



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

**EVALUACIÓN DE FILTRACIONES EN PRESAS. MODELACIÓN NUMÉRICA DE FLUJO EN
MEDIOS POROSOS SATURADOS Y NO SATURADOS.**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

MIGUEL ÁNGEL TORO FLORES

**PROFESOR GUÍA:
CARLOS ESPINOZA CONTRERAS**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
FÉLIX PÉREZ SOTO
JULIO CORNEJO MORALES**

**SANTIAGO DE CHILE
JULIO 2009**

RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL
POR: MIGUEL TORO F.
FECHA: 13/07/2009
PROF. GUÍA: Sr. CARLOS ESPINOZA C.

“EVALUACIÓN DE FILTRACIONES EN PRESAS. MODELACIÓN NUMÉRICA DE FLUJO EN MEDIOS POROSOS SATURADOS Y NO SATURADOS”

Normalmente, el estudio de filtraciones en presas ha sido llevado a cabo utilizando soluciones analíticas que consideran geometría y propiedades hidrogeológicas simples, así como programas de modelación numérica que sólo consideran la zona saturada del flujo. Sin embargo, recientemente se han desarrollado nuevas herramientas computacionales que permiten simular tanto la zona saturada como no saturada del flujo lo que hace más completo, y por ende más confiable, este tipo de análisis.

El principal objetivo de este trabajo consiste en evaluar filtraciones en presas, comparando los esquemas tradicionales de solución con las nuevas metodologías numéricas que permiten considerar el flujo en la zona saturada y no saturada.

Se utilizan 3 modelos numéricos en el desarrollo de este trabajo: MODFLOW, SEEP/W y HYDRUS-2D. En cuanto a las consideraciones de flujo, MODFLOW considera sólo la zona saturada y tanto SEEP/W como HYDRUS-2D consideran la zona saturada y no saturada. Sin embargo, para estudiar el efecto de incorporar la zona no saturada en el análisis sólo se ha utilizado el programa SEEP/W, debido a que la versión utilizada de HYDRUS-2D no permite la generación de mallas generales, por lo que no pudo ser aplicado en todos los casos de estudio.

Se estudiaron dos casos simples de flujo en presas: el flujo bajo una presa impermeable y el flujo a través de una presa de tierra con dren al pie. El análisis se centra en el cálculo de caudales pasantes, donde se varían la finura de las mallas utilizadas, geometrías consideradas y las propiedades hidrogeológicas de los suelos utilizados. Además, se estudió un caso real de flujo a través de los muros de un tranque de relaves, en el cual se analiza el efecto en los caudales de incluir la zona no saturada en el análisis y de las propiedades hidrogeológicas no saturadas de los suelos utilizados.

En general, los caudales obtenidos con MODFLOW y SEEP/W resultan ser bastante similares, salvo para algunos casos particulares donde pueden presentarse diferencias sustanciales, debido a que MODFLOW no es capaz de incorporar parte de la física del problema. Por esto, como conclusión final, se recomienda la utilización de SEEP/W por sobre MODFLOW para la evaluación de filtraciones en presas, aunque debe notarse que como SEEP/W simula una física más compleja puede ser más difícil interpretar sus resultados, en cuyo caso una revisión previa del problema con MODFLOW puede ser útil.

Por último, con el fin de validar los resultados con datos reales, se recomienda la construcción de un modelo físico. Se recomienda también la utilización de nuevos modelos, tales como la versión HYDRUS-2D Standard, la que permite la creación de mallas generales y MODFLOW-SURFACT, un nuevo paquete de MODFLOW que permite simular la zona no saturada del flujo, con lo cual se lograría un trabajo más completo.

Índice

1	INTRODUCCIÓN	4
1.1	MOTIVACIÓN.	4
1.2	OBJETIVOS.	5
1.2.1	OBJETIVOS GENERALES.	5
1.2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.	5
1.3	CONTENIDO DEL INFORME.	5
2	ANTECEDENTES GENERALES	7
2.1	ECUACIONES DE FLUJO EN MEDIOS PERMEABLES SATURADOS.	7
2.2	LÍNEAS DE FLUJO Y EQUIPOTENCIALES.	8
2.2.1	LÍNEAS DE FLUJO.	8
2.2.2	LÍNEAS EQUIPOTENCIALES.	9
2.3	METODOLOGÍAS ANALÍTICAS DE SOLUCIÓN DE PROBLEMAS DE FLUJO EN PRESAS.	10
2.4	SOLUCIONES ANALÍTICAS PARA PROBLEMAS DE FLUJO EN PRESAS.	10
2.4.1	FLUJO BAJO UNA PRESA IMPERMEABLE.	10
2.4.2	FLUJO A TRAVÉS DE UNA PRESA DE TIERRA CON DREN HORIZONTAL AL PIE.	12
2.5	ECUACIONES DE FLUJO EN MEDIOS PERMEABLES NO SATURADOS.	13
2.5.1	CURVAS DE HUMEDAD CARACTERÍSTICA Y FUNCIONES DE CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA DE LOS SUELOS.	14
3	PROGRAMAS UTILIZADOS	16
3.1	MODFLOW.	16
3.1.1	DESCRIPCIÓN GENERAL.	16
3.1.2	GENERACIÓN DE UN MODELO CONCEPTUAL.	16
3.1.3	EJECUCIÓN DEL MODELO GENERADO Y VISUALIZACIÓN DE RESULTADOS.	21
3.2	SEEP/W	23
3.2.1	DESCRIPCIÓN GENERAL.	23
3.2.2	GENERACIÓN DE UN MODELO CONCEPTUAL.	23
3.2.3	EJECUCIÓN DEL MODELO Y VISUALIZACIÓN DE RESULTADOS.	29
3.3	HYDRUS-2D.	31
3.3.1	DESCRIPCIÓN GENERAL.	31
3.3.2	GENERACIÓN DE UN MODELO CONCEPTUAL.	31
3.3.3	EJECUCIÓN DEL MODELO Y VISUALIZACIÓN DE RESULTADOS.	33
4	ANÁLISIS DE CASOS SIMPLES	35
4.1	INTRODUCCIÓN.	35
4.2	FLUJO BAJO UNA PRESA IMPERMEABLE.	35
4.2.1	INTRODUCCIÓN.	35
4.2.2	ANTECEDENTES GENERALES Y GEOMETRÍA.	35
4.2.3	EFEECTO DEL TAMAÑO DE LA GRILLA EN EL CAUDAL PASANTE.	37
4.2.4	VARIACIÓN DEL ANCHO (L) Y PROFUNDIDAD (T) DEL ACUÍFERO.	40
4.3	FLUJO A TRAVÉS DE UNA PRESA CON DREN HORIZONTAL AL PIE.	44
4.3.1	INTRODUCCIÓN.	44

