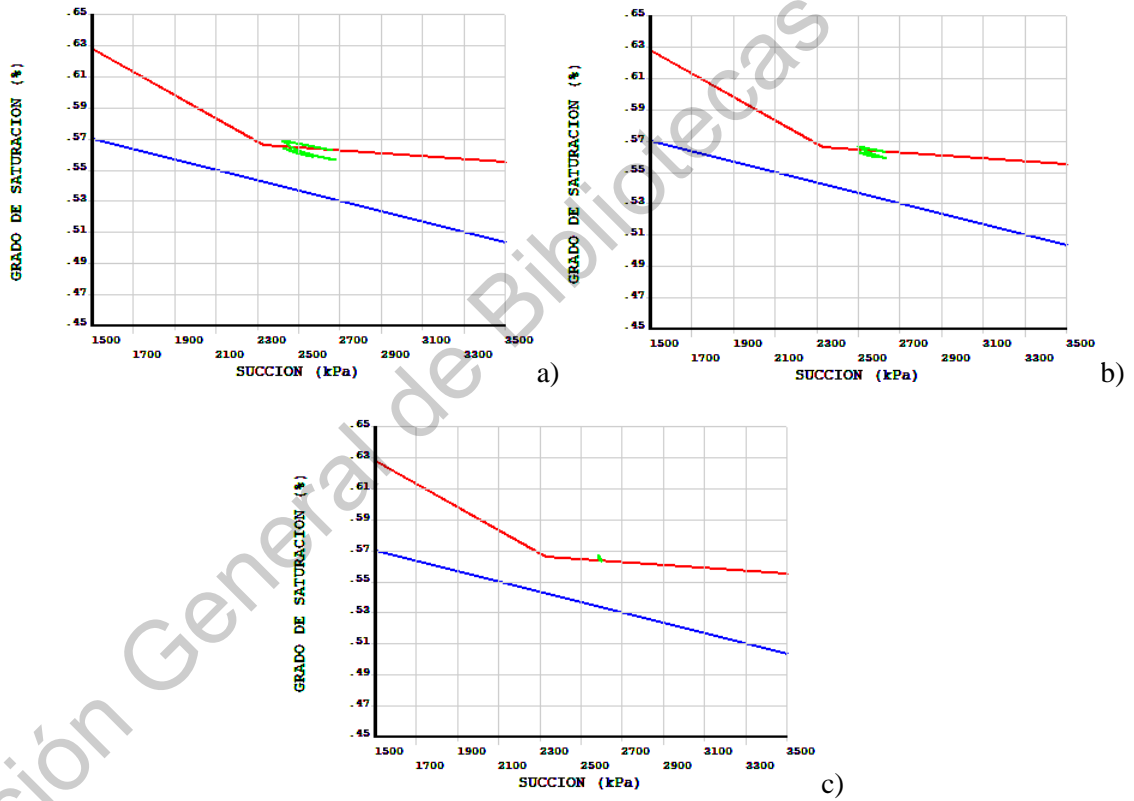


Figura VI.24 Ciclos de histéresis hidráulica en nodos con coordenadas: a) (1.8,-0.5), b) (3.6,-0.5), c) (6.0,-0.5).

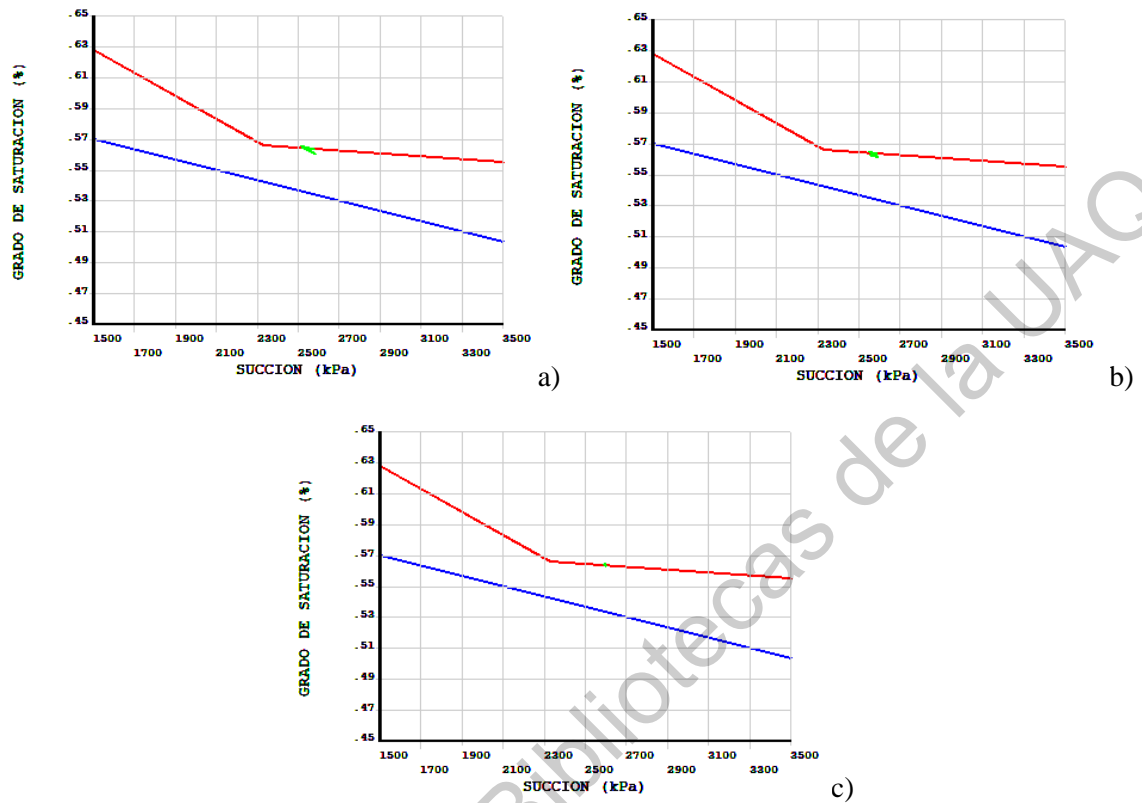


Figura VI.25 Ciclos de histéresis hidráulica en nodos con coordenadas: a) (1.8,-1.0), b) (3.6,-1.0), c) (6.0,-1.0)

VI.5.4 Esfuerzos por succión

Como se pudo apreciar en las gráficas de los cambios de succión derivadas de análisis análogo térmico transitorio, existen variaciones a lo largo del eje horizontal. En la Figura VI.26 los esfuerzos tienen un comportamiento similar al de los mostrados en la Figura VI.14.

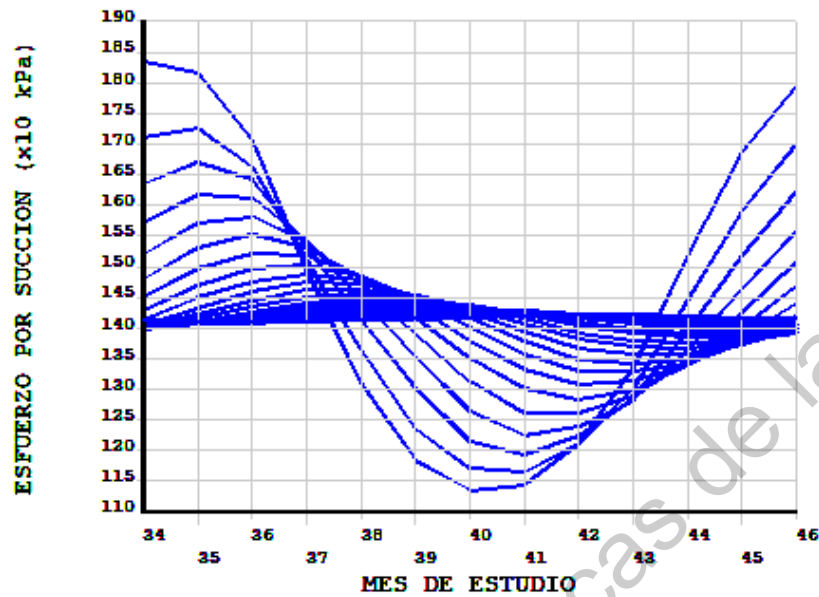


Figura VI.26 Curvas del esfuerzo por succión a distintas profundidades con separación de 0.10 m en $x=1.8$ m.

Pero estos esfuerzos no se comportan igual a medida que evaluamos otros puntos a lo largo del eje horizontal. En la Figura VI.27, donde se muestran las curvas de esfuerzos desde la superficie hasta el fondo del dominio en uno de los bordes de la losa de cimentación, hay una disminución en los esfuerzos así como en su variación; ese comportamiento se hace más evidente cuanto más cerca se esté del centro de la losa, tal como se puede ver en la Figura VI.28, donde justo al centro la variación de la succión con la profundidad al paso del tiempo se vuelve prácticamente nula.

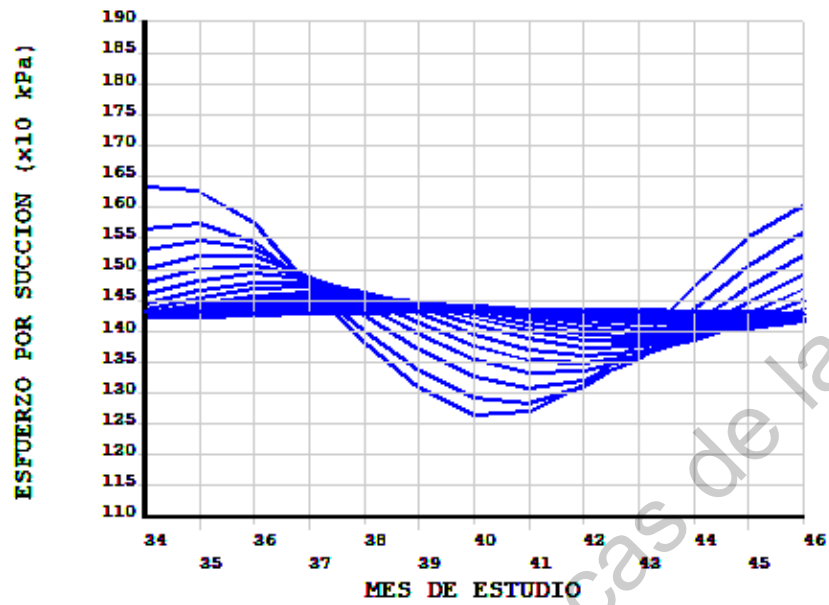


Figura VI.27 Curvas del esfuerzo por succión a distintas profundidades con separación de 0.10 m en $x=3.6$ m.

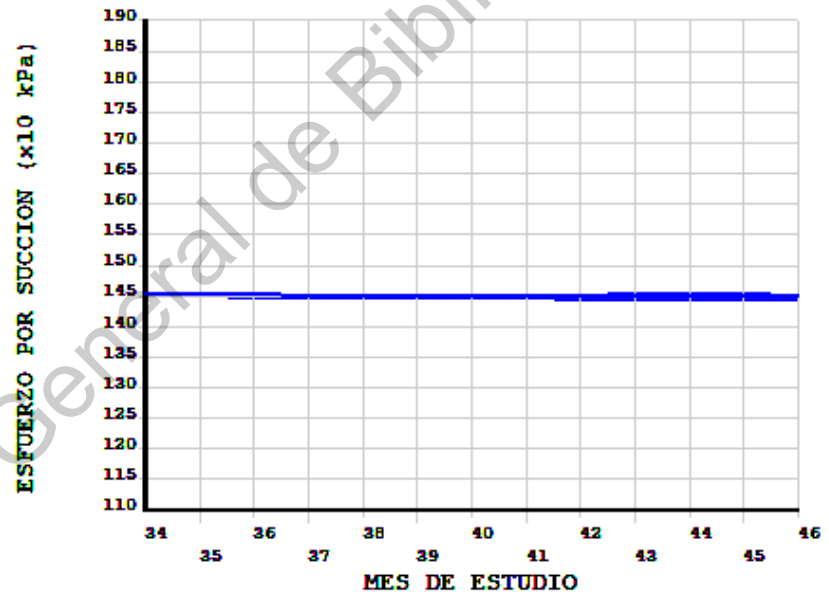


Figura VI.28 Curvas del esfuerzo por succión a distintas profundidades con separación de 0.10 m en $x=6.0$ m.

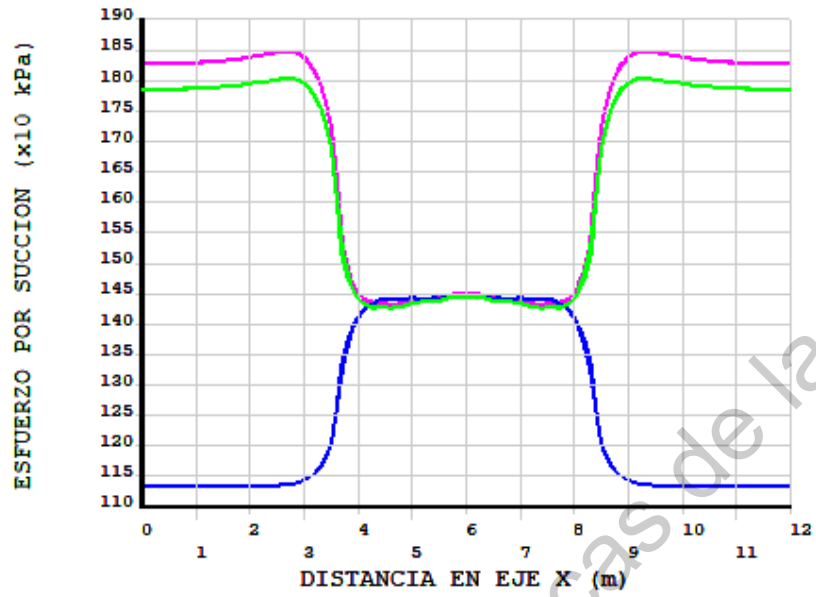


Figura VI.29 Esfuerzos por succión a 0.0 m de profundidad para los meses 34 (lila), 40 (azul) y 46 (verde).

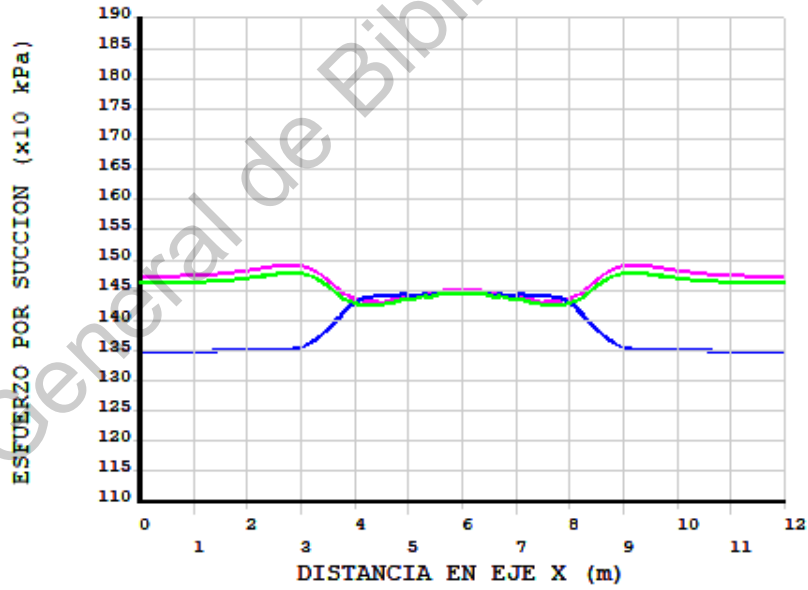


Figura VI.30 Esfuerzos por succión a 0.5 m de profundidad para los meses 34 (lila), 40 (azul) y 46 (verde).