4.3.2	ANTECEDENTES GENERALES Y GEOMETRÍA.	44
4.3.3	SOLUCIÓN TEÓRICA.	45
4.3.4	SOLUCIÓN UTILIZANDO MODFLOW.	46
4.3.5	SOLUCIÓN UTILIZANDO SEEP/W.	49
4.3.6	ANÁLISIS PARA DISTINTOS TIPOS DE SUELO.	53
4.3.7	ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DE LA LONGITUD DEL DREN.	57
5	APLICACIÓN A UN CASO REAL	60
5.1	INTRODUCCIÓN.	60
5.2	ANTECEDENTES GENERALES.	60
5.3	DATOS UTILIZADOS.	61
5.3.1	DISTANCIA A LAGUNA AGUAS CLARAS Y COTA DEL PELO DE AGUA.	61
5.3.2	DATOS GEOMÉTRICOS DE INTERÉS.	61
5.3.3	CONDUCTIVIDADES HIDRÁULICAS.	62
5.4	MODELO CONCEPTUAL.	63
5.5	CONSTRUCCIÓN DEL MODELO.	63
5.5.1	INTRODUCCIÓN.	63
5.5.2	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD A LAS VARIABLES DE DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.	64
5.5.3	DEFINICIÓN DE LAS PROPIEDADES HIDROGEOLÓGICAS DE LOS SUELOS.	65
5.6	SOLUCIÓN DEL PROBLEMA DE FLUJO.	67
5.6.1	PERFILES AA, CC, DD Y EE.	67
5.6.2	PERFIL BB.	71
5.7	CAUDALES DE FILTRACIÓN.	72
5.7.1	CASO BASE.	72
5.7.2	VARIACIÓN DE LAS PROPIEDADES HIDROGEOLÓGICAS DEL MATERIAL DEL MURO.	72
5.7.3	VARIACIÓN DE LAS PROPIEDADES HIDROGEOLÓGICAS DEL MATERIAL DE RELAVE.	74
5.7.4	COMPARACIÓN DE LOS CAUDALES DE FILTRACIÓN PARA EL PEOR CASO.	75
6	CONCLUSIONES	76
6.1	RESULTADOS GENERALES.	76
6.2	FORTALEZAS Y DEBILIDADES DE LOS PROGRAMAS UTILIZADOS.	77
6.3	RECOMENDACIONES.	78

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEXOS

1 Introducción

1.1 Motivación.

Nuestro país posee una larga experiencia en la construcción de presas, las que han sido utilizadas en la construcción de embalses tanto de riego como para la generación hidroeléctrica y en tranques de relave.

La evaluación de filtraciones a través de la presa, así como de la zona subyacente a ella, ha sido estudiada de diversas maneras y con distintos enfoques según las consecuencias que ellas pueden producir. Entre los efectos no deseados de las filtraciones están los problemas en la estabilidad de la presa, pérdida de agua en el embalse o descarga de sustancias contaminantes.

Normalmente, el estudio de estas filtraciones ha sido llevado a cabo utilizando soluciones analíticas que consideran geometría y propiedades hidrogeológicas simples, así como programas de modelación numérica que sólo consideran la zona saturada del flujo. Sin embargo, recientemente se han desarrollado nuevas herramientas computacionales que permiten simular tanto la zona saturada como no saturada del flujo lo que hace más completo, y por ende más confiable, este tipo de análisis.

Además de las diferencias en las consideraciones de flujo (saturado y no saturado), estas herramientas han sido desarrolladas con distintos fines o campos de aplicación, como son la hidrogeología, ingeniería agronómica y geotecnia. En cada una de estas ramas de la ingeniería se han desarrollado herramientas con objetivos específicos de cada área, las que han ido evolucionando y en la actualidad pueden ser usadas indistintamente en uno u otro campo. Así, tanto la aparición de estas nuevas herramientas como sus diferencias, constituyen la motivación de este trabajo, el cual se orientará a analizar dichas herramientas y compararlas entre sí y con las metodologías tradicionales en sus respuestas frente a escenarios ya estudiados, como por ejemplo el caso de flujo a través de muros homogéneos, y escenarios donde la inclusión de estas nuevas técnicas sea interesante, debido por ejemplo a que representan de mejor manera aspectos físicos del problema. Como resultado principal de este trabajo, se espera determinar fortalezas y debilidades de las herramientas analizadas y así poder otorgar elementos de juicio para poder elegir una sobre la otra, según sea el caso de aplicación.

Los programas a utilizar serán MODFLOW, HYDRUS-2D y SEEP/W, herramientas desarrolladas en los campos de hidrogeología, agronomía y geotecnia, respectivamente. En cuanto a las consideraciones de flujo, MODFLOW considera sólo la zona saturada y tanto HYDRUS-2D como SEEP/W consideran la zona saturada y la no saturada.

1.2 Objetivos.

1.2.1 Objetivos generales.

El objetivo general de este trabajo consiste en evaluar filtraciones en presas, comparando los esquemas tradicionales de solución con las nuevas metodologías numéricas que permiten considerar el flujo en la zona saturada y no saturada, así como también permiten incorporar aspectos reales como heterogeneidad de los sistemas de escurrimiento subterráneo.

1.2.2 Objetivos específicos.

Los principales objetivos específicos que se plantean son:

1. Conocer las bases conceptuales de las metodologías tradicionales de solución de problemas de flujo a través de presas.
2. Conocer los programas computacionales disponibles que permiten resolver problemas de flujo a través de presas. Analizar sus bases de cálculo para determinar ventajas y desventajas de los mismos.
3. Analizar las diferencias entre los resultados obtenidos mediante las soluciones tradicionales y los nuevos enfoques de análisis, aplicándolos a casos simples disponibles en la literatura.
4. Utilizar las herramientas de simulación en un caso representativo real seleccionado para comparación.

1.3 Contenido del informe.

En el Capítulo 2 se entregan antecedentes sobre las bases conceptuales del estudio del flujo en medios porosos saturados y no saturados, junto con la descripción de metodologías analíticas de solución de problemas de flujo en presas.

En el Capítulo 3 se describen los programas que se utilizan en este estudio, MODFLOW, SEEP/W y HYDRUS-2D respectivamente. Se entrega información sobre sus bases de cálculo y el desarrollo de un modelo conceptual en cada programa orientado a los propósitos de este estudio.

En el Capítulo 4 se revisan 2 problemas clásicos de flujo en presas, éstos son, el flujo bajo una presa impermeable y el flujo a través de una presa de tierra con dren horizontal al pie.

El problema de flujo bajo una presa impermeable se revisa utilizando un esquema analítico y los programas MODFLOW, SEEP/W y HYDRUS-2D.

En el problema de flujo a través de una presa de tierra con dren horizontal al pie se estudian los efectos de incluir la zona no saturada en el análisis mediante el uso de SEEP/W. Se comparan los resultados de SEEP/W con los obtenidos con MODFLOW y un esquema analítico, los cuales consideran sólo el flujo en la zona saturada

En el Capítulo 5 se estudia un caso real de filtraciones a través de los muros de un tranque de relaves. Se utilizan los programas MODFLOW y SEEP/W para modelar el problema de flujo y se comparan los resultados obtenidos.

Finalmente en el Capítulo 6 se exponen una serie de comentarios, conclusiones y recomendaciones referentes a los resultados obtenidos en este trabajo.

2 Antecedentes generales

2.1 Ecuaciones de flujo en medios permeables saturados.

Las ecuaciones de flujo en medios permeables se establecen a partir de 2 principios fundamentales: la ley de conservación de la masa y la ley de Darcy. La conservación de la masa establece que para un volumen de control representativo al interior de la masa de fluido, la diferencia entre el flujo másico entrante y saliente es igual a la variación de la masa de fluido almacenada dentro de éste. Por su parte, la ley de Darcy proporciona una relación funcional entre la velocidad aparente del flujo y la carga hidráulica H, dada por:

$$v_i = -K_i \cdot \frac{\partial H}{\partial i}, \text{ con } i = x, y, z. \quad (2.1)$$

Donde:

v_i : velocidad aparente del flujo en la dirección i (L/T).

K_i : conductividad hidráulica en la dirección i, propiedad que depende del fluido y del medio (L/T).

Si consideramos que el medio está saturado, la variación de masa en el volumen de control se puede expresar en términos del almacenamiento específico del acuífero S_s , el cual representa el volumen de agua almacenada o liberada por unidad de volumen de acuífero debido a un cambio unitario en el nivel de agua en el acuífero:

$$S_s = \frac{\Delta V_w}{V \cdot \Delta h} \quad (2.2)$$

Donde:

ΔV_w : volumen de agua almacenado o liberado por el acuífero.

V : unidad de volumen de acuífero.

Δh : cambio unitario en el nivel de agua del acuífero.

A partir de lo anterior, para un fluido incompresible, en un medio heterogéneo y anisotrópico, donde los ejes x,y, z están alineados con las direcciones principales de anisotropía se obtiene la ecuación de flujo transiente en medios porosos saturados.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \cdot \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \cdot \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \cdot \frac{\partial H}{\partial z} \right) = S_s \cdot \frac{\partial H}{\partial t} \quad (2.3)$$

donde t corresponde al tiempo.

2.2 Líneas de flujo y equipotenciales.

2.2.1 Líneas de flujo.

Considérese un escurrimiento plano, es decir, sólo en 2 direcciones, sean éstas x e y . Así, se cumplirá, $v_z = 0$, donde v es la velocidad aparente del flujo. Si además se considera una condición de régimen permanente, por la ecuación de continuidad se tendrá:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} = \frac{\partial(-v_y)}{\partial y} \quad (2.4)$$

Esto permite considerar que las componentes de la velocidad en las direcciones x e y provienen de una misma función ψ , y quedan dadas por:

$$v_x = \frac{\partial \psi}{\partial y}; \quad -v_y = \frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (2.5)$$

Por definición, se consideran como líneas de flujo aquellas líneas que en todos sus puntos son tangentes al vector velocidad, por lo cual, representan las diferentes trayectorias de las partículas del fluido. Teniendo en cuenta la condición anterior, la ecuación diferencial para todas las líneas de flujo es:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{v_y}{v_x} \quad (2.6)$$

Y, por lo tanto,

$$-v_y \cdot dx + v_x \cdot dy = 0 \quad (2.7)$$

Reemplazando los valores v_x y v_y de (2.5), sigue que:

$$\frac{\partial \psi}{\partial x} \cdot dx + \frac{\partial \psi}{\partial y} \cdot dy = 0 \quad (2.8)$$

Pero el primer miembro de esta ecuación no es otro que el diferencial total de la función $\psi(x,y)$. Así, las curvas $\psi(x,y) = \text{cte.}$ son en todos sus puntos tangentes al vector velocidad y, por lo tanto, definen cada línea de flujo. La función ψ recibe el nombre de “función de flujo”.