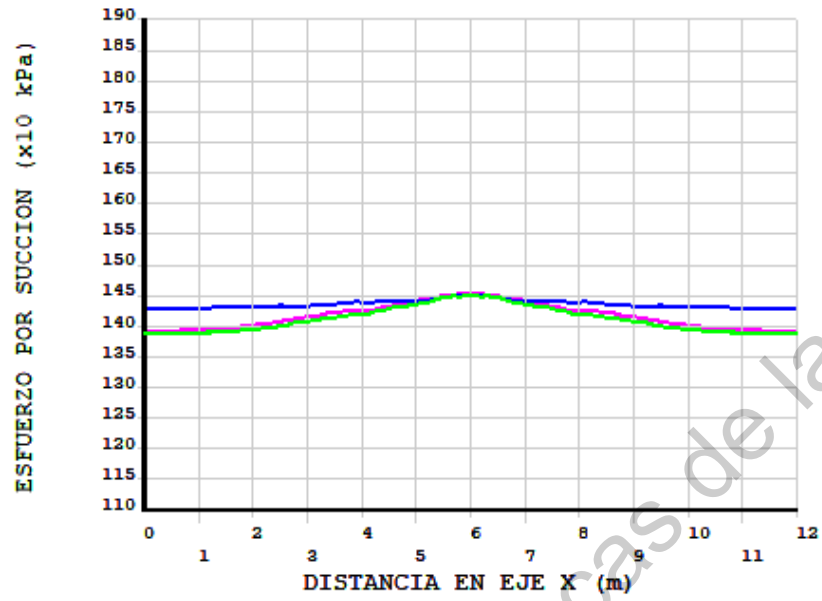


Figura VI.31 Esfuerzos por succión a 1.0 m de profundidad para los meses 34 (lila), 40 (azul) y 46 (verde).

VII. Conclusiones

La investigación resultó en la obtención de un modelo de flujo que permite el cálculo de la succión nodal en un dominio bidimensional de suelo no saturado, así como los distintos parámetros χ y los esfuerzos por succión.

Este modelo es aplicable tanto a las condiciones de Jurica, Querétaro, como a cualquier otro sitio de interés si se disponen de los datos requeridos. Los parámetros de entrada necesarios son:

- La Curva de Retención Agua-Suelo (CRAS) en el dominio succión-grado de saturación, indicando la cantidad de puntos experimentales en cada trayectoria.
- La permeabilidad saturada, que permite ajustar las curvas de conductividad hidráulica de acuerdo al algoritmo de Fredlund (2012).
- El peso volumétrico seco, usado en el cálculo de las curvas de difusividad.
- La relación de vacíos, para convertir el grado de saturación a contenido volumétrico de agua en la CRAS para obtener tanto las curvas de conductividad hidráulica como de difusividad.
- El valor de la succión de equilibrio del sitio de estudio para establecer las condiciones iniciales.
- Precipitación, temperatura y horas de sol promedio a lo largo de un año para establecer un modelo de precipitación-evapotranspiración.
- Las dimensiones del dominio y el tiempo de estudio.

El parámetro de esfuerzos efectivos de la ecuación de Bishop (parámetro χ) fue considerado igual al grado de saturación, este no puede tener un valor constante o único para todo el dominio, por ello fueron empleados los ciclos de histéresis hidráulica para obtenerlos.

Las curvas obtenidas mediante los ciclos de histéresis hidráulica tienen sus limitantes y pueden ser mejoradas. Las principales deben actuar como fronteras para las secundarias, sin embargo, este no fue el caso; se pudo observar en repetidas ocasiones que algunas curvas salían del área delimitada por la CRAS, esto sucede porque el algoritmo de Zhou et al. (2012)

evita que la curva secundaria salga de la curva principal en la trayectoria que se esté evaluando, pero nada evita que pase los límites de la otra curva principal.

Algunas opciones para mejorar las curvas de histéresis en futuras investigaciones podrían ser: trabajar en nuevas ecuaciones para que las curvas secundarias definan sus trayectorias considerando ambas curvas principales y no abandonen el área delimitada, o realizar un ajuste con base en los puntos experimentales para definir la CRAS.

Respecto a la adopción del grado de saturación como el parámetro χ , en trabajos posteriores puede optarse por una opción distinta o más refinada que haga otras consideraciones en la determinación de dicho parámetro, sin embargo, lo obtenido en la matriz CHI será de vital importancia, ya que gran cantidad de propuestas consideran al parámetro como una función del grado de saturación, el cual pudo hallarse satisfactoriamente en este trabajo.

Al obtener los valores de la succión en los nodos del dominio fue posible establecer tanto los perfiles de succión como la capa activa. Los perfiles en el caso del suelo natural (sin membrana impermeable en la superficie) no muestran variaciones para un mismo mes de estudio, independientemente de la ubicación en el eje horizontal que se esté evaluando; mientras que los perfiles en el caso del suelo con membrana impermeable son variables para un mismo mes de estudio.

La capa activa está representada por una línea horizontal en el caso del suelo natural; mientras que, en el caso del suelo con membrana impermeable, está representada por una curva que asciende hasta llegar casi a la superficie en la zona media del dominio.

Los esfuerzos por succión al paso del tiempo en una misma coordenada en el eje horizontal van reduciéndose a medida que la profundidad aumenta; otro fenómeno que pudo observarse es que tanto los valores máximos como mínimos no se presentan de manera simultánea, sino desfasada.

Al evaluar los esfuerzos por succión a una misma profundidad a lo largo del eje horizontal se pudo ver que son constantes para el caso del suelo natural al evaluar un mismo mes, las variaciones se observan al comparar meses distintos. Para el caso del suelo con la membrana, los esfuerzos en un mismo mes son distintos, pueden ser mayores o menores que los

desarrollados debajo de la membrana dependiendo de si está siendo evaluada la época de lluvia o de sequía; es importante mencionar que, independiente del mes de estudio, los esfuerzos bajo la membrana permanecen casi constantes.

Dirección General de Bibliotecas de la UAQ

VIII. Bibliografía

Alawadhi, E. M. (2010) *Finite Element Simulations Using ANSYS, Finite Element Simulations Using ANSYS*. CRC Press. doi: 10.1201/b18949.

ASTM D5298-16 (2016) *Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper*. West Conshohocken, PA. Disponible en: www.astm.org.

Briaud, J.-L. (2013) “Stresses, Effective Stress, Water Stress, Air Stress, and Strains”, en *Geotechnical Engineering: Unsaturated and Saturated Soils*, pp. 245–279. doi: 10.1002/9781118686195.ch10.

Budhu, M. (2011) *Soil mechanics and foundations*. 3rd ed. United States of America: Sons, John Wiley &, Inc.

Dey, P., Sundriyal, P. y Sahoo, S. K. (2017) “Science of Lagging Behind- Hysteresis in Soil Moisture Characteristic Curve - A Review”, *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 6(10), pp. 151–156. doi: 10.20546/ijcmas.2017.610.019.

Flores, M. y Zepeda, J. A. (2004) “Introducción a la mecánica de suelos no saturados”, en *Mecánica de suelos no saturados*. Querétaro, pp. 1–16.

Fredlund, D. G. (2002) “Teaching unsaturated soil mechanics as part of the undergraduate civil engineering curriculum”, *Pan american Conference on Geotechnical Engineering Education*, pp. 26–27.

Fredlund, D. G., Rahardjo, H. y Fredlund, M. D. (2012) *Unsaturated soil mechanics in engineering practice*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.

Galaviz, R. (2016) *Modelo acoplado (termo-mecánico) para suelos no saturados bajo el concepto de esfuerzos efectivos*. Universidad Autónoma de Querétaro.

Haan, C. T., Barfield, B. J. y Hayes, J. C. (1994) *Design hydrology and sedimentology for small catchments, Design hydrology and sedimentology for small catchments*. doi: 10.1016/s0022-1694(96)90037-2.

Han, Z., Vanapalli, S. K. y Zou, W. L. (2019) “Simple Approaches for Modeling Hysteretic Soil Water Retention Behavior”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 145(10), pp. 1–12. doi: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002148.

Incropera, F. P. y DeWitt, D. P. (1999) *Fundamentos de transferencia de calor*. Cuarta edi, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Cuarta edi. Pearson Prentice Hall.

Juárez, E. y Rico, A. (2012) *Mecánica de suelos I: Fundamentos de la mecánica de suelos*. México: Limusa.

Khalili, N. y Khabbaz, M. H. (1998) “A unique relationship for χ for the determination of the shear strength of unsaturated soils”, *Geotechnique*, 48(5), pp. 681–687. doi: 10.1680/geot.1998.48.5.681.

Li, J. (2006) “Two dimensional simulation of a stiffened slab on expansive soil subject to a leaking underground water pipe”, *Geotechnical Special Publication*, (147), pp. 2098–2109. doi: 10.1061/40802(189)177.

López, T. (1995) *Resistencia al esfuerzo cortante en arcillas expansivas de Jurica, Querétaro*. Universidad Autónoma de Querétaro.

Lu, N. y Likos, W. (2004) *Unsaturated soil mechanics*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.

Nelson, J. D. (2015) “Soil Suction”, en *Foundation Engineering for Expansive Soils*. John Wiley & Sons, Inc., pp. 74–118.

Nelson, J. D., Overton, D. D. y Durkee, D. B. (2012) “Deep of wetting and the active zona”, *ASCE*, pp. 95–109.

Novák, V. y Hlaváčiková, H. (2019) “Soil-Water Retention Curve”, en *Applied Soil Hydrology*, p. 354 p. doi: 10.1007/978-3-030-01806-1.

Öberg, A. L. y Sälfors, G. (1995) “A rational approach to the determination of the shear strength parameters of unsaturated soils”, *First International Conference on Unsaturated Soils*, pp. 151–156.

Rojas, E. (2013) *Towards a unified soil mechanics theory*. México: Bentham e Books. doi:

10.1016/B978-0-7020-2797-0.00001-1.

Shao, L., Guo, X., Wen, T. y Zhao, B. (2019) “Effective Stress and Effective Stress Equation”, en *Stochastic Geometry*. Springer International Publishing, pp. 175–192. doi: 10.1007/978-3-030-14987-1_22.

Vanapalli, S. K., Fredlund, D. G., Pufahl, D. E. y Clifton, A. W. (1996) “Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction”, *Canadian Geotechnical Journal*, 33(3), pp. 379–392. doi: 10.1139/t96-060.

Viaene, P., Vereecken, H., Diels, J. y Feyen, J. (1994) “A statistical analysis of six hysteresis models for the moisture retention characteristic”, *Soil Science*, 157(6), pp. 345–355. doi: 10.1097/00010694-199406000-00003.

Zepeda, J. A., Hurtado, D., Pérez, A., Álvarez, A. y González, E. (2004) “Permeabilidad y flujo de agua en suelos”, en *Mecánica de suelos no saturados*. Querétaro, pp. 85–122.

Zepeda, J. A. y Pérez, A. (2004) “Succión y estado del agua en el suelo”, en *Mecánica de suelos no saturados*. Querétaro, pp. 45–82.

Zhou, A. N., Sheng, D., Sloan, S. W. y Gens, A. (2012) “Interpretation of unsaturated soil behaviour in the stress - Saturation space, I: Volume change and water retention behaviour”, *Computers and Geotechnics*, 43, pp. 178–187. doi: 10.1016/j.compgeo.2012.04.010.

IX. Anexos

IX.1 Fundamentos de programación en lenguaje APDL

Con el fin de facilitar la interpretación del código escrito se aborda la forma de dar instrucciones tales como: el establecimiento de variables, creación de subrutinas, ciclos, condicionales y elaboración de gráficas en lenguaje *ANSYS Parametric Design Language* (APDL).

IX.1.1 Estructura del programa

Un programa es una serie de instrucciones ordenadas que permiten a un ordenador recibir información, procesarla de acuerdo a lo indicado en las instrucciones y dar una respuesta.

Al trabajar en el programa ANSYS, versión de estudiante 19.2, en el entorno del sistema operativo Windows es recomendable que el código del programa sea almacenado en extensión TXT en la carpeta de usuario en la unidad C, C:\Users\Usuario.

IX.1.2 Parámetros o variables

Dentro de ANSYS 19.2 lo que normalmente llamaríamos variable recibe el nombre de parámetro y así nombraremos a esta entidad de ahora en adelante. Existen distintos tipos de parámetros, están los escalares y los vectores o matrices.

IX.1.2.1 Parámetro escalar

Los parámetros escalares tienen asociado un único valor y se pueden definir utilizando el comando *SET o simplemente escribiendo el nombre de la variable e indicar su valor después del signo igual (=).

La instrucción para crear un parámetro escalar de nombre A con valor de 5 podría ser cualquier de las siguientes:

```
*SET,A,5
```

```
A=5
```

Una vez establecido el valor del parámetro, este se conservará así hasta que alguna instrucción lo afecte. El nuevo valor sobrescribe al anterior.

IX.1.2.2 Parámetro ARRAY

Los parámetros ARRAY almacenan múltiples valores y pueden tener varias dimensiones, centrándonos únicamente en los parámetros 1-D y 2-D se tienen vectores y matrices con renglones y columnas respectivamente.

El comando para definir un parámetro ARRAY es *DIM. Tras usar el comando, se debe indicar el nombre del parámetro, declarar que es de tipo ARRAY (esto puede omitirse) y establecer la cantidad de renglones y columnas con que contará.

La instrucción para crear un parámetro ARRAY llamado MATRIZ de 5 renglones por 8 columnas es la siguiente:

```
*DIM,MATRIZ,ARRAY,5,8
```

Un elemento del parámetro ARRAY se definen indicando su nombre, seguido del número de renglón y columna del elemento. Por ejemplo, para establecer el valor de 3 en el elemento del tercer renglón y segunda columna en el parámetro MATRIZ se escribiría lo siguiente:

```
MATRIZ(3,2)=3
```

Para vectores y matrices de gran tamaño resulta conveniente definir sus elementos a través de ciclos o mediante cálculos generados usando parámetros ARRAY previamente generados.

IX.1.2.3 Parámetro TABLE

También existe un parámetro matricial especial, cuyo tipo es TABLE. Este (además de los renglones y columnas que le son asignados cuando se declaran sus dimensiones) cuenta con un renglón y columna adicional, el renglón y columna cero. A través de dichos renglones y columnas, es posible obtener valores intermedios entre los declarados de manera explícita mediante interpolación lineal.

Los parámetros TABLE se crean de manera similar a los parámetros ARRAY, la única diferencia es que hay que declarar que el parámetro creado es de tipo TABLE en lugar de ARRAY (este paso no puede omitirse).

La instrucción para crear un parámetro TABLE llamado TAB, con 5 renglones y una columna es la siguiente:

```
*DIM,TAB,TABLE,5,1
```

En este trabajo únicamente son usados parámetros TABLE de una columna, ya que se emplean para establecer pares ordenados de una variable relacionada con otra, como puede ser la succión con el grado de saturación para formar la CRAS.

Los elementos se definen de igual forma que para los parámetros ARRAY, indicando el nombre, el renglón y la columna. Para los valores en la columna cero se debe indicar ese valor. Por ejemplo, si se quiere dar el valor de 1 y 2 a los elementos de renglón 1 de las columnas 0 y 1 respectivamente, la instrucción sería:

```
TAB(1,0)=1
```

```
TAB(1,1)=2
```

La interpolación con estos parámetros permite indicar un valor de la columna cero que no esté declarado (pero que se encuentre dentro del rango de valores de la columna) y obtener su respectivo valor de la columna 1.

Considérese la Figura IX.1, en ella están definidos todos los elementos de TAB, yendo del 1 al 5 en la columna 0 y doblándose los valores en la columna 1. Por ejemplo, la instrucción para crear un parámetro escalar llamado A cuyo valor sea el de la columna 1 para 2.35 en la columna 0 sería:

```
A=TAB(2.35,1)
```

Llegando a un resultado de 4.70 para el parámetro A.