2.2.2 Líneas equipotenciales.

Para un escurrimiento plano, como el considerado anteriormente, la ecuación para las líneas de igual carga hidráulica o equipotenciales será $H(x,y) = Cte.$

Para escurrimientos laminares, como los que aquí se estudian y un medio isotrópico, existirá una función $\phi(x,y)$, la cual desempeña el papel de potencial de velocidades. Es decir, se cumple que:

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = v_x; \quad \frac{\partial \phi}{\partial y} = v_y \quad (2.9)$$

Luego, de acuerdo a la ley de Darcy, el potencial de velocidades estará dado por:

$$\phi(x,y) = -K \cdot H + Cte. \quad (2.10)$$

Así, según la expresión (2.10), toda línea equipotencial puede ser representada por un valor constante de la función ϕ , es decir, $\phi(x,y) = Cte.$

Para $\phi(x,y) = Cte.$, se tiene:

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} \cdot dx + \frac{\partial \phi}{\partial y} \cdot dy = 0 \quad (2.11)$$

Reemplazando las expresiones de (2.9) en (2.11), se obtiene:

$$v_x \cdot dx + v_y \cdot dy = 0 \quad (2.12)$$

y, por lo tanto, la ecuación diferencial para las líneas equipotenciales es:

$$\frac{dy}{dx} = -\frac{v_x}{v_y} \quad (2.13)$$

Por lo tanto, de acuerdo a las expresiones (2.6) y (2.13), se obtiene que las líneas equipotenciales y las líneas de flujo son ortogonales. La representación gráfica de una familia de líneas de flujo y sus correspondientes líneas equipotenciales es conocida como una red de flujo.

2.3 Metodologías analíticas de solución de problemas de flujo en presas.

En general, salvo casos muy particulares, las metodologías analíticas de solución de problemas de flujo de aguas subterráneas sólo consideran medios homogéneos, isotrópicos y condiciones de régimen permanente, debido a la complejidad matemática que implica cualquier otro tipo de supuesto.

Así, bajo las condiciones señaladas, considérese un escurrimiento plano, como el descrito en las secciones anteriores, y la función $f(\bar{Z})$ de la variable compleja $\bar{Z} = x + i \cdot y$, definida por la relación:

$$f(\bar{Z}) = \phi(x, y) + i \cdot \psi(x, y) \quad (2.14)$$

Se puede demostrar que toda función analítica $f(\bar{Z})$ corresponde a un escurrimiento plano, cinemáticamente posible, cuya parte real representa la ecuación de los niveles piezométricos o potencial de velocidades y cuya parte imaginaria representa la ecuación de las trayectorias (Baeza, 1973).

Así, para un problema dado, las características del flujo pueden ser obtenidas una vez conocida la función $f(\bar{Z})$. Existen diversas técnicas para encontrar la transformación $f(\bar{Z})$, solución de cada problema, las cuales son descritas en Harr (1962) y corresponden a las utilizadas para obtener las soluciones analíticas que se describen en la siguiente sección.

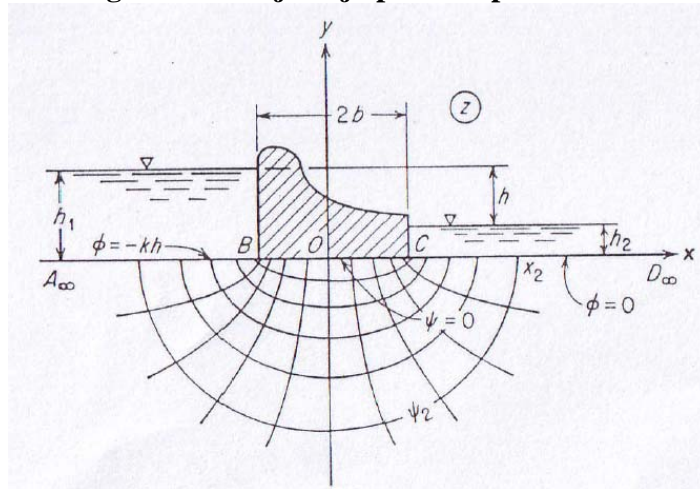
2.4 Soluciones analíticas para problemas de flujo en presas.

Se presentan en este acápite, las soluciones analíticas de 2 problemas de flujo en presas, los cuales fueron considerados interesantes para el desarrollo de este trabajo. Ambos casos consideran condiciones de régimen permanente.

2.4.1 Flujo bajo una presa impermeable.

Considérese el flujo bajo una presa impermeable de espesor $2 \cdot b$, fundada sobre un relleno de permeabilidad k con espesor y ancho indefinido. El nivel del embalse aguas arriba de la presa es h_1 , el nivel aguas abajo, h_2 y la diferencia de niveles se denota como $h = h_1 - h_2$, según muestra la Figura 2.1.

Figura 2.1. Flujo bajo presa impermeable.



Fuente: Harr (1962).

La solución de este problema, en términos de la ecuación para las líneas equipotenciales queda:

$$\frac{x^2}{b^2 \cdot \cos^2(A \cdot \phi)} - \frac{y^2}{b^2 \cdot \sin^2(A \cdot \phi)} = 1, \quad (2.15)$$

con:

$$\phi \in [-k \cdot h, 0],$$

$$A = \frac{\pi}{k \cdot h}.$$

Así, de acuerdo a la expresión 2.15, las líneas equipotenciales corresponden a hipérbolas homofocales de focos $\pm b$.

La ecuación para las líneas de flujo es:

$$\frac{x^2}{b^2 \cdot \cosh^2(A \cdot \psi)} + \frac{y^2}{b^2 \cdot \sinh^2(A \cdot \psi)} = 1 \quad (2.16)$$

con:

$$\psi \in [0, \infty]$$

De acuerdo a la expresión 2.16, se tiene que las líneas de flujo corresponden a elipses homofocales de focos $\pm b$.

Si se considera la región limitada por las líneas de flujo $\psi = 0$ y ψ_2 (Figura 2.1), el caudal total de filtración viene dado por la siguiente expresión:

$$q = \frac{k \cdot h}{\pi} \cdot a \operatorname{senh}\left(-\frac{y}{b}\right) \quad (2.17)$$

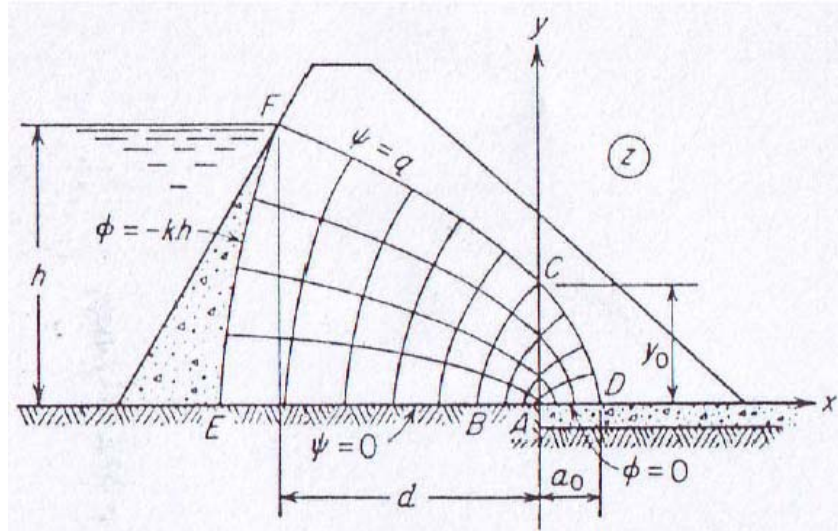
donde:

- q : Caudal por unidad de ancho de la presa. (L^2/T)
y : Corresponde a la intersección entre el eje "y", y la línea de flujo ψ_2 . (L)

2.4.2 Flujo a través de una presa de tierra con dren horizontal al pie.

Considérese el problema de flujo a través de una presa de tierra de permeabilidad k, fundada en una base impermeable con un dren horizontal al pie y cara parabólica aguas arriba, según muestra la Figura 2.2.

Figura 2.2. Flujo a través de una presa de tierra con dren horizontal al pie.



Fuente: Harr (1962).

En este caso las líneas equipotenciales corresponden a parábolas homofocales con foco en el origen, dadas por la siguiente ecuación:

$$y^2 = 2 \cdot a \cdot x + a^2 \quad (2.18)$$

donde:

$$a = \frac{k \cdot \phi^2}{q}$$

q: Caudal por unidad de ancho de la presa. (L^2/T)

$$\phi \in [-k \cdot h, 0]$$

A su vez, las líneas de flujo también corresponden a parábolas homofocales con foco en el origen y están determinadas por la siguiente ecuación:

$$y^2 = -2 \cdot b \cdot x + b^2 \quad (2.19)$$

donde:

$$b = \frac{k \cdot \psi^2}{q}$$

$$\psi \in [0, q]$$

El caudal filtrante corresponde a:

$$q = k \cdot \left(\sqrt{d^2 + h^2} - d \right) \quad (2.20)$$

donde:

q : Caudal por unidad de ancho de la presa. (L²/T)

d : Distancia entre la proyección del punto F en el eje “x” y el comienzo del dren (ver Figura 2.2). (L)

2.5 Ecuaciones de flujo en medios permeables no saturados.

Al igual que para medios porosos saturados, las ecuaciones de flujo en medios no saturados se deducen en base a la ley de conservación de la masa. Para este caso, la masa de fluido almacenada en el volumen de control depende del valor de la humedad, la cual puede ser expresada en términos de la fracción de porosidad del medio que ocupa el fluido, donde S_w es el grado de saturación del medio, que se define como:

$$S_w = \frac{\theta}{n} \quad (2.21)$$

con:

θ : Humedad volumétrica del medio, corresponde a la razón entre el volumen de fluido almacenado y el volumen total (L³/L³).

n : Porosidad del medio (L³/L³).

Considerando lo anterior, se tendrá que la variación de la masa almacenada en el volumen de control corresponde a la suma de los efectos producidos por las variaciones del grado de saturación, la porosidad del medio y la densidad del fluido, aunque en general la variación del grado de saturación será mucho mayor que los otros dos términos, por lo que estos últimos se pueden despreciar.

Por otra parte, en el estudio del flujo en medios porosos no saturados, la relación funcional entre la velocidad aparente y la carga hidráulica está dada por la ley de flujo de Buckingham-Darcy

(2.22), la cual incorpora la dependencia funcional entre la conductividad hidráulica y la presión interna del suelo ($h=p/\gamma$).

$$v_i = -K_i(h) \cdot \frac{\partial H}{\partial t} \quad (2.22)$$

Con esto, considerando la densidad constante dentro del volumen de control, se obtiene la ecuación para el flujo en un medio poroso no saturado (2.23), conocida como la Ecuación de Richards.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x(h) \cdot \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y(h) \cdot \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z(h) \cdot \frac{\partial H}{\partial z} \right) = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (2.23)$$

La ecuación (2.23) también puede ser escrita sólo en función de h y θ . Para esto, basta utilizar la relación $H = h + z$. Así, la ecuación (2.23) queda:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x(h) \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y(h) \cdot \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z(h) \cdot \frac{\partial h}{\partial z} + K_z(h) \right) = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (2.24)$$

En este caso, se ha presentado la ecuación de Richards en la llamada forma mixta, debido a que existen dos variables de estado que describen el problema, θ y h . La existencia de una relación funcional entre las dos variables es necesaria para resolver la ecuación. La relación entre θ y h es conocida como curva de humedad característica.

El estudio del flujo en medios porosos no saturados consiste básicamente en resolver la ecuación de Richards. La complejidad matemática de esta ecuación ha determinado que haya sido estudiada a través de métodos numéricos. Las soluciones numéricas obtenidas a partir de la representación mixta son las que han mostrado un mejor comportamiento, por lo que se ha sido adoptada en la mayoría de los modelos de simulación desarrollados en los últimos años (Herrera, 2000).