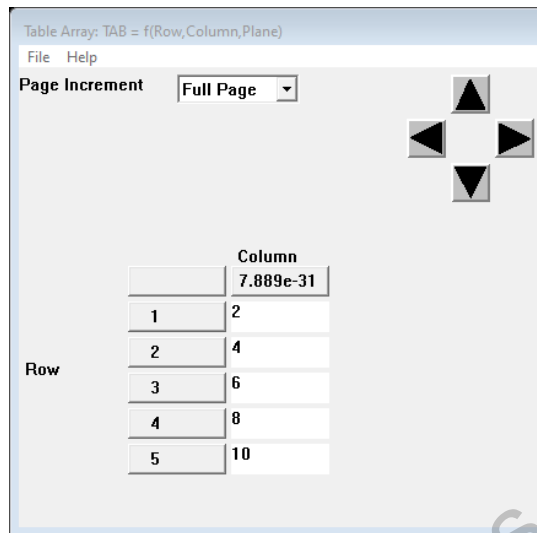


Figura IX.1 Elementos del parámetro TABLE de nombre TAB.

Dicha interpolación solo puede lograrse si los parámetros de la columna cero tienen valores crecientes, en caso de que se desee interpolar y la tabla no cuente con dicha característica sería conveniente crear otra tabla con base en la primera, pero con el orden invertido.

IX.1.3 Ciclos

Frecuentemente habrá necesidad de ejecutar una instrucción en repetidas ocasiones, ya sea para realizar una sumatoria, definir los elementos de un parámetro ARRAY o TABLE, entre muchas posibles aplicaciones.

Los comandos que se usan son *DO y *ENDDO y se utiliza la siguiente estructura:

*DO,Nombre del índice,Valor inicial,Valor final,Incremento

Instrucciones

*ENDDO

Por ejemplo, el ciclo para definir los valores del parámetro TAB en la Figura IX.1 sería el siguiente:

*DO,I,1,5,1

TAB(I,0)=I

TAB(I,1)=2*I

*ENDDO

El índice usado en el ejemplo recibió el nombre de I, dicho índice es un parámetro escalar que va cambiando de valor con cada ciclo y no necesariamente tiene que estar involucrado en las operaciones que se efectúen mediante las instrucciones.

IX.1.4 Condicionales

Cuando la respuesta del programa depende de alguna condición se puede recurrir al uso de condicionales con el comando *IF y se termina con *ENDIF. La estructura del condicional es la siguiente:

*IF,Parámetro a evaluar,Etiqueta de operación,Parámetro de comparación,Acción

*ENDIF

El parámetro a evaluar puede ser un parámetro escalar creado previamente o un escalar, las etiquetas de operación se encuentran resumidas en la Tabla IX-1, el parámetro de comparación tiene las mismas características que el parámetro a evaluar y las acciones más comunes están en la Tabla IX-2.

Tabla IX-1 Etiquetas de operación disponibles para el uso del comando *IF.

Etiqueta de operación	Comparación
EQ	Igual
NE	No igual
LT	Menor que
GT	Mayor que
LE	Menor que o igual
GE	Mayor que o igual
ABLT	Menor que para el valor absoluto de las cantidades o parámetros que se estén evaluando

ABGT	Mayor que para el valor absoluto de las cantidades o parámetros que se estén evaluando
------	--

Tabla IX-2 Acciones posibles en un condicional *IF.

Comandos de acción	Acción a ejecutar si la condición se cumple
STOP	Terminar la ejecución del programa
EXIT	Al estar dentro de un ciclo se sale de este
THEN	Es el comando previo a las instrucciones

Al hacer uso de la acción THEN se requiere agregar el comando *ELSE en el condicional, este permite declarar las instrucciones a seguir en caso de que la condición no se cumpla. La estructura es la siguiente:

*IF,Parámetro a evaluar,Etiqueta de operación,Parámetro de comparación,THEN

Instrucciones

*ELSE

Instrucciones

*ENDIF

Como ejemplo se presenta el código para evaluar los parámetros escalares A y B con el objetivo de definir el valor del parámetro escalar C. A vale 2 y B vale 5, si A es mayor que B, el valor de C será 0 y en caso contrario será 1. Al ejecutarse el código en ANSYS se debe llegar a que C es igual a 1.

A=2

B=5

*IF,A,GT,B,THEN

C=0

*ELSE

C=1

*ENDIF

IX.1.5 Creación de macros

Cuando se busca la manera de solucionar un problema puede ser útil dividirlo en tareas más pequeñas, así será más sencillo localizar un error. Esto se consigue dentro de ANSYS con la creación de macros.

Dentro del código puede haber tantas macros como el problema lo requiera, estas funcionan como pequeños programas al interior del programa principal. Para crearlas se utilizan los comandos *CREATE y *END, cuando necesitan ejecutarse se hace a través del comando *USE. Dicha instrucción puede estar escrita en el código o darse desde la interfaz de usuario.

La estructura del código para una subrutina sería la siguiente:

*CREATE,Nombre de la macro

Instrucciones

*END

IX.1.6 Elaboración de gráficas

IX.1.6.1 Graficar parámetros TABLE

Como se ha mencionado, los parámetros TABLE usados en el código de este trabajo están formados por una sola columna (más la columna cero) y una cantidad variable de renglones. Generalmente se usan los valores de la columna cero para que sean las abscisas y los de la columna uno las ordenadas.

Para graficar un parámetro TABLE se usa el comando *VPLOT seguido de los valores para el eje horizontal y luego los del eje vertical. Por ejemplo, si se quisieran graficar TAB (véase sección IX.1.2.3 Parámetro TABLE) la instrucción sería:

*VPLOT,TAB(1,0),TAB(1,1)

Existen diversas opciones para generar la gráfica; entre ellas están: la posibilidad de editar el rango de visualización de ambos ejes, agregar título tanto al gráfico como a los ejes y asignar distintos colores a las curvas.

El comando para dar un título a un gráfico es /TITLE, seguido de una coma (,) y el nombre del gráfico. Para editar el rango y nombre de los ejes se usan los comandos descritos en la Tabla IX-3

Tabla IX-3 Comandos para editar los ejes de una gráfica.

Comando	Acción
/XRANGE,Rango inferior,Rango superior	Define el rango del eje x, siendo el rango inferior y superior escalares o parámetros escalares
/YRANGE,Rango inferior,Rango superior	Define el rango del eje y, siendo el rango inferior y superior escalares o parámetros escalares
/AXLAB,Eje,Nombre del eje	Indica el nombre del eje, en el espacio del eje se debe especificar X o Y según sea el eje deseado

También existen varias opciones de gráfico que son útiles para presentar la información deseada de distintas maneras. Se accede a las opciones de gráfica a través del comando /GROPT,Etiqueta; entre las posibles opciones están: presentar alguno o ambos ejes en escala logarítmica, graficar los valores en orden inverso y definir la cantidad de divisiones de la cuadrícula de la gráfica. Más detalles sobre el comando se encuentra en la Tabla IX-4.

Tabla IX-4 Etiquetas más usuales en el comando /GROPT.

Etiqueta	Acción
LOGX	Activa o desactiva la escala logarítmica en el eje x, se hace escribiendo una coma (,) seguida de la palabra ON u OFF
LOGY	Activa o desactiva la escala logarítmica en el eje y, se hace escribiendo una coma (,) seguida de la palabra ON u OFF
REVX	Grafica los valores del eje x en orden inverso, se hace escribiendo una coma (,) seguida de la palabra ON u OFF
REVY	Grafica los valores del eje y en orden inverso, se hace escribiendo una coma (,) seguida de la palabra ON u OFF

DIVX	Sirve para indicar la cantidad de divisiones en el eje x, se hace escribiendo una coma (,) seguida de la cantidad de divisiones deseada
DIVY	Sirve para indicar la cantidad de divisiones en el eje y, se hace escribiendo una coma (,) seguida de la cantidad de divisiones deseada

Para establecer el color de las curvas se utiliza el comando /COLOR seguido de la etiqueta del objeto deseado. Las curvas tienen la etiqueta CURVE y las claves de los colores se encuentran en la Tabla IX-5.

Tabla IX-5 Claves de los colores disponibles al usar el comando /COLOR.

Clave de color	Color
0	Negro
1	Magenta-Rojo
2	Magenta
3	Azul-Magenta
4	Azul
5	Cian-Azul
6	Cian
7	Verde-Cian
8	Verde
9	Amarillo-Verde
10	Amarillo
11	Naranja
12	Rojo
13	Gris oscuro
14	Gris claro
15	Blanco

Retomando el ejemplo del parámetro TAB, para graficar la curva en color azul (4), con título “GRAFICA DE TAB”, eje horizontal y vertical llamados “Eje x” y “Eje y” respectivamente, seis divisiones por eje, con rango en x de 0 a 6 y en y de 0 a 12, el código sería:

```
/TITLE,GRAFICA DE TAB
```

```
/COLOR,CURVE,4
```

```
/AXLAB,X,Eje x
```

```
/AXLAB,Y,Eje y
```

```
/GROPT,DIVX,6
```

```
/GROPT,DIVY,6
```

```
/XRANGE,0,6
```

```
/YRANGE,0,12
```

```
*VPLOT,TAB(1,0),TAB(1,1)
```

La gráfica resultante es la mostrada en la Figura IX.2.

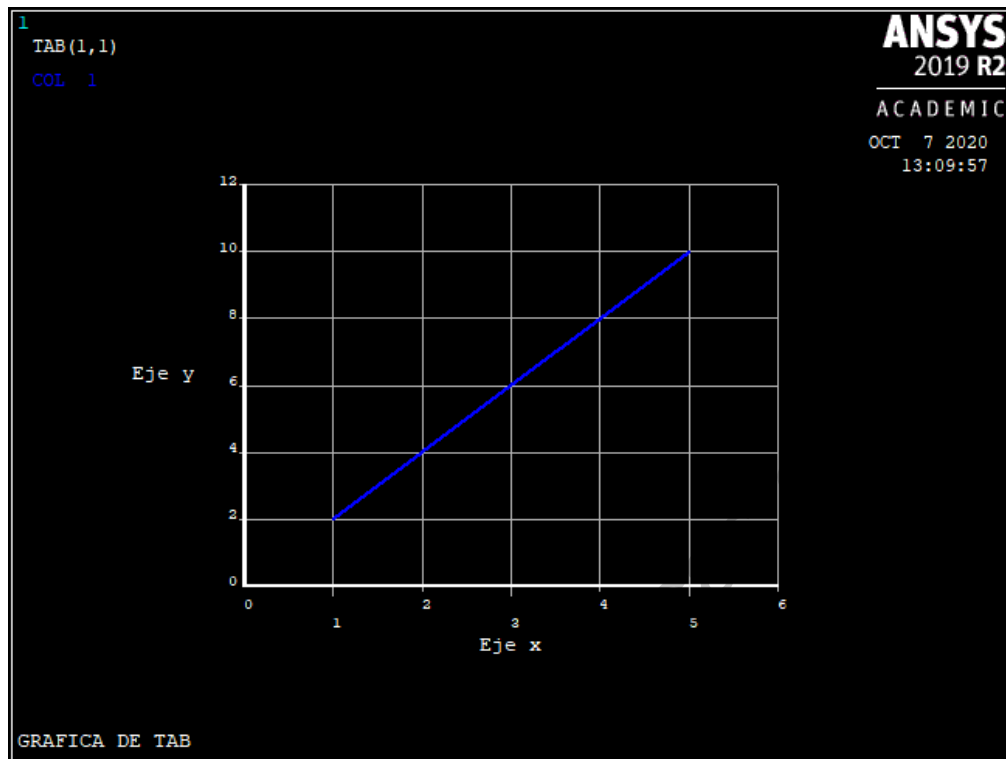


Figura IX.2 Ejemplo de gráfica en ANSYS.

IX.1.6.2 Graficar dominio de elementos finitos

Una vez que se haya definido el dominio y mallado de elementos finitos es posible graficar nuevamente utilizando el comando EPLOTT.

Para mostrar la numeración de los elementos o de sus nodos se tiene que acceder a los Controles de Numeración (*Plot Numbering Controls*), cuya ventana se muestra en la Figura IX.3. Esta operación se realiza a través del Menú de Utilidades (*Utility Menu*) en la ruta *PlotCtrls* → *Numbering* ...

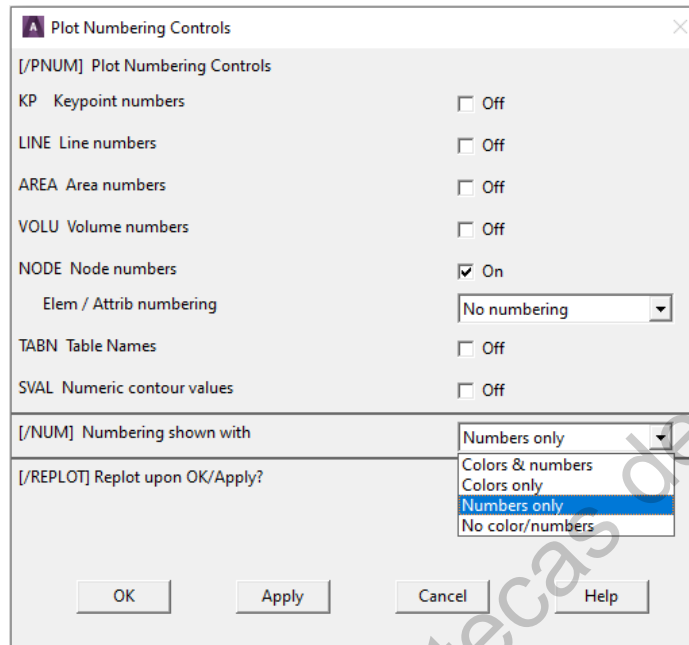


Figura IX.3 Ventana de Controles de Numeración en ANSYS con las instrucciones seleccionadas para graficar la numeración de los nodos.

IX.2 Código en APDL

```
/COM, *****
*****
```

```
/COM,PROGRAMA DE ANALISIS DE SUELOS
NO SATURADOS
```

```
/COM, *****
*****
```

```
*CREATE,GRAFICA_SUCSAT
```

```
    multipro,'start',8
```

```
*CSET,1,3,PERMS,'PERMEAB. SATURADA
MEDIDA (M/S)',1.37E-07
```

```
/COM,La permeabilidad saturada fue tomada de la
tesis de doctorado de Galaviz
```

```
/COM,PERMSC Se deja como comentario ya que
será definida en la macro CURVA_PERMEAB
```

```
*CSET,4,6,DENSS,'DENS DE LA MUESTRA
SECA(KG/M3)',1359
```

```
*CSET,7,9,RELVAC,'RELACION DE VACIOS',
0.5
```

```
*CSET,10,12,THETSEC,'CONT VOL AGUA
EN LA SATUR (SEC)',0.5
```

```
*CSET,13,15,THETHUM,'CONT VOL AGUA
EN LA SATUR (HUM)',0.49
```

```
*CSET,16,18,TPUN,'PUNTOS EXP CURVA:
SECADO (ENTER)',12
```

```
*CSET,19,21,TPUNH,'PUNTOS EXP CURVA:
HUMED (ENTER)',12
```

```
*CSET,22,24,DIVH,'No.INTERVALO
P/EVALUAR PERMEAB K',20
```

```
MULTIPRO,'END'
```

/COM,El parámetro RELVAC es $[e/(1+e)]$ siendo "e" la relación de vacíos

/COM,esto para pasar del grado de saturación a contenido volumétrico de agua

/COM,Datos experimentales de Galaviz (2016)

/COM,Curva principal de secado

multipro,'start',10

*CSET,1,3,SUC1,'SUCCION 1 SEC (kPa)',1
*CSET,4,6,HUM1,'HUMEDAD 1 (%)',1
*CSET,7,9,SUC2,'SUCCION 2 SEC (kPa)',48.12
*CSET,10,12,HUM2,'HUMEDAD 2 (%)',0.934
*cSET,13,15,SUC3,'SUCCION 3 SEC',90.91
*CSET,16,18,HUM3,'HUMEDAD 3',0.913
*CSET,19,21,SUC4,'SUCCION 4 SEC',158
*CSET,22,24,HUM4,'HUMEDAD 4',0.81
*CSET,25,27,SUC5,'SUCCION 5 SEC',277.8
*CSET,28,30,HUM5,'HUMEDAD 5',0.753

MULTIPRO,'END'

multipro,'start',10

*CSET,1,3,SUC6,'SUCCION 6 SEC',954
*CSET,4,6,HUM6,'HUMEDAD 6',0.669
*CSET,7,9,SUC7,'SUCCION 7 SEC (kPa)',2327.4
*CSET,10,12,HUM7,'HUMEDAD 7 (%)',0.566
*cSET,13,15,SUC8,'SUCCION 8 SEC',6415.5
*CSET,16,18,HUM8,'HUMEDAD 8',0.529
*CSET,19,21,SUC9,'SUCCION 9 SEC',29153
*CSET,22,24,HUM9,'HUMEDAD 9',0.397

*CSET,25,27,SUC10,'SUCCION 10 SEC',82658.4

*CSET,28,30,HUM10,'HUMEDAD 10',0.261
MULTIPRO,'END'

MULTIPRO,'start',10

*CSET,1,3,SUC11,'SUCCION 11 SEC',138820.3
*CSET,4,6,HUM11,'HUMEDAD 11',0.146
*CSET,7,9,SUC12,'SUCCION 12 SEC(kPa)',168415.5
*CSET,10,12,HUM12,'HUMEDAD 12(%)',0.018
*cSET,13,15,SUC13,'SUCCION 13 SEC',
*CSET,16,18,HUM13,'HUMEDAD 13',
*CSET,19,21,SUC14,'SUCCION 14 SEC',
*CSET,22,24,HUM14,'HUMEDAD 14',
*CSET,25,27,SUC15,'SUCCION 15 SEC',
*CSET,28,30,HUM15,'HUMEDAD 15',
MULTIPRO,'END'

/COM,Curva principal de humedecimiento

multipro,'start',10

*CSET,1,3,SUCH1,'SUCCION 1 HUMED (kPa)',1
*CSET,4,6,HUMH1,'HUMEDAD 1 (%)',0.98
*CSET,7,9,SUCH2,'SUCCION 2 HUMED (kPa)',21.08
*CSET,10,12,HUMH2,'HUMEDAD 2(%)',0.93
*cSET,13,15,SUCH3,'SUCCION 3 HUMED',37.21
*CSET,16,18,HUMH3,'HUMEDAD 3',0.894

*CSET,19,21,SUCH4,'SUCCION HUMED',75.56	4	*CSET,19,21,SUCH14,'SUCCION 13 HUMED',
*CSET,22,24,HUMH4,'HUMEDAD 4',0.863		*CSET,22,24,HUMH14,'HUMEDAD 13',
*CSET,25,27,SUCH5,'SUCCION HUMED',163.37	5	*CSET,25,27,SUCH15,'SUCCION 14 HUMED',
*CSET,28,30,HUMH5,'HUMEDAD 5',0.763		*CSET,28,30,HUMH15,'HUMEDAD 14',
MULTIPRO,'END'		MULTIPRO,'END'
multipro,'start',10		
*CSET,1,3,SUCH6,'SUCCION 6 HUMED',499.9		/COM,Construcción de la CRAS
*CSET,4,6,HUMH6,'HUMEDAD 6',0.679		
*CSET,7,9,SUCH7,'SUCCION 7 HUMED (kPa)',971.9		*DIM,CCAR, TABLE, TPUN, 1
*CSET,10,12,HUMH7,'HUMEDAD 7 (%)',0.588		*DIM,CCARH, TABLE, TPUNH, 1
*cSET,13,15,SUCH8,'SUCCION HUMED',4395.4	8	*DIM,CCAR1, TABLE, TPUN, 1
*CSET,16,18,HUMH8,'HUMEDAD 8',0.474		*DIM,CCARH1, TABLE, TPUNH, 1
*CSET,19,21,SUCH9,'SUCCION HUMED',8488	9	*DIM,NPER,,divh
*CSET,22,24,HUMH9,'HUMEDAD 9',0.398		*DIM,KSUC, TABLE, DIVH, 1
*CSET,25,27,SUCH10,'SUCCION HUMED',45760.4	10	*DIM,DSUC, TABLE, DIVH, 1
*CSET,28,30,HUMH10,'HUMEDAD 10',0.266		*DIM,RELPS,,DIVH
MULTIPRO,'END'		*DIM,NPERG,,DIVH
MULTIPRO,'start',10		*DIM,PENDI,,DIVH
*CSET,1,3,SUCH11,'SUCCION HUMED',110597	11	*DIM,PERMI,,DIVH
*CSET,4,6,HUMH11,'HUMEDAD 11',0.153		*DIM,DIFUSI,,DIVH
*CSET,7,9,SUCH12,'SUCCION HUMED(kPa)',168415.5	12	*DIM,PUNSAT,,DIVH
*CSET,10,12,HUMH12,'HUMEDAD 12(%)',0.01		*DIM,PUNSUC,,DIVH
*cSET,13,15,SUCH13,'SUCCION 12 HUMED',		*DIM,PUNSATI,,DIVH
*CSET,16,18,HUMH13,'HUMEDAD 12',		*DO,I,1, TPUN, 1
		CCAR(I,0)=SUC%I%

CCAR(I,1)=HUM%I%

*ENDDO

*DO,I,1,TPUNH,1

CCARH(I,0)=SUCH%I%

CCARH(I,1)=HUMH%I%

*ENDDO

*DO,I,1,TPUN,1

CCAR1(I,0)=HUM%TPUN+1-I%

CCAR1(I,1)=SUC%TPUN+1-I%

*ENDDO

*DO,I,1,TPUNH,1

CCARH1(I,0)=HUMH%TPUNH+1-I%

CCARH1(I,1)=SUCH%TPUNH+1-I%

*ENDDO

/YRANGE,0,1

/GROPT,DIVY,10

/GROPT,LOGX,ON

/XRANGE,1,1000000

/COLOR,CURVE,12

/AXLAB,X,SUCCION (kPa)

/AXLAB,Y,GRADO DE SATURACION (%)

/TITLE,CURVA DE RETENCION SEC-HUM
CONFORME A LOS PUNTOS DADOS

*VPLOT,CCAR(1,0),CCAR(1,1)

/NOERASE

/COLOR,CURVE,4

*VPLOT,CCARH(1,0),CCARH(1,1)

*ASK,ENTER,PARA CONTINUAR OPRIMA
ENTER,

ERASE

/ERASE

/GROPT,LOGY,ON

/YRANGE,1,1000000

/GROPT,LOGX,OFF

/XRANGE,0,1

/GROPT,DIVX,10

/COLOR,CURVE,12

/AXLAB,Y,SUCCION (kPa)

/AXLAB,X,GRADO DE SATURACION (%)

/COM,LA CURVA INVERSA (SE INVIERTEN
LOS EJES) ES DEBIDO A QUE MAS DELANTE

/COM,LA VAMOS A REQUERIR Y PARA
FINES DE GRAFICACION, UNA TABLA (NO
MATRIZ)

/COM,INTERPOLA LOS VALORES
INTERMEDIOS ENTRE DOS PUNTOS
CUALESQUIERA, Y ESE ES EL

/COM,MOTIVO POR EL CUAL SE HACE ESTO, YA QUE VAMOS A INTERPOLAR LAS SUCCIONES.

/COM,SOBRE ESTA ULTIMA CURVA PROCEDEREMOS A DIVIDIR LA ESCALA DE SATURACION

/COM,EN 20 INTERVALOS

ERASE

save,cret

*END

/COM,Nota:las tablas CCAR y CCARH contienen los datos de la curva de retencion

/COM,la primera la curva de secado y la otra la de humedecimiento, mientras las

/COM,tablas CCAR1 Y CCARH1 son los de la curva inversa de retencion

/COM,nota: para fines posteriores de evaluar el parametro CHI bastara la curva

/COM,normal, es decir CCAR y CCARH, ya que podemos obtener para un valor dado de

/COM,succion, el valor interpolado de la saturacion, que sera a su vez CHI.

/COM,*****

*CREATE,GRAFICA_SUCTHETA

/COM,Se genera la CRAS en dominio succión-contenido volumétrico de agua

/COM,para usar posteriormente en el cálculo de la conductividad hidráulica

/COM,de acuerdo al algoritmo de Fredlund

ERASE

/COM,Se aplica RELVAC para pasar de grado de saturación a contenido volumétrico de agua

*DO,I,1,TPUN,1

HUM%I%=HUM%I%*RELVAC

*ENDDO

*DO,I,1,TPUNH,1

HUMH%I%=HUMH%I%*RELVAC

*ENDDO

*DO,I,1,TPUN,1

CCAR(I,0)=SUC%I%

CCAR(I,1)=HUM%I%

*ENDDO

*DO,I,1,TPUNH,1

CCARH(I,0)=SUCH%I%

CCARH(I,1)=HUMH%I%

*ENDDO

*DO,I,1,TPUN,1

CCAR1(I,0)=HUM%TPUN+1-I%

CCAR1(I,1)=SUC%TPUN+1-I%

```

*ENDDO
/ERASE

*DO,I,1,TPUNH,1
/GROPT,LOGY,ON
CCARH1(I,0)=HUMH% TPUNH+1-I%
/YRANGE,1,1000000
CCARH1(I,1)=SUCH% TPUNH+1-I%
/GROPT,LOGX,OFF
*ENDDO
/XRANGE,0,0.5
/GROPT,DIVX,10
/COLOR,CURVE,12

/GROPT,LOGY,OFF
/AXLAB,Y,SUCCION (kPa)
/YRANGE,0,0.5
/GROPT,DIVY,20
/AXLAB,X,CONT. VOLUMETRICO DE AGUA
/GROPT,LOGX,ON
/AXLAB,X,CONT. VOLUMETRICO DE AGUA
/XRANGE,1,1000000
(%)
/COLOR,CURVE,12
*END

/AXLAB,X,SUCCION (kPa)
/COM,*****
/AXLAB,Y,CONT. VOLUMETRICO DE AGUA
(%)
*****

/TITLE,CURVA CARACTERISTICA
SUCCION-CONT VOL AGUA
*CREATE,CURVA_PERMEAB

INTERV=ABS((HUM% TPUN%-HUM1)/DIVH)

*VPLLOT,CCAR(1,0),CCAR(1,1)
PUNSAT(1)=(HUM% TPUN%+INTERV)/2

/NOERASE
*DO,I,2,DIVH,1
/COLOR,CURVE,4
PUNSAT(I)=PUNSAT(I-1)+INTERV
*ENDDO

*VPLLOT,CCARH(1,0),CCARH(1,1)

*ASK,ENTER,PARA CONTINUAR OPRIMA
ENTER,
*DO,I,1,DIVH,1
PUNSATI(I)=PUNSAT(DIVH+1-I)
*ENDDO

ERASE

```

/COM,ENSEGUIDA DETERMINAREMOS LAS
SUCCIONES CORRESPONDIENTES A ESTAS
SATURACIONES

```
*DO,I,1,DIVH,1
PUNSUC(I)=CCAR1(PUNSATI(I),0)
*ENDDO
```

/COM,Caso de secado

```
*DO,I,1,DIVH,1
SUM=0
*DO,J,I,DIVH,1
SUM=SUM+(2*J+1-2*I)/(PUNSUC(J))**2
*ENDDO
NPER(I)=SUM
*ENDDO
```

```
*DO,I,1,DIVH,1
RELPS(I)=NPER(I)
*ENDDO
```

```
*DIM,SUCCIONS,,DIVH
*DIM,PERMEABS,,DIVH
```

/COM,El parametro PARCOFS asocia la Tension
superficial del agua, el

/COM,su densidad, y viscosidad.

```
PARCOFS=0.02596*THETSEC**2
```

```
*DO,I,1,DIVH,1
```

/COM,A continuación se escribe la condición para
definir PERMSC

```
*IF,I,EQ,1,THEN
PERMSC=((PARCOFS/DIVH**2)*REL
PS(I))
*ENDIF
```

```
PERMEABS(I)=(PERMS/PERMSC)*((PARCOF
S/DIVH**2)*RELPS(I))
```

```
SUCCIONS(I)=PUNSUC(I)
```

```
*ENDDO
```

```
*DO,I,1,DIVH,1
```

```
KSUC(I,0)=PUNSUC(I)
```

```
KSUC(I,1)=PERMEABS(I)
```

```
*ENDDO
```

```
ERASE
```

```
/GROPT,LOGY,ON
```

```
/YRANGE,1E-017,1E-03
```

```
/GROPT,LOGX,ON
```

```
/XRANGE,1,1000000
```

```
/GROPT,DIVX,10
```

```
/GROPT,DIVY,6
```

```
/COLOR,CURVE,12
```

```
/AXLAB,X,SUCCION (kPa)
```

```
/AXLAB,Y,CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA  
(m/s)
```

```

/TITLE,PERMEABILIDAD NO SATURADA vs
SUCCION. SECAD(RED) HUMED(BLUE)

*VPLLOT,KSUC(1,0),KSUC(1,1)

/NOERASE

*ASK,ENTER,PARA CONTINUAR OPRIMA
ENTER,

SAVE,PERMEA

*DIM,NPERH,,divh
*DIM,RELPSH,,DIVH
*DIM,KSUCH, TABLE, DIVH, 1
*DIM,PUNSATH,,DIVH
*DIM,PUNSUCH,,DIVH
*DIM,PUNSATHI,,DIVH

/COM,Caso de humedecimiento

INTERVH=ABS((HUMH% TPUNH%-
HUMH1)/DIVH)

PUNSATH(1)=HUMH% TPUNH%+INTERVH/2

*DO,I,1,2,DIVH,1

PUNSATH(I)=PUNSATH(I-1)+INTERVH
*ENDDO

*DO,I,1,DIVH,1
PUNSATHI(I)=PUNSATH(DIVH+1-I)
*ENDDO

/COM,DETERMINAMOS LAS SUCCIONES
PARA ESTAS SATURACIONES

*DO,I,1,DIVH,1
PUNSUCH(I)=CCARH1(PUNSATHI(I),0)
*ENDDO

*DO,I,1,DIVH,1
SUM=0
*DO,J,I,DIVH,1
SUM=SUM+(2*J+1-2*I)/(PUNSUCH(J))**2
*ENDDO
NPERH(I)=SUM
*ENDDO

*DO,I,1,DIVH,1
RELPSH(I)=NPERH(I)
*ENDDO

PARCOFH=0.02596*THETHUM**2

*DO,I,1,DIVH