2.5.1 Curvas de humedad característica y funciones de conductividad hidráulica de los suelos.

La resolución de la ecuación de Richards en su forma mixta (2.24) requiere necesariamente conocer la forma de las curvas que relacionan la conductividad hidráulica y humedad con la presión de poros existente en el suelo, aunque en casos de régimen permanente sólo es necesario conocer las curvas de conductividad hidráulica, pues la variable θ desaparece de la ecuación. Dado el alto grado de complejidad de estas curvas y la imposibilidad de determinarlas completamente a través de medios experimentales (Anabalón, 1998), se recurre a métodos analíticos que permiten combinar los resultados de experimentación con modelos de comportamiento del suelo, lo que da origen a relaciones funcionales entre los diversos parámetros. Entre éstas, se cuentan los modelos de: Brooks and Corey, Van Genuchten, y Fredlund and Xing.

En este trabajo se utiliza el modelo de Van Genuchten (1980) para la caracterización de las propiedades hidráulicas del suelo no saturado.

Las expresiones de Van Genuchten para $\theta(h)$ y $k(h)$ están dadas por:

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha \cdot h|^n]^m} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (2.25)$$

$$k(h) = k_s \cdot S_e^l \cdot [1 - (1 - S_e^{l/m})^m]^2 \quad (2.26)$$

Donde α , m y n son parámetros de ajuste de las curvas con $m = 1 - 1/n$, k_s es la conductividad hidráulica de saturación, l es la conectividad de poros y S_e es el contenido volumétrico de agua normalizado, el que está dado por la ecuación (2.27).

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (2.27)$$

Donde:

- θ : Contenido de humedad.
- θ_r : Contenido de humedad residual.
- θ_s : Contenido de humedad de saturación.

Las curvas $\theta(h)$ y $k(h)$ son también usualmente escritas en función de la succión (ψ) o presión de poros negativa del suelo.

3 Programas utilizados

3.1 MODFLOW.

3.1.1 Descripción general.

MODFLOW es un programa capaz de modelar el flujo en medios porosos saturados para geometrías bidimensionales y tridimensionales, en régimen transiente y estacionario. El software fue desarrollado por el U.S Geological Survey en el principio de la década de los ochenta y ha continuado evolucionando hasta el día de hoy. En particular en este trabajo se utiliza la versión MODFLOW-2000.

MODFLOW ha sido diseñado para simular sistemas de acuíferos en los cuales se cumplen condiciones de flujo saturado, la ley de Darcy es válida, la densidad del agua subterránea es constante y las direcciones principales de anisotropía coinciden con los ejes de la grilla.

La ecuación diferencial que rige el flujo en medios porosos saturados (2.3) se resuelve numéricamente mediante un esquema de diferencias finitas centradas en el bloque. El dominio se divide en bloques rectangulares, llamados comúnmente celdas. El esquema de bloques centrados significa que los nodos de la grilla se ubican al centro de cada celda.

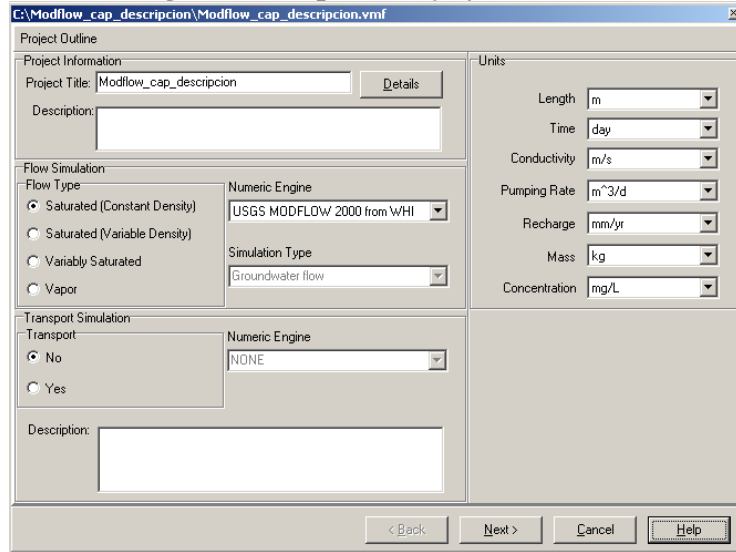
Para la implementación de los modelos estudiados en este trabajo se utiliza el programa Visual Modflow en su versión 4.2. Visual Modflow fue desarrollado por Waterloo Hydrogeologic Software en 1995, en base a MODFLOW, con el propósito de facilitar la implementación y el análisis de los resultados del modelo mediante un ambiente gráfico que permite el ingreso, modificación e intercambio de información con archivos externos de forma rápida, sencilla y amistosa (Espinoza, 2006).

3.1.2 Generación de un modelo conceptual.

3.1.2.1 Unidades y tipo de análisis.

Para crear un nuevo modelo en Visual Modflow, en el menú *File*, se debe seleccionar la opción *New*. Aparecerá la ventana mostrada en la Figura 3.1. En esta pantalla se deben seleccionar las unidades de trabajo para longitud, tiempo, tasas de extracción o inyección, recarga, masa y concentración. También se debe especificar el tipo de flujo y si se desea realizar una modelación de transporte. Respecto a los tipos de flujo, debe notarse que sólo el flujo saturado con densidad constante es resuelto por MODFLOW-2000. En este trabajo no se realizan modelaciones de otros tipos de flujo, los cuales son resueltos por otros programas. Tampoco se realizan modelaciones de transporte.