```

```

*IF,I,EQ,1,THEN
    PERMSC=((PARCOFH/DIVH**2)*RELPSH(I))
*ENDIF

KSUCH(I,0)=PUNSUCH(I)
KSUCH(I,1)=(PERMS/PERMSC)*((PARCOFH/
DIVH**2)*RELPSH(I))
*ENDDO

/COLOR,CURVE,4

*VPLLOT,KSUCH(1,0),KSUCH(1,1)

*ASK,ENTER,PARA CONTINUAR OPRIMA
ENTER,

SAVE,PERMEAH

*END

/COM, Las tablas KSUC y KSUCH contienen los
valores de la permeabilidad-succión

/COM, *****
*****
*****

*CREATE,CURVA_DIFUSION

/COM,EVALUAREMOS AHORA EL
COEFICIENTE DE DIFUSION D= K/(C*DENS)
(artículo de J.Li)

/COM,C es la CARACTERISTICA DE
HUMEDAD Y QUE ES IGUAL A LA
PENDIENTE EN LA CRAS

/COM,EL PARAMETRO DENS SE REFIERE A
LA DENSIDAD SECA DEL SUELO

*DO,I,1,DIVH,1

DELTAX=0.01*PUNSUC(I)
DELTAY=CCAR(PUNSUC(I),0)-
CCAR(1.01*PUNSUC(I),0)
PENDI(I)=ABS(DELTAY/DELTAX)

*IF,I,EQ,DIVH,THEN
    PENDI(I)=PENDI(I-1)
*ELSE
*ENDIF

PERMI(I)=KSUC(PUNSUC(I),0)

DIFUSI(I)=PERMEABS(I)/(PENDI(I)*DENS)

DSUC(I,0)=PUNSUC(I)
DSUC(I,1)=DIFUSI(I)

*ENDDO

ERASE
/ERASE

/GROPT,LOGY,ON

```

```

/YRANGE,1E-016,0.2E-04
*/DIM,DSUCH,TABLE,DIVH,1

/GROPT,LOGX,ON
/XRANGE,1,1000000
*/DO,I,1,DIVH,1

/GROPT,DIVX,10
/GROPT,DIVY,10
/COLOR,CURVE,12
DELTAXH=0.01*PUNSUCH(I)
DELTAYH=CCARH(PUNSUCH(I),0)-
CCARH(1.01*PUNSUCH(I),0)
PENDIH(I)=ABS(DELTAYH/DELTAXH)

/AXLAB,X,SUCCION (kPa)
/AXLAB,Y,DIFUSIVIDAD (m^2/s)
*/IF,I,EQ,DIVH,THEN
PENDIH(I)=PENDIH(I-1)
*/ELSE
*/ENDIF

/TITLE,GRAFICA COEF. DIFUSION vs
SUCCION. SEC(RED). HUM(BLUE)
PERMIH(I)=KSUCH(PUNSUCH(I),0)

*/VPLLOT,DSUC(1,0),DSUC(1,1)
DIFUSIH(I)=PERMIH(I)/(PENDIH(I)*DENS)

/NOERASE
DSUCH(I,0)=PUNSUCH(I)
DSUCH(I,1)=DIFUSIH(I)

*/ASK,ENTER,PARA CONTINUAR OPRIMA
ENTER,
*/ENDDO

/COM,PROCEDEREMOS AHORA PARA EL
CASO DE HUMEDECIMIENTO
*/VPLLOT,DSUCH(1,0),DSUCH(1,1)

*/DIM,PENDIH,,DIVH
*/ASK,ENTER,PARA CONTINUAR OPRIMA
ENTER,
*/DIM,PERMIH,,DIVH
*/DIM,DIFUSIH,,DIVH

```


/COM,NOTAS: EN TABLAS SOLO SE PUEDE
INTERPOLAR CON LA SUCCION

/COM,ASI INTRODUCIREMOS LA
PERMEABILIDAD Y LA DIFUSION
DEPENDIENTES DE LA SUCCION

/COM,PERMEABILIDAD NO SATURADA =
KSUC(SUCCION DADA,0)

/COM,COEF.DIFUSION = DSUC(SUCCION
DADA,0)

/COM,ALGUNOS AUTORES MUESTRAN LA
CURVA DE DIFUSION VS CONTENIDO DE
HUMEDAD

/COM,POR TANTO MOSTRAREMOS ESAS
CURVAS TAMBIEN PARA COMPARARLAS

ERASE

/ERASE

*DIM,DSUCI,TABLE,DIVH,1

*DIM,DSUCHI,TABLE,DIVH,1

*DO,I,1,DIVH,1

DSUCI(I,0)=PUNSATI(I)

DSUCI(I,1)=DIFUSI(I)

DSUCHI(I,0)=PUNSATIH(I)

DSUCHI(I,1)=DIFUSIH(I)

*ENDDO

ERASE

/ERASE

/GROPT,LOGY,ON

/YRANGE,1E-014,0.2E-06

/GROPT,LOGX,OFF

/XRANGE,0,0.5

/GROPT,DIVX,10

/GROPT,DIVY,10

/COLOR,CURVE,12

/AXLAB,X,CONT. VOLUMETRICO DE AGUA
(%)

/AXLAB,Y,DIFUSIVIDAD (m²/s)

/TITLE,GRAFICA COEF. DIFUSION vs
HUMEDAD SEC(RED). HUM(BLUE)

*VPLOT,DSUCI(1,0),DSUCI(1,1)

/NOERASE

/COLOR,CURVE,4

*VPLOT,DSUCHI(1,0),DSUCHI(1,1)

*ASK,ENTER,PARA CONTINUAR OPRIMA
ENTER,

/COM,vamos a introducir dos tablas mas para
asociar las pendientes con la succion

*dim,pendd,table,divh,1

*dim,pendw,table,divh,1

/COM,SE REALIZA AQUI UN AJUSTE A LA
PENDIENTE C, DEBIDO A QUE SE VA A
REQUERIR PARA

/COM,EL ANALISIS DE HISTERESIS. se
generan por ello nuevos arreglos TABLE: PENDD
Y PENDW

*DO,I,1,DIVH,1

PENDD(I,0)=PUNSUC(I)

PENDD(I,1)=PENDI(I)*(1/RELVAC)

PENDW(I,0)=PUNSUC(I)

PENDW(I,1)=PENDIH(I)*(1/RELVAC)

*ENDDO

/COM,Se regresa la CRAS a grado de saturación
para el cálculo de la histéresis hidráulica

*DO,I,1,TPUN,1

HUM%I%=HUM%I%*(1/RELVAC)

*ENDDO

*DO,I,1,TPUNH,1

HUMH%I%=HUMH%I%*(1/RELVAC)

*ENDDO

*DO,I,1,TPUN,1

CCAR(I,0)=SUC%I%

CCAR(I,1)=HUM%I%

*ENDDO

*DO,I,1,TPUNH,1

CCARH(I,0)=SUCH%I%

CCARH(I,1)=HUMH%I%

*ENDDO

*DO,I,1,TPUN,1

CCAR1(I,0)=HUM%TPUN+1-I%

CCAR1(I,1)=SUC%TPUN+1-I%

*ENDDO

*DO,I,1,TPUNH,1

CCARH1(I,0)=HUMH%TPUNH+1-I%

CCARH1(I,1)=SUCH%TPUNH+1-I%

*ENDDO

erase

/erase

/GROPT,LOGY,OFF

/GROPT,LOGX,OFF

/YRANGE,0,1

/GROPT,DIVY,10

/GROPT,LOGX,ON

/XRANGE,1,1000000

/COLOR,CURVE,12

/AXLAB,X,SUCCION (kPa)

/AXLAB,Y,GRADO DE SATURACION (%)

/TITLE,CURVA DE RETENCION SEC-HUM
ORIGINAL. CHEQUEO

*VPLLOT,CCAR(1,0),CCAR(1,1)

```

/NOERASE
/COLOR,CURVE,4

*VPLOT,CCARH(1,0),CCARH(1,1)

*ASK,ENTER,PARA CONTINUAR OPRIMA
ENTER,

/COLOR,CURVE,12

/AXLAB,Y,SUCCION (kPa)
/AXLAB,X,GRADO DE SATURACION (%)

ERASE
/ERASE

SAVE,DIFUSH

*END

/COM,MODELO ANALOGO TERMICO
EXISTE UNA RELACION NATURAL ENTRE
LA PERMEABILIDAD Y LA PENDIENTE C

/COM,Y LOS DOS DEBEN ESTAR EN EL
MISMO DOMINIO: CONTENIDO DE AGUA
VS SUCCION

/COM,REQUERIMOS PREVIAMENTE
ALGUNOS DATOS: VARIACION DE LA
SUCCION CON LA PROF. DEL SUELO

/COM,ESTOS DATOS ES PARA COTEJO DE
LAS SUCCIONES RESULTANTES DE
NUESTRO MODELO

ERASE
/ERASE

/GROPT,LOGY,ON
/YRANGE,1,1000000
/GROPT,LOGX,OFF
/XRANGE,0,1
/GROPT,DIVX,10

/COM,LAS TABLAS DSUC Y DSUCH
CONTIENEN LOS DATOS DE LAS CURVAS
DE COEF. DE DIFUSION VS. SUCCION

/COM,LAS TABLAS PENDI Y PENDIH
CONTIENEN LAS PENDIENTES C DE LA
CURVA DE RETENCION: CONTENIDO

/COM,VOLUMETRICO DE AGUA VS
SUCCION. MIENTRAS QUE LAS TABLAS
PENDD Y PENDW CORRESPONDEN A LAS

/COM,PENDIENTES C DE LAS CURVAS DE
RETENCION ORIGINAL: SATURACION VS
SUCCION.

/COM,NOTA: EN EL ANALISIS DE LA
SUCCION POR ELEMENTOS FINITOS SE
USARA PENDI y PENDIH YA QUE EN EL

/COM,BIEN NOS SIRVE PARA ESTABLECER
LA CONDICION INICIAL DE SUCCION (DE
EQUILIBRIO)

/COM,UTILIZAREMOS LOS DATOS DE LA
DRA TERESA LOPEZ LARA DE SU TESIS DE
MAESTRIA

/COM,*****
*****
*****

*CREATE,SUC_PROF

```

```

multipro,'start',2
*CSET,1,3,NPROF,'NUMERO DE MUESTRAS',10
*CSET,4,6,MESIN,'MES DE ESTUDIO (1-12)',1
*CSET,61,62,'INDIQUE LA VARIACION DE LA','SUCCION CON LA PROFUNDIDAD'
*CSET,63,64,'INDIQUE TAMBIEN EL MES','EN QUE SE HIZO EL ESTUDIO'
MULTIPRO,'END'

/COM,Valores ajustado de López Lara (1995)

multipro,'start',10
*CSET,1,3,SUCP1,'SUCCION 1 SEC (kPa)',6500
*CSET,4,6,PROF1,'PROFUNDIDAD 1 (M)',0
*CSET,7,9,SUCP2,'SUCCION 2 SEC (kPa)',6310
*CSET,10,12,PROF2,'PROFUNDIDAD (M)',0.5
*cSET,13,15,SUCP3,'SUCCION 3 SEC',5250
*CSET,16,18,PROF3,'PROFUNDIDAD 3 (M)',1
*CSET,19,21,SUCP4,'SUCCION 4 SEC',4180
*CSET,22,24,PROF4,'PROFUNDIDAD (M)',1.5
*CSET,25,27,SUCP5,'SUCCION 5 SEC',3120
*CSET,28,30,PROF5,'PROFUNDIDAD 5 (M)',2
MULTIPRO,'END'

multipro,'start',10
*CSET,1,3,SUCP6,'SUCCION 6 SEC (kPa)',2604
*CSET,4,6,PROF6,'PROFUNDIDAD 6 (M)',2.5
*CSET,7,9,SUCP7,'SUCCION 7 SEC (kPa)',2603
*CSET,10,12,PROF7,'PROFUNDIDAD 7 (M)',3
*cSET,13,15,SUCP8,'SUCCION 8 SEC',2602

*CSET,16,18,PROF8,'PROFUNDIDAD (M)',3.5
*CSET,19,21,SUCP9,'SUCCION 9 SEC',2601
*CSET,22,24,PROF9,'PROFUNDIDAD 9 (M)',4
*CSET,25,27,SUCP10,'SUCCION 10 SEC',2600
*CSET,28,30,PROF10,'PROFUNDIDAD (M)',4.5
MULTIPRO,'END'

*DIM,SUCPRO,TABLE,NPROF,1
*DO,I,1,NPROF,1
SUCPRO(I,0)=PROF%I%
SUCPRO(I,1)=SUCP%I%
*ENDDO

/GROPT,LOGY,OFF
/YRANGE,0,10000
/GROPT,DIVY,10
/GROPT,LOGX,OFF
/XRANGE,0,5
/GROPT,DIVX,10
/COLOR,CURVE,12

/AXLAB,X,PROFUNDIDAD (m)
/AXLAB,Y,SUCCION (kPa)

/TITLE,SUCCION VERSUS PROFUNDIDAD DEL SUELO (MEDICION IN SITU)

*VPLOT,SUCPRO(1,0),SUCPRO(1,1)

```

```

*ASK,ENTER,PARA CONTINUAR OPRIMA ENTER,
ERASE
SAVE,PROFS
*END

/COM,*****
*****
*****

*CREATE,LLUVIAS

/COM,REQUERIMOS TAMBIEN LOS DATOS DE LA PRECIPITACION PLUVIAL ASI COMO
/COM,LOS DATOS QUE NOS PERMITAN EVALUAR LA EVAPOTRANSPIRACION
/COM,ESTOS DATOS NOS PERMITIRA TOMAR LA DECISION DE COMO ABORDAR EL FLUJO INCIDENTE
/COM,REVISAREMOS PRIMERO EL MODELO DE THORNTHWAITE

/COM,CONFORME A INEGI PARA LA CIUDAD DE QUERETARO UTILIZAREMOS LOS SIGUIENTES DATOS
/COM,CORRESPONDIENTE A LA PRECIPITACION MENSUAL

*ASK,TIEMT,'TIEMPO TOTAL DE ESTUDIO (AÑOS)',4

multipro,'start',10
*CSET,1,3,MES1,'MES DE ENERO ',1
*CSET,4,6,PREC1,'PRECIPITACION (MM)',15
*CSET,7,9,MES2,'MES DE FEBRERO ',2
*CSET,10,12,PREC2,'PRECIPITACION (MM)',5
*CSET,13,15,MES3,'MES DE MARZO',3
*cSET,16,18,PREC3,'PRECIPITACION (MM)',7
*CSET,19,21,MES4,'MES DE ABRIL',4
*CSET,22,24,PREC4,'PRECIPITACION (MM)',18
*CSET,25,27,MES5,'MES DE MAYO',5
*CSET,28,30,PREC5,'PRECIPITACION (MM)',43
*CSET,61,62,'INDIQUE LA PRECIPITACION,' PROMEDIO MENSUAL DE'
*CSET,63,64,'LLUVIA EN LA REGION',' DE ESTUDIO (MM)'

MULTIPRO,'END'

multipro,'start',10
*CSET,1,3,MES6,'MES DE JUNIO',6
*CSET,4,6,PREC6,'PRECIPITACION (MM)',111
*CSET,7,9,MES7,'MES DE JULIO',7
*CSET,10,12,PREC7,'PRECIPITACION (MM)',120
*CSET,13,15,MES8,'MES DE AGOSTO',8
*cSET,16,18,PREC8,'PRECIPITACION (MM)',106
*CSET,19,21,MES9,'MES DE SEPTIEMBRE',9
*CSET,22,24,PREC9,'PRECIPITACION (MM)',89
*CSET,25,27,MES10,'MES DE OCTUBRE',10
*CSET,28,30,PREC10,'PRECIPITACION (MM)',42

```

MULTIPRO,'END'

multipro,'start',4

*CSET,1,3,MES11,'MES DE NOVIEMBRE',11

*CSET,4,6,PREC11,'PRECIPITACION 1
(MM)',9

*CSET,7,9,MES12,'MES DE DICIEMBRE',12

*CSET,10,12,PREC12,'PRECIPITACION 1
(MM)',9

MULTIPRO,'END'

/COM,Datos para calcular la evapotranspiración

multipro,'start',9

*CSET,1,3,MES1,'MES DE ENERO ',1

*CSET,4,6,TEM1,'TEMPERATURA MEDIA
MENSUAL(°C)',14.5

*CSET,7,9,HSOL1,'HORAS DE SOL POR DIA
PROMEDIO',13.33

*CSET,10,12,MES2,'MES DE FEBRERO ',2

*CSET,13,15,TEM2,'TEMPERATURA MEDIA
MENSUAL(°C)',16.1

*CSET,16,18,HSOL2,'HORAS DE SOL POR
DIA PROMEDIO',13.33

*CSET,19,21,MES3,'MES DE MARZO ',3

*CSET,22,24,TEM3,'TEMPERATURA MEDIA
MENSUAL(°C)',18.5

*CSET,25,27,HSOL3,'HORAS DE SOL POR
DIA PROMEDIO',13.08

*CSET,61,62,'INDIQUE LA TEMPERATURA','
PROMEDIO MENSUAL DE'

*CSET,63,64,'Y LAS HORAS DE SOL',' AL DIA
EN LA REGION'

MULTIPRO,'END'

multipro,'start',9

*CSET,1,3,MES4,'MES DE ABRIL ',4

*CSET,4,6,TEM4,'TEMPERATURA MEDIA
MENSUAL(°C)',20.8

*CSET,7,9,HSOL4,'HORAS DE SOL POR DIA
PROMEDIO',12.62

*CSET,10,12,MES5,'MES DE MAYO ',5

*CSET,13,15,TEM5,'TEMPERATURA MEDIA
MENSUAL(°C)',22.1

*CSET,16,18,HSOL5,'HORAS DE SOL POR
DIA PROMEDIO',12.25

*CSET,19,21,MES6,'MES DE JUNIO ',6

*CSET,22,24,TEM6,'TEMPERATURA MEDIA
MENSUAL(°C)',21.8

*CSET,25,27,HSOL6,'HORAS DE SOL POR
DIA PROMEDIO',12

*CSET,61,62,'INDIQUE LA TEMPERATURA','
PROMEDIO MENSUAL DE'

*CSET,63,64,'Y LAS HORAS DE SOL',' AL DIA
EN LA REGION'

MULTIPRO,'END'

multipro,'start',9

*CSET,1,3,MES7,'MES DE JULIO ',7

*CSET,4,6,TEM7,'TEMPERATURA MEDIA
MENSUAL(°C)',20.5

*CSET,7,9,HSOL7,'HORAS DE SOL POR DIA
PROMEDIO',12.11

*CSET,10,12,MES8,'MES DE AGOSTO ',8

*CSET,13,15,TEM8,'TEMPERATURA MEDIA
MENSUAL(°C)',20.4

*CSET,16,18,HSOL8,'HORAS DE SOL POR
DIA PROMEDIO',12.33

*CSET,19,21,MES9,'MES DE SEPTIEMBRE ',9

*CSET,22,24,TEM9,'TEMPERATURA MEDIA
MENSUAL(°C)',19.6

```

*CSET,25,27,HSOL9,'HORAS DE SOL POR
DIA PROMEDIO',12.41

*CSET,61,62,'INDIQUE LA TEMPERATURA','
PROMEDIO MENSUAL DE'

*CSET,63,64,'Y LAS HORAS DE SOL',' AL DIA
EN LA REGION'

MULTIPRO,'END'

multipro,'start',9

*CSET,1,3,MES10,'MES DE OCTUBRE ',10

*CSET,4,6,TEM10,'TEMPERATURA MEDIA
MENSUAL(°C)',18.4

*CSET,7,9,HSOL10,'HORAS DE SOL POR DIA
PROMEDIO',12.58

*CSET,10,12,MES11,'MES DE NOVIEMBRE
',11

*CSET,13,15,TEM11,'TEMPERATURA
MEDIA MENSUAL(°C)',16.5

*CSET,16,18,HSOL11,'HORAS DE SOL POR
DIA PROMEDIO',12.75

*CSET,19,21,MES12,'MES DE DICIEMBRE ',12

*CSET,22,24,TEM12,'TEMPERATURA
MEDIA MENSUAL(°C)',15.2

*CSET,25,27,HSOL12,'HORAS DE SOL POR
DIA PROMEDIO',13.08

*CSET,61,62,'INDIQUE LA TEMPERATURA','
PROMEDIO MENSUAL DE'

*CSET,63,64,'Y LAS HORAS DE SOL',' AL DIA
EN LA REGION'

MULTIPRO,'END'

/COM,Evapotranspiración por método de
Thornwaitte

/COM,INDICE DE CALOR MENSUAL

*DIM,INCAL,,12

*DIM,ETPSC,,12

*DIM,ETPR,,12

*DO,I,1,12,1

INCAL(I)=(1/5)*(TEM%I%)**1.514

*ENDDO

/COM,INDICE ANUAL

SUM=0

*DO,I,1,12,1

SUM=SUM+INCAL(I)

*ENDDO

IANUAL=SUM

/COM,EXPONENTE a DE LA FORMULA

EXPA=(675E-09)*IANUAL**3-(771E-
07)*IANUAL**2+(1792E-
05)*IANUAL+0.49239

/COM,PARAMETRO ALPHA

ALPH=16*(10/IANUAL)**EXPA

/COM,EVAPOTRANSPIRACION SIN
CORREGIR

*DO,I,1,12,1

ETPSC(I)=ALPH*(TEM%I%)**EXPA

*ENDDO

```

```
/COM,EVAPOTRANSPIRACION REAL  
(CORREGIDA, POR LAS HORAS REALES DE  
SOL)
```

```
*DO,I,1,12,1
```

```
ETPR(I)=ETPSC(I)*(HSOL%I%/12)
```

```
*ENDDO
```

```
/COM,HASTA AQUI LA  
EVAPOTRANSPIRACION
```

```
*IF, TIEMT,GT,1,THEN
```

```
*DO,I,1, TIEMT*12,1
```

```
MES%I%=I
```

```
*ENDDO
```

```
/COM,AHORA A LA PRECIPITACION LE  
RESTAREMOS LA EVAPOTRANSPIRACION
```

```
*DO,I,1, TIEMT*12+1,12
```

```
PREC%1+(I-1)%=prec%1%
```

```
PREC%2+(I-1)%=prec%2%
```

```
PREC%3+(I-1)%=prec%3%
```

```
PREC%4+(I-1)%=prec%4%
```

```
PREC%5+(I-1)%=prec%5%
```

```
PREC%6+(I-1)%=prec%6%
```

```
PREC%7+(I-1)%=prec%7%
```

```
PREC%8+(I-1)%=prec%8%
```

```
PREC%9+(I-1)%=prec%9%
```

```
PREC%10+(I-1)%=prec%10%
```

```
PREC%11+(I-1)%=prec%11%
```

```
PREC%12+(I-1)%=prec%12%
```

```
*ENDDO
```

```
*DO,I,1, TIEMT*12+1,12
```

```
PRECF%1+(I-1)%=prec%1%-ETPR(1)
```

```
PRECF%2+(I-1)%=prec%2%-ETPR(2)
```

```
PRECF%3+(I-1)%=prec%3%-ETPR(3)
```

```
PRECF%4+(I-1)%=prec%4%-ETPR(4)
```

```
PRECF%5+(I-1)%=prec%5%-ETPR(5)
```

```
PRECF%6+(I-1)%=prec%6%-ETPR(6)
```

```
PRECF%7+(I-1)%=prec%7%-ETPR(7)
```

```
PRECF%8+(I-1)%=prec%8%-ETPR(8)
```

```
PRECF%9+(I-1)%=prec%9%-ETPR(9)
```

```
PRECF%10+(I-1)%=prec%10%-ETPR(10)
```

```
PRECF%11+(I-1)%=prec%11%-ETPR(11)
```

```
PRECF%12+(I-1)%=prec%12%-ETPR(12)
```

```
*ENDDO
```

```
*DIM,LLUV, TABLE, TIEMT*12,1
```

```
*DIM,LLUVF, TABLE, TIEMT*12,1
```

```
/COM,PARA GRAFICAR LA PRECIPITACION  
PLUVIAL SE INTRODUCE LA TABLA  
LLUV,(.)
```

```
*DO,I,1, TIEMT*12,1
```


LLUV(I,0)=MES%I%*30

LLUV(I,1)=PREC%I%

*ENDDO

*DO,I,1,TIEMT*12,1

LLUVF(I,0)=MES%I%*30

LLUVF(I,1)=PRECF%I%

*ENDDO

/YRANGE,-20,200

/GROPT,DIVY,11

/XRANGE,0,TIEMT*12*30

/GROPT,DIVX,TIEMT*3

/COLOR,CURVE,12

/AXLAB,X,DIAS

/AXLAB,Y,ENTRADA DE AGUA AL
MEDIO(mm)

/TITLE,PRECIPITACION MENSUAL CD
QUERETARO (INEGI). INCLUYE MODELO
THORNTHWAITE

*VPLOT,LLUV(1,0),LLUV(1,1)

*ASK,ENTER,PARA CONTINUAR OPRIMA
ENTER,

/NOERASE

/COLOR,CURVE,4

*VPLOT,LLUVF(1,0),LLUVF(1,1)

*ASK,ENTER,PARA CONTINUAR OPRIMA
ENTER,

/COM,VARIANTE DE PRECIPITACION.
FUNCION COSINUSOIDAL (ESTA ES LA QUE
USAREMOS)

*DIM,LLUVFM,TABLE,TIEMT*12,1

/COM,AL USAR EL METODO DE
THORNTHWAITE RESULTO SER MUY
CONSERVADOR

/COM,DEL ORDEN DEL 20% EN EPOCA DE
SEQUIA

/COM,Y MUCHO MENOR EN EPOCA DE
LLUVIAS.

/COM,EN NUESTRO ESTUDIO LAS
MAXIMAS LLUVIAS REGISTRADAS SE
ESTAN

/COM,DISMINUYENDO UN PORCENTAJE
POR EVAPOTRANSPIRACION DEL ORDEN
DEL 35%

/COM,AQUI PI/PY SE REFIERE
ESENCIALMENTE AL ANGULO DE FASE, ES
DECIR EN QUE MES

/COM,INICIA EL CICLO. PUEDE
MODIFICARSE A CONVENIENCIA.SE ESTA
TOMANDO UN VALOR

/COM, DE 110 MM DE PRECIPITACION MAX.
EN JULIO, EVENTUALMENTE HAN
EXISTIDO

/COM,INCLUSO VALORES MAYORES (VER
LA GRAFICA DE PRECIPITACION INEGI O
SIMILAR)

/COM,LO QUE IMPLICA POR ELLO QUE ES
EQUIVALENTE A HABER DISMINUIDO UN
35%

/COM,APROX POR EVAPOTRANSPIRACION.

ERASE

py=2

*DO,I,1,TIEMT*12+1,12

PRECFCM%1+(I-1)%=70*COS((3.1416/6)*1-3.1416/PY)

PRECFCM%2+(I-1)%=70*COS((3.1416/6)*2-3.1416/PY)

PRECFCM%3+(I-1)%=70*COS((3.1416/6)*3-3.1416/PY)

PRECFCM%4+(I-1)%=70*COS((3.1416/6)*4-3.1416/PY)

PRECFCM%5+(I-1)%=70*COS((3.1416/6)*5-3.1416/PY)

PRECFCM%6+(I-1)%=70*COS((3.1416/6)*6-3.1416/PY)

PRECFCM%7+(I-1)%=70*COS((3.1416/6)*7-3.1416/PY)

PRECFCM%8+(I-1)%=70*COS((3.1416/6)*8-3.1416/PY)

PRECFCM%9+(I-1)%=70*COS((3.1416/6)*9-3.1416/PY)

PRECFCM%10+(I-1)%=70*COS((3.1416/6)*10-3.1416/PY)

PRECFCM%11+(I-1)%=70*COS((3.1416/6)*11-3.1416/PY)

PRECFCM%12+(I-1)%=70*COS((3.1416/6)*12-3.1416/PY)

*ENDDO

*DO,I,1,TIEMT*12,1

LLUVFM(I,0)=MES%I%*30

LLUVFM(I,1)=PRECFCM%I%

*ENDDO

/YRANGE,-200,200

/GROPT,DIVY,10

/XRANGE,0,TIEMT*12*30

/GROPT,DIVX,TIEMT*3

/COLOR,CURVE,12

/AXLAB,X,DIAS

/AXLAB,Y,ENTRADA DE AGUA AL MEDIO (mm)

/TITLE,OPCION COSINUSOIDAL.
PRECIPITACION EN QUERETARO

*VPLLOT,LLUVFM(1,0),LLUVFM(1,1)

*ASK,ENTER,APLIQUE UNA TECLA PARA CONTINUAR

SAVE,PLUV

*END

/COM,NOTA: OBSERVAMOS QUE LA UNICA FORMA DE QUE LA SUCCION SE REPITA EN FORMA

/COM,PERIODICA, ES QUE SE ELIJA UNA PRECIPITACION Y EVAPOTRANSPIRACION ANALOGA

/COM,ES DECIR QUE TIENDA A ANULARSE,
DE OTRA FORMA LA SUCCION SIEMPRE

/COM,TENDERA A BAJAR. PROPONDREMOS
POR TAL MOTIVO UNA FUNCION

/COM,DE PRECIPITACION DE TIPO
COSINUSOIDAL

/COM,-----HASTA AQUI LOS
DATOS REQUERIDOS PARA INICIAR

/COM,-----EL ANALISIS DE LA
SUCCION MEDIANTE ANALOGIA TERMICA

/COM,INICIA EL ANALISIS DE LA SUCCION
MEDIANTE MEF (ANALOGIA
TERMICA)*****

/COM,*****

*CREATE,GEOMETRIA

ERASE

/PREP7

multipro,'start',3

*CSET,1,3,LEST,'LONGITUD DEL ESTRATO
(M)',12

*CSET,4,6,H1,'ESPESOR DE LA CAPA DE
SUELO(M)',2.4

*CSET,7,9,SEPM,'SEPARACION DE MALLA
(M)',0.1

*CSET,61,62,'INDIQUE LOS DATOS',
GENERALES PARA EL ESTUDIO'

MULTIPRO,'END'

K,1

K,2,0,-H1

K,3,LEST,-H1

K,4,LEST

L,1,2

L,2,3

L,3,4

L,4,1

AL,1,2,3,4

NUMMRG,KP

/PNUM,AREA,1

/NUMBER,1

/TITLE, PERFIL SUELO ESTRATIFICADO

APLOT

ERASE

/RELOT

SAVE,DOST

*END

/COM,*****

*CREATE,MALLADO

/COM,LAS TABLAS DSUC Y DSUCH
CONTIENEN LOS DATOS DE LAS CURVAS
DE COEF. DE DIFUSION VS. SUCCION

/COM,LAS TABLAS PENDI Y PENDIH
CONTIENEN LAS PENDIENTES C DE LA
CURVA DE RETENCION: CONTENIDO

/COM,VOLUMETRICO DE AGUA VS
SUCCION. MIENTRAS QUE LAS TABLAS
PENDD Y PENDW CORRESPONDEN A LAS

/COM,PENDIENTES C DE LAS CURVAS DE
RETENCION ORIGINAL: SATURACION VS
SUCCION.