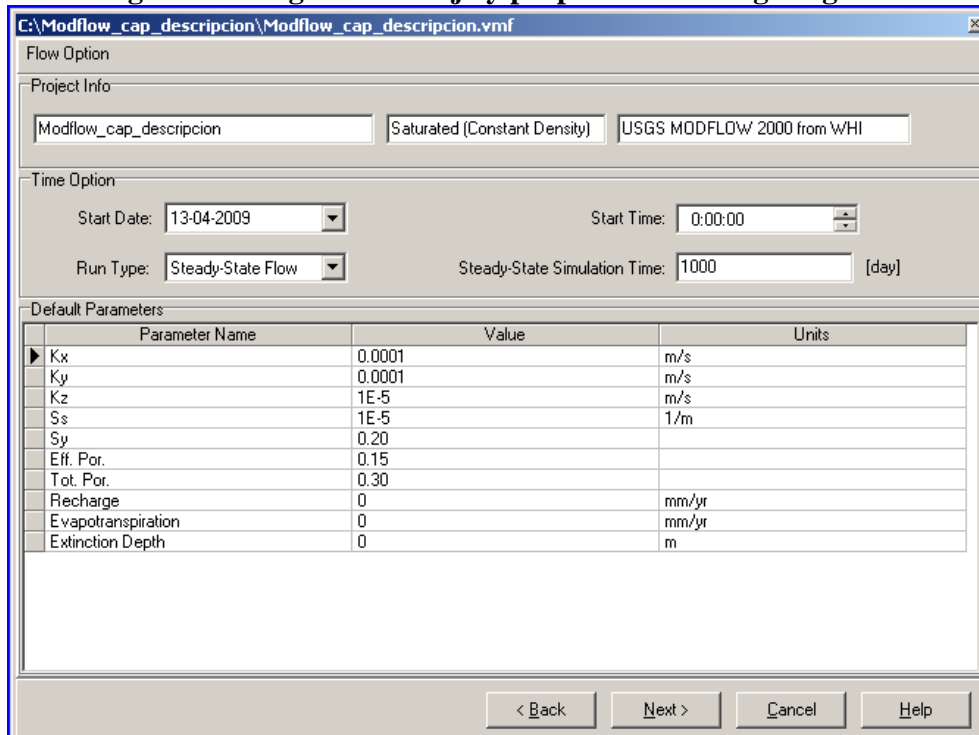
Figura 3.1. Tipo de flujo y unidades.



3.1.2.2 Régimen de flujo y propiedades hidrogeológicas.

Una vez seleccionada la opción *Next* en la ventana de la Figura 3.1, aparece la pantalla mostrada en la Figura 3.2.

Figura 3.2. Régimen de flujo y propiedades hidrogeológicas.



En esta pantalla, se debe seleccionar si se realizará un análisis en régimen transiente o estacionario y se ingresan las propiedades hidrogeológicas del acuífero como conductividades y coeficientes de almacenamiento

3.1.2.3 Geometría del modelo.

Una vez que se oprime *Next* en la pantalla anterior (Figura 3.2) se despliega la ventana mostrada en la Figura 3.3, en la cual se definen las características geométricas del modelo. Se definen aquí tanto las dimensiones del modelo como el tamaño de la discretización. Para definir las dimensiones del modelo se deben ingresar los valores mínimos y máximos de X, Y y Z. La discretización de la malla queda determinada al ingresar el número de columnas, filas y “layers”, los que dividen equiespaciadamente los ejes X, Y y Z respectivamente, con lo cual quedan definidos Δx , Δy y Δz .

Figura 3.3. Información geométrica.

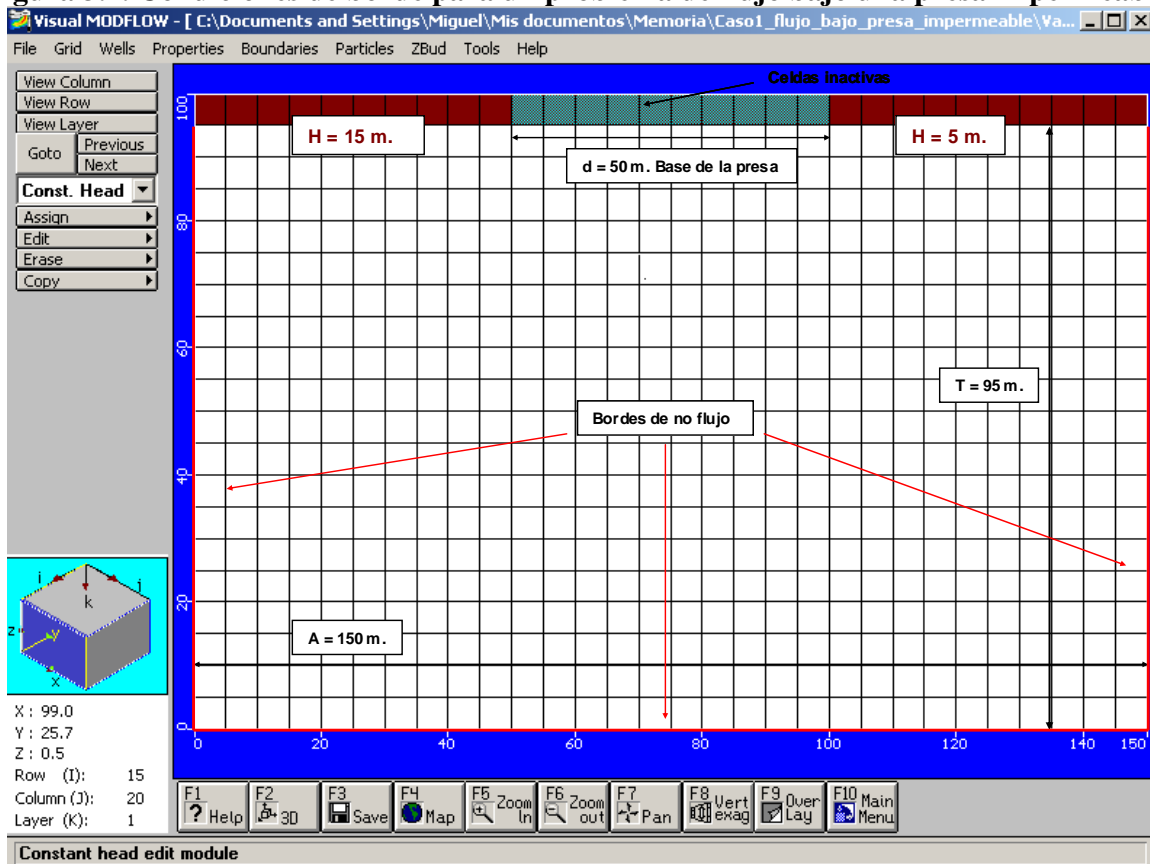
The screenshot shows a software window titled "C:\Modflow_cap_descripcion\bla\bla.vmf". The window is divided into several sections. At the top, there is a "Model Domain" section. Below it is a "Background Map" section with a checkbox labeled "Import a site map" and a "Browse" button. The main section is "Grid", which contains several input fields: "Columns(j)" with the value 20, "Rows(i)" with the value 20, "Layers(k)" with the value 1, "Xmin" with the value 0, "Xmax" with the value 1000, "Ymin" with the value 0, "Ymax" with the value 1000, "Zmin" with the value 0, and "Zmax" with the value 20. To the right of these fields is a 3D diagram of a rectangular prism with axes labeled x, y, z and grid indices labeled i, j, k. At the bottom of the window are four buttons: "< Back", "Finish", "Cancel", and "Help".