/COM,DE LOS ANALISIS PREVIOS LOS
VECTORES PERMEABH Y SUCCIONH

/COM,CONTIENEN LOS VALORES DE LA
PERMEABILIDAD VS SUCCION

/COM,*****cambio de
unidades*****

/COM,con la finalidad de tener una explicacion
mas clara del proceso

/COM,haremos la transformacion de kPa a T/m2
(1kPa=0.1 T/m2)

/COM,hasta el momento, la permeabilidad se
indica en unidades de: M/S

/COM,mientras que la succion en kPa

/COM,de igual manera trabajaremos ahora con la
permeabilidad en M/dia

/COM,para ello multiplicaremos por 86400

/COM,de igual maner para transformar las
unidades del parametro C

/COM,correspondiente al modelo termico,
tendremos que multiplicarlo

/COM,por 10(-4) con impacto en la densidad
saturada que ahora estara

/COM,en T/m3 y en la pendiente que asocia la
succion ahora en T/m2

/COM,INTRODUCIMOS LA
PERMEABILIDAD VS SUCCION

/COM,EN ESTE CASO LA PERMEABILIDAD
ES EQUIVALENTE A LA CONDUCTIVIDAD

/COM,nota importante: LOS VALORES DE
SUCCION NO SE PUEDEN REPETIR

/COM,AL SER INCLUIDOS EN PROPIEDADES
DEL MATERIAL, POR ELLO

/COM,UNO DE LOS VALORES (3000 kPa) lo
cambiamos a (3002 kPa)

/COM,otra forma de abordar el anterior problema
que al parecer ocurre

/COM,es modificar sistematicamente estas
succiones iguales con

/COM,modificaciones minimas. se propone el
siguiente algoritmo

*do,j,2,divh,1

*if,succions(j)-succions(j-1),LE,0,then

succions(j)=succions(j-1)+0.1

*else

*endif

*enddo

/NOPR

```

/PMETH,OFF,0
KEYW,PR_SET,1
KEYW,PR_THERM,1
/GO

/COM,USAREMOS EL ELEMENTOS
RECTANGULAR DE 4 NODOS PLANE55
(ANSYS)
/COM,PARA EL ANALISIS ANALOGO
TERMICO TRANSITORIO

ET,1,55

/COM,SE INTRODUCE LA PERMEABILIDAD
COMO VARIABLE DE LA SUCCION, COMO
UNA TABLA
/COM,ES DECIR SE ESTA INTRODUCIENDO
LA GRAFICA DE PERMEABILIDAD VS
SUCCION

MPTEMP,,,,,,,,
*DO,I,1,DIVH,1
MPTEMP,I,SUCCIONS(I)*0.1
MPDATA,C,1,,CIS(I)*1E-02
*ENDDO

MP,DENS,1,1

TYPE,1
MAT,1
ASEL,S,AREA,,1
AESIZE,ALL,SEPM

MSHAPE,0,2D
MSHKEY,1
AMESH,ALL

/COM,AHORA FALTA INTRODUCIR EL
PARAMETRO C DE CAPACIDAD
ESPECIFICA
/COM, C PARA NUESTRO CASO ES C= 1/D
SIENDO D EL COEF. DE DIFUSION
/COM, D=
K/((DELTAW/DELTAS)GAMMAW),LA
RELACION DELTA ES LA PENDIENTE
/COM, DE LA CURVA DE RETENCION

*DIM,CIS,,DIVH

*DO,I,1,DIVH,1
CIS(I)=1/(DIFUSI(I)/PERMEABS(I))
*ENDDO

/COM,DE MANERA SIMILAR A LA
PERMEABILIDAD, SE INTRODUCE COMO
TABLA
/COM,EL CALOR ESPECIFICO COMO
VARIABLE DE LA SUCCION

MPTEMP,,,,,,,,
*DO,I,1,DIVH,1
MPTEMP,I,SUCCIONS(I)*0.1
MPDATA,C,1,,CIS(I)*1E-02
*ENDDO

MP,DENS,1,1

TYPE,1
MAT,1
ASEL,S,AREA,,1
AESIZE,ALL,SEPM

MSHAPE,0,2D
MSHKEY,1
AMESH,ALL

*GET,NELEM,ELEM,0,COUNT
*GET,NTOT,NODE,0,COUNT

ERASE

```

/TITLE, MODELO DISCRETO.%NELEM%
ELEMENTOS FINITOS.ANALISIS DE FLUJOS

EPL0T

*ASK,ENTER,PARA CONTINUAR OPRIMA
ENTER,

/COM,PARTIREMOS DE UNA SUCCION DE
EQUILIBRIO, EN ESTE CASO ELEGIMOS LA

/COM,DE TERE PARA UNA PROFUNDIDAD
DE 4M DONDE SE SUPONE QUE YA NO
CAMBIARA

IC,ALL,TEMP,SUCP10*0.1

/COM,PROPONEMOS UNA INDUCCION DE
FLUJO EN CADA NODO DE LA FRONTERA
SUPERIOR IZQUIERDA

/COM,EL ANALISIS DE LOS VALORES DE
FLUJO ESTAN EN LAS NOTAS APARTE

/COM,el valor de FLUJO DE 0.00015T/M2DIA
POR NODO EQUIVALE A UNA LLUVIA

/COM, DE 500 MM DE PROMEDIO ANUAL

/COM,para fines de aplicacion del vector flujo
modificamos LA TABLA PREVIA LLUVFM

*DO,I,1,TIEMT*12,1

LLUVFM(I,0)=MES%I%*30

LLUVFM(I,1)=PRECFM%I%*(-1)*SEPM*(1E-
03)/30

*ENDDO

/COM,probaremos primero la opcion sin
cimentacion *****

/COM,solo para fines del esfuerzos de
preconsolidacion

SAVE,CAS1

*END

/COM,*****

*CREATE,CASOPREC

CONTAD=0

nse1,s,loc,y,0

sf,all,HFLUX,%LLUVFM%

NSEL,ALL

/COM, LAS SIGUIENTES INSTRUCCIONES
SON PARA ACOTAR LA LOSA DE
CIMENTACION

/COM,NSEL,S,LOC,Y,0

/COM,NSEL,R,LOC,X,0,0.3*LEST

/COM,sf,all,HFLUX,%LLUVFM%

/COM,NSEL,ALL

/COM,NSEL,S,LOC,Y,0

/COM,NSEL,R,LOC,X,0.7*LEST,LEST

/COM,sf,all,HFLUX,%LLUVFM%

/COM,NSEL,ALL

/COM,OPCIONAL INCLUIR FUENTES
PUNTUALES.EJEMPLO DE UN CASO

/COM,local,11,1,lest/2,-0.5*h1

/COM,nsel,s,loc,x,0,0.125

/COM,bf,all,hgen,-0.002

/COM,nsel,all

/COM,csys,0

/COM,el valor de BF asocia un valor de densidad
cambiante del suelo

/COM,en el tiempo,por tanto se asocia una
variacion de su densidad

/COM,UN VALOR DE 0.0015T/M3 AL DIA
EQUIVALDRIA AL FLUJO DE UNA LLAVE
MEDIO ABIERTA

SAVE,CLIMA

*END

/COM,*****

*CREATE,CASOLOS

CONTAD=1

/COM, LAS SIGUIENTES INSTRUCCIONES
SON PARA ACOTAR LA LOSA DE
CIMENTACION

FINISH

/SOLU

NSEL,S,LOC,Y,0

NSEL,R,LOC,X,0,0.3*LEST

sf,all,HFLUX,%LLUVFM%

NSEL,ALL

NSEL,S,LOC,Y,0

NSEL,R,LOC,X,0.7*LEST,LEST

sf,all,HFLUX,%LLUVFM%

NSEL,ALL

/COM,OPCIONAL INCLUIR FUENTES
PUNTUALES.EJEMPLO DE UN CASO

/COM,local,11,1,lest/2,-0.5*h1

/COM,nsel,s,loc,x,0,0.125

/COM,bf,all,hgen,-0.002

/COM,nsel,all

/COM,csys,0

/COM,el valor de BF asocia un valor de densidad
cambiante del suelo

/COM,en el tiempo,por tanto se asocia una
variacion de su densidad

/COM,UN VALOR DE 0.0015T/M3 AL DIA
EQUIVALDRIA AL FLUJO DE UNA LLAVE
MEDIO ABIERTA

SAVE,CLIMA

*END

/COM,*****

*CREATE,ANALISIS

ERASE

FINISH

/SOLU

ANTYPE,TRANS

NROPT,AUTO

OUTRES,ALL,ALL

/TITLE,

TIME,TIEMT*12*30

NSUBST,100,500,100

KBC,1

SOLVE

/ERASE

ERASE

save,soluc

*END

/COM,*****

*CREATE,VISU

FINISH

/POST1

ERASE

*DO,I,30,TIEMT*12*30,30

SET,NEAR,,1,,I,,

/TITLE,SUCCIONES (x10...KpA) %I% DIAS

PLNSOL,TEMP,,0

*ASK,FLAG,OPRIMA UNA TECLA PARA
CONTINUAR,

*ENDDO

SAVE,GRFU

/COM,VAMOS A GRAFICAR LAS
SUCCIONES RESULTANTES A VARIAS
PROFUNDIDADES: DE 0, 0.5

/COM,Y DE UN METRO PARA COTEJAR LOS
VALORES QUE OBTUVO EN SU ESTUDIO
TERE

NODC=NODE(LEST/4,0,0)

*dim,sucot,,TIEMT*12

*dim,sucAt,,TIEMT*12

*DIM,GRAFSU,TABLE,TIEMT*12,3


```

*DO,I,30,TIEMT*12*30,30
SET,NEAR, ,1, ,I, ,
*GET,SUCOT(I/30),NODE,NODC,TEMP
*ENDDO

*DO,I,1,TIEMT*12,1
SUCAT(I)=I
*ENDDO

*DO,I,1,TIEMT*12,1
GRAFSU(I,0)=SUCAT(I)
GRAFSU(I,1)=SUCOT(I)
*ENDDO

/TITLE,

/YRANGE,0,500
/XRANGE,0,TIEMT*12
/GROPT,DIVX,TIEMT*12
/GROPT,DIVY,10
/COLOR,CURVE,2
/AXLAB,X,DIAS
/AXLAB,Y,SUCCION T/M2 (x10 kPa)0-0.5-1
MT

/TITLE,
*VPLOT,GRAFSU(1,0),GRAFSU(1,1)

/NOERASE

NODC=NODE(LEST/4,-0.5,0)

*dim,SUCUT,,TIEMT*12

*DO,I,30,TIEMT*12*30,30
SET,NEAR, ,1, ,I, ,
*GET,SUCUT(I/30),NODE,NODC,TEMP
*ENDDO

*DO,I,1,TIEMT*12,1
GRAFSU(I,2)=SUCUT(I)
*ENDDO

/TITLE,
/COLOR,CURVE,4
*VPLOT,GRAFSU(1,0),GRAFSU(1,2)

/NOERASE

NODC=NODE(LEST/4,-1,0)

*dim,SUCET,,TIEMT*12

*DO,I,30,TIEMT*12*30,30
SET,NEAR, ,1, ,I, ,
*GET,SUCET(I/30),NODE,NODC,TEMP
*ENDDO

*DO,I,1,TIEMT*12,1
GRAFSU(I,3)=SUCET(I)
*ENDDO

DIT=LEST/4

/TITLE,SUCCION VS PROFUND.
DIST.X=%DIT% MT

/COLOR,CURVE,8

```

*VPLLOT,GRAFSU(1,0),GRAFSU(1,3)

*ASK,FLAG,OPRIMA UNA TECLA PARA CONTINUAR,

/COM,NOTA: EL RESULTADO ANTERIOR CONINCIDE EN CIERTA FORMA CON EL RESULTADO DE TERE

/COM,EN CUANTO AL VALOR DE LAS SUCCIONES CON RELACION A LA PROFUNDIDAD DEL SUELO

save,pris

*END

/COM,*****

*CREATE,PREPAN

ERASE

FINISH

/POST1

/COM,AQUI LAS SUCCIONES SON OBTENIDAS EN T/M2

*dim,sucnod1,,ntot

*dim,sucnod2,,ntot

*DIM,SATUR1,,NTOT

*DIM,ESFSUC1,,NTOT

*DIM,SATUR2,,NTOT

*DIM,ESFSUC2,,NTOT

*DIM,ESFSUC3,,NTOT

*DIM,SUCTIE,ARRAY,NTOT,TIEMT*12

*DIM,ESFEFE,ARRAY,NTOT,TIEMT*12

/COM,EN VIRTUD DE QUE ACORDAMOS CON E. ROJAS EL PROCEDIMIENTO PARA LA TRANSFERENCIA

/COM,DE ESFUERZOS AL MODELO MECANICO, SE MODIFICARON ALGUNOS ASPECTOS:

/COM,CON FINES DE ORDEN Y CLARIDAD, CREAREMOS UNA MATRIZ QUE CONTENGA LOS ESFUERZOS

/COM,QUE SE APLICARAN AL MODELO MECANICO EN ADICION A LOS ESFUERZOS PROPIOS QUE

/COM,TRASMITIRAN LAS CARGAS APLICADAS.

*DO,J,30, TIEMT*12*30,30

SET,NEAR,,1,,J

*do,k,1,ntot,1

*vget,SUCNOD1(k),node,K,temp

*ENDDO

/COM,EL VECTOR SUCNOD1 CONTIENE LAS SUCCIONES DE UN PROCESO CICLICO CADA 30 DIAS

/COM,Y LA MATRIZ SUCTIE, LAS SUCCIONES DE CADA NODO Y A CADA ETAPA DE TIEMPO

/COM,NOTA: TRANSFORMAMOS LA MATRIZ SUCTIE A (kPa)

*DO,K1,1,NTOT,1

SUCTIE(K1,J/30)=SUCNOD1(K1)*10

*ENDDO

*ENDDO

```

SAVE,SUCCIO
*END

/COM,EL SIGUIENTE MACRO ES EL QUE
CALCULA LOS VALORES DE CHI YA SIN
PLOTEOS

/COM,DE HISTERESIS PARA NO ALENTAR
EL PROCESO. UNA CARACTERISITICA
ADICIONAL

/COM,ES QUE SE PARTE SIEMPRE DE
VALORES DE SEQUIA MAXIMA DE CADA
NODO

/COM,DETECTADOS EN LA MATRIZ
SUCTIE. SER ELIJE COMO RANGO APROX
DE LA

/COM,ETAPA 22 A LA 46. GENERAREMOS
PRIMERO UN ARREGLO QUE DETERMINE
EN DONDE

/COM,INICIA LA SEQUIA MAX. CERCANO A
LA ETAPA 22 EN CADA NODO.

/COM,*****
*****
*****

*CREATE,PREVIO_CHI

*DIM,SNOD,,23
*DIM,UFN,,NTOT

*DO,I,1,NTOT,1
*DO,J,12,34,1
  SNOD(J-11)=SUCTIE(I,J)
*ENDDO
*VSCFUN,UBIC,LMAX,SNOD

UFN(I)=UBIC+11
*ENDDO

SAVE,ORSMAX
*END

/COM,*****
*****
*****

*CREATE,GEN_CHI

  erase
  numk=200
  b=4.5

*DIM,CHI,,NTOT,TIEMT*12
*DIM,SUCCN,,NUMK
*DIM,SUCCNN,,NUMK
*DIM,HUMCN,,NUMK
*DIM,SUCCW,,NUMK
*DIM,PENDKW,,NUMK
*DIM,PENDKS,,NUMK
*DIM,ADHUM,,NUMK

*DO,I,1,NTOT,1
*DO,J,UFN(I)+1,46,1

*IF,SUCTIE(I,J),LT,SUCTIE(I,J-1),THEN

```

```

*do,k,1,numk,1

*IF,K,EQ,1,THEN
  SUCCN(K)=SUCTIE(I,J-1)
  SUCCNN(K)=SUCCN(K)
  *IF,J,EQ,UFN(I)+1,THEN
    HUMCN(K)=CCAR(SUCCN(K),1)
    CHI(I,J-1)=HUMCN(K)
  *ELSE
    HUMCN(K)=CHI(I,J-1)
  *ENDIF
  SUCCW(K)=CCARH1(HUMCN(K),1)
  DELTASU=abs((SUCCN(K)-
  SUCCW(K))/NUMK )

*ELSE
  SUCCNN(K)=SUCCNN(K-1)-DELTASU
  PENDKW(K)=((SUCCW(K)-
  1)/SUCCNN(K))**b)*PENDW(SUCCW(K-1),1)
  ADHUM(K)=PENDKW(K)*DELTASU
  HUMCN(K)=HUMCN(K-1)+ADHUM(K)
  SUCCN(K)=CCAR1(HUMCN(K),1)
  SUCCW(K)=CCARH1(HUMCN(K),1)
*ENDIF

*IF,SUCCNN(K),LE,SUCTIE(I,J),THEN
  *EXIT
*ELSE
*ENDIF

*ENDDO

CHI(I,J)=HUMCN(K)

*ELSE
*do,k,1,numk,1
*IF,K,EQ,1,THEN
  SUCCNN(K)=SUCTIE(I,J-1)
  HUMCN(K)=CHI(I,J-1)
  SUCCN(K)=CCAR1(HUMCN(K),1)
  SUCCW(K)=CCARH1(HUMCN(K),1)
  DELTASU=abs((SUCCN(K)-
  SUCCW(K))/NUMK )

*ELSE
  SUCCNN(K)=SUCCNN(K-1)+DELTASU
  PENDKS(K)=((SUCCN(K)-
  1)/SUCCNN(K))**(-b))*PENDD(SUCCN(K-
  1),1)
  ADHUM(K)=PENDKS(K)*DELTASU
  HUMCN(K)=HUMCN(K-1)-ADHUM(K)
  SUCCN(K)=CCAR1(HUMCN(K),1)
  SUCCW(K)=CCARH1(HUMCN(K),1)

*ENDIF

*IF,SUCCNN(K),GT,SUCTIE(I,J),THEN
  *EXIT
*ELSE
*ENDIF

```

```

*ENDDO

        CHI(I,J)=HUMCN(K)

*ENDIF

*ENDDO

*ENDDO

SAVE,VALORCHI

*END

/COM,CONTROL_CHI

/COM,*****
*****
*****

*CREATE,CONTROL_CHI

/COM,AGREGAMOS UNA INSTRUCCION DE
CONTROL PARA VER SI SE HA ELEGIDO
BIEN

/COM,LA ELECCION DEL RANGO PARA
DETECTAR LA MAX SUCCION EN CADA
NODO

/COM,EN CASO DE QUE SALGAN VALORES
MAYORES A LA UNIDAD, HAY QUE
AUMENTAR

/COM,UN POCO EL RANGO YA SEA A LA
IZQUIERDA O A LA DERECHA,
COMUNMENTE

/COM,A LA DERECHA EN EL INDICE J DEL
MACRO ANTERIOR PREIO_CHI.

/COM,LO QUE PASA ES QUE NOSOTROS
PARTIMOS DE LA SUCCION MAX EN LA
CURVA DE SECADO

/COM,Y DE ALLI RUMBO A
HUMEDECIMIENTO, SI ESTO NO SE
CUMPLE LA CURVA DE

/COM,HISTERESIS ESTARA MAL
CONSTRUIDA.POR TANTO SI SE ACTIVA EL
COMANDO *ASK

/COM,SIGNIFICA QUE HAY QUE REVISAR
DICHO RANGO

*DO,I,1,NTOT,1

*DO,J,34,46,1

*IF,CHI(I,J),GE,1,THEN

*ASK,TECLA,REVISAR RANGO J EN
PREVIO_CHI,

*EXIT

*ELSE

*ENDIF

*ENDDO

*ENDDO

*END

/COM,USAREMOS POR TANTO LAS
SUCCIONES Y SATURACIONES DE LA
ETAPA 34 (MAX) A LA 46 (MAX)

/COM,ES DECIR UN CICLO COMPLETO
SIGNIFICATIVO DE TODO EL PROCESO.

/COM,LA MATRIZ CHI CONTIENE LOS
VALORES DE LA SATURACION
CONSIDERANDO EL EFECTO DE
HISTERESIS

```

```

/COM,*****
*****
*****

*CREATE,ESF_EFEC

*DO,I,1,NTOT,1

*DO,J,34,46,1

/COM,DIVIDIMOS ENTRE 10, PARA
OBTENER LOS ESFUERZOS EN T/M2

ESFEFE(I,J)=(SUCTION(I,J)/10)*CHI(I,J)

*ENDDO

*ENDDO

/COM,LA MATRIZ ESFEFE CONTIENE LOS
ESFUEROS DEBIDO A LA SUCCION Y SE
OBTIENEN MULTIPLICANDO

/COM,LA SUCCION POR EL PARAMETRO
CHI, OBTENIDO ESTE MEDIANTE EL
PROCESO HISTERETICO

*IF,CONTAD,EQ,0,THEN

*DO,J,34,46,1

*DIM,VESFEA%J%,,NTOT

*ENDDO

*DO,J,34,46,1

*DO,I,1,NTOT,1

VESFEA%J%(I)=ESFEFE(I,J)

*ENDDO

*ENDDO

*ELSE

*DO,J,34,46,1

*DIM,VESFE%J%,,NTOT

*ENDDO

*DO,J,34,46,1

*DO,I,1,NTOT,1

VESFE%J%(I)=ESFEFE(I,J)

*ENDDO

*ENDDO

*ENDIF

SAVE,VIS

*END

/COM,LA MATRIZ ESFEFE CONTIENE LOS
ESFUERZOS INTERNOS QUE SERAN
TRASMITIDOS COMO ESFUERZOS

/COM,RESIDUALES A LOS NODOS DEL
MKODELO DISCRETO PARA EL ANALISIS
DE SU COMPORTAMIENTO

/COM,MECANICO

```

```

/COM,EL MACRO VECTOUT ES PARA
SACAR EN FORMA EXTERNA LOS
ESFUERZOS

/COM,*****
*****
*****

*CREATE,VECTOUT

*IF,CONTAD,EQ,0,THEN

*DO,J,34,46,1

*CFOPEN,'C:\ANSYS_PROG\VEFEA%J%',TX
T

*VWRITE,VESFEA%J%(1)
(F10.4)
*CFCLOS
*ENDDO

*ELSE

*DO,J,34,46,1

*CFOPEN,'C:\ANSYS_PROG\VEFE%J%',TXT
*VWRITE,VESFE%J%(1)
(F10.4)
*CFCLOS
*ENDDO

*ENDIF

*END

/COM,*****
/COM,NOTA: LOS VECTORES VEFE%.%
CORRESPONDEN A LOS ESFUERZOS DEL
SUELO CON CIMENTACION

/COM,MIENTRAS QUE LOS VECTORES
VEFE%.% CORRESPONDEN A LOS
ESFUERZOS SIN CIMENTACION

/COM,*****
/COM,*****
*****
*****

*CREATE,PERFIL_SUCCIONES

*DIM,PER_SUC,TABLE,25,1

*ASK,UBICX,Distancia en x,1.8

*ASK,MES_ES,Indique el mes de estudio,34

*ASK,COLOR_GRAF,Indique color 2(lila) 4
(azul) 8 (verde),2

*DO,I,1,25,1

PER_SUC(I,1)=-((0.1*I-0.1)

PER_SUC(I,0)=SUCTIE(NODE(UBICX
,-(0.1*I-0.1),0),MES_ES)

```

```

*ASK,MES_ES,Indique el mes de estudio,34
*ASK,VARIACION,Variacion de succion fin de
capa activa,2

*ENDDO

/GROPT,LOGX,OFF
/XRANGE,1500,3500
/YRANGE,0,-2.4
/GROPT,DIVX,5
/GROPT,DIVY,8
/AXLAB,Y,PROFUNDIDAD
(m)
/AXLAB,X,SUCCION (kPa)

/COLOR,CURVE,COLOR_GRAF

*VPLOT,PER_SUC(1,0),PER_SUC(1,1)
*ASK,ENTER,PARA
CONTINUAR OPRIMA ENTER,

*END

/COM,*****
*****
*****

*CREATE,CAPA_ACTIVAS

/COM, Presenta la gráfica de la capa activa para
distintos meses en el dominio, siendo y
/COM, la profundidad y x la longitud

ERASE

*DIM,C_ACTIVAS,TABLE,121,1

*DO,J,1,121,1
*DO,I,1,25,1

DIFER=ABS(SUCTIE(NODE(0.1*J-
0.1,-(0.1*I-0.1),0),MES_ES)-
SUCTIE(NODE(0.1*J-0.1,-(0.1*I),0),MES_ES))

*IF,DIFER,LT,VARIACION,THEN

C_ACTIVAS(J,0)=0.1*J-0.1
C_ACTIVAS(J,1)=-
0.1*I

*EXIT
*ENDIF

*ENDDO

*ENDDO

/GROPT,LOGX,OFF
/XRANGE,0,12
/YRANGE,0,-2.4
/GROPT,DIVX,12
/GROPT,DIVY,12

```



```

/AXLAB,Y,PROFUNDIDAD
(m)

/AXLAB,X,LONGITUD (m)
/COLOR,CURVE,4
/TITLE,CAPA ACTIVA MES
%MES_ES% VARIACION %VARIACION%
kPa
*DO,I,1,13,1

*VPLOT,C_ACTIVA(1,0),C_ACTIVA(
1,1)
GRAFICA_ESFUERZOS(I,0)=I+33

*ASK,ENTER,PARA
CONTINUAR OPRIMA ENTER,
GRAFICA_ESFUERZOS(I,1)=ESFEFE(
NODO,I+33)

*ENDDO

*END

/COM,*****
*****
*****
/TITLE,Esfuerzo cada
0.10 m de profundidad para x=%UBICX% m
/GROPT,LOGX,OFF
/XRANGE,34,46
/YRANGE,110,190
/GROPT,DIVX,12
/GROPT,DIVY,16

*CREATE,ESFUERZOS_SUCCION_NODOS

/COM,Se grafican los esfuerzos por succión en el
periodo del mes 34 al 46 para las coordenadas

/COM,ubicx y ubicy, ubicx se mantiene constante
y ubicy va incrementando de 0.10 en 0.10 metros

/COM,(la longitud entre nodo y nodo).

/AXLAB,Y,ESFUERZO POR SUCCION
(x10 kPa)
/AXLAB,X,MES DE
ESTUDIO

ERASE
/COLOR,CURVE,4

*VPLOT,GRAFICA_ESFUERZOS(1,0),
GRAFICA_ESFUERZOS(1,1)
*ASK,ENTER,PARA
CONTINUAR OPRIMA ENTER,

*ASK,UBICX,Distancia en x,1.8

*DO,UBICY,0,-2.4,-0.1
*ENDDO

```

```

*END
*DIM,GRAFICA_EMP,TABLE,121,1

/COM,*****
*****
*****

*CREATE,ESFUERZOS_MISMA_PROFUNDI
DAD

/COM,Se grafican los esfuerzos por succión en el
periodo del mes 34 al 46 para las coordenadas

/COM,ubicx y ubicy, ubicx se mantiene constante
y, ubicx va incrementando de 0.10 en 0.10 metros

/COM,(la longitud entre nodo y nodo).

ERASE
/TITLE,Esfuerzo en
profundidad %UBICY% metros para mes
%PERIODO+33%

*DIM,ESF_MISMA_PROF,ARRAY,121,13
/XRANGE,0,12
/YRANGE,110,190

*ASK,UBICY,Distancia en y (NEGATIVA),0
/GROPT,LOGX,OFF
/GROPT,DIVX,12
/GROPT,DIVY,16

*DO,I,1,121,1

*DO,J,1,13,1
/AXLAB,Y,ESFUERZO POR SUCCION
(x10 kPa)

NODO=NODE(0.1*I-
0.1,UBICY,0)
/AXLAB,X,DISTANCIA EN EJE X (m)
/COLOR,CURVE,4

ESF_MISMA_PROF(I,J)=ESFEFE(NO
DO,J+33)
*VLOT,GRAFICA_EMP(1,0),GRAFIC
A_EMP(1,1)

*ASK,ENTER,PARA
CONTINUAR OPRIMA ENTER,
ERASE

*ENDDO
*ENDDO

```

```

*ENDDO

/COM,El siguiente código es para generar las
gráficas con los esfuerzos para los meses

/COM,34,40 y 46. Para ahorrar espacio y
colocarlas en los resultados de la tesis

*DIM,GRAFICA_EMP1,TABLE,121,1
*DIM,GRAFICA_EMP2,TABLE,121,1
*DIM,GRAFICA_EMP3,TABLE,121,1

*DO,I,1,121,1

GRAFICA_EMP1(I,0)=0.1*I-0.1
GRAFICA_EMP1(I,1)=ESF_MISMA_P
ROF(I,1)

*ENDDO

*DO,I,1,121,1

GRAFICA_EMP2(I,0)=0.1*I-0.1
GRAFICA_EMP2(I,1)=ESF_MISMA_P
ROF(I,7)

*ENDDO

*DO,I,1,121,1

GRAFICA_EMP3(I,0)=0.1*I-0.1
GRAFICA_EMP3(I,1)=ESF_MISMA_P
ROF(I,13)

*ENDDO

/TITLE,Esfuerzo en
profundidad %UBICY% metros para mes 34, 40 y
46

/XRANGE,0,12
/YRANGE,110,190
/GROPT,LOGX,OFF
/GROPT,DIVX,12
/GROPT,DIVY,16

/AXLAB,Y,ESFUERZO POR SUCCION
(x10 kPa)

/AXLAB,X,DISTANCIA EN EJE X (m)

/COLOR,CURVE,2

*VPLOT,GRAFICA_EMP1(1,0),GRAFI
CA_EMP1(1,1)

/COLOR,CURVE,4

*VPLOT,GRAFICA_EMP2(1,0),GRAFI
CA_EMP2(1,1)

/COLOR,CURVE,8

*VPLOT,GRAFICA_EMP3(1,0),GRAFI
CA_EMP3(1,1)

*ASK,ENTER,PARA
CONTINUAR OPRIMA ENTER,

ERASE

*END

```

/COM,*****

*CREATE,PROPIEDADES
 *USE,GRAFICA_SUCSAT
 *USE,GRAFICA_SUCTHETA
 *USE,CURVA_PERMEAB
 *USE,CURVA_DIFUSION
 *USE,SUC_PROF
 *USE,LLUVIAS

*END

*CREATE,MODELO_FLUJO
 *USE,GEOMETRIA
 *USE,MALLADO

*END

/COM,*****

*CREATE,PRECONSOL
 *USE,CASOPREC
 *USE,ANALISIS
 *USE,VISU
 *USE,PREPAN
/COM,*DEMO_HISTERESIS
 *USE,PREVIO_CHI
 *USE,GEN_CHI
 *USE,CONTROL_CHI
 *USE,ESF_EFEC

*USE,VECTOUT

/COM,*USE,PERFIL_SUCCIONES

/COM,*USE,CAPA_ACTIVIA

/COM,*USE,ESFUERZOS_SUCCION_
NODOS

/COM,*USE,ESFUERZOS_MISMA_PR
OFUNDIDAD

*END

/COM,*****

*CREATE,CASOLOS
RESUME,CAS1

*USE,CASOLOS

*USE,ANALISIS

*USE,VISU

*USE,PREPAN

/COM,*DEMO_HISTERESIS

*USE,PREVIO_CHI

*USE,GEN_CHI

*USE,CONTROL_CHI

*USE,ESF_EFEC

*USE,VECTOUT

/COM,*USE,PERFIL_SUCCIONES

/COM,*USE,CAPA_ACTIVIA

/COM,*USE,ESFUERZOS_SUCCION_
NODOS

/COM,*USE,ESFUERZOS_MISMA_PR
OFUNDIDAD

*END

*USE,PROPIEDADES

*USE,MODELO_FLUJO

/COM,*USE,PRECONSOL

/COM,*USE,CASOLOSA

Dirección General de Bibliotecas de la UAQ