3.1.2.4 Condiciones iniciales y de borde.

Al presionar *Next* en la pantalla de la Figura 3.3 se ingresa al módulo *INPUT* del programa. En este módulo se ingresan las variables de entrada del modelo tales como condiciones iniciales, de borde y propiedades hidrogeológicas. Para comenzar a resolver la simulación de flujo es preciso, ya sea en un problema de régimen permanente como transiente, ingresar una condición inicial para la carga hidráulica. En casos de régimen permanente esta condición inicial corresponde a una adivinanza de la solución del problema. Una buena primera adivinanza puede reducir significativamente los tiempos de simulación. Para ingresar una condición inicial al modelo se debe ir al menú *Properties* → *Initial Heads*. Luego, se debe escoger la opción *Assign*, seleccionar las celdas a las cuales se desea asignar la condición inicial y, finalmente, especificar el valor de la carga hidráulica.

MODFLOW permite definir diversas condiciones de borde, sin embargo, sólo se describe aquí la condición de carga hidráulica constante, pues es la única de interés en el desarrollo de este trabajo. Para definir este tipo de condición, en el menú *Boundaries*, se debe elegir la opción *Constant Head (CHD)*. Luego, se debe escoger la opción *Assign* y seleccionar las celdas a las cuales se desea asignar la condición de borde y, por último, especificar el valor para la carga hidráulica. Las celdas seleccionadas quedarán pintadas de color marrón, siendo visibles siempre que la capa *Constant Heads* se encuentre activada. La Figura 3.4 muestra la definición de las condiciones de borde para un problema de flujo bajo una presa impermeable. Si no se especifica ninguna condición de borde, MODFLOW asigna automáticamente condición de no-flujo a dichas celdas. Se ha utilizado una malla con $\Delta x = \Delta y = 5$ m.

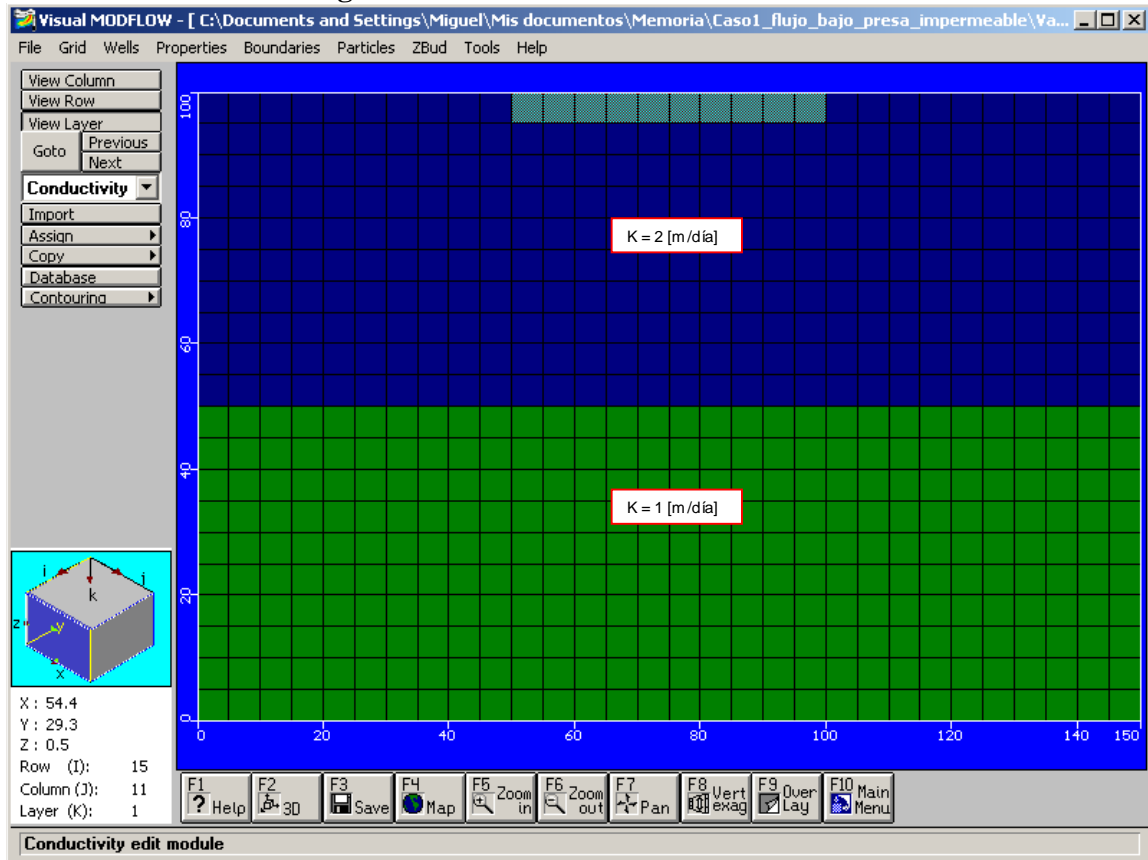
Figura 3.4. Condiciones de borde para un problema de flujo bajo una presa impermeable.



3.1.2.5 Propiedades hidrogeológicas.

MODFLOW permite definir zonas del dominio a las cuales se les asignan propiedades hidrogeológicas específicas. En particular, resulta de interés revisar la definición de las conductividades hidráulicas, puesto que sólo se analizarán problemas en régimen permanente. Para asignar distintas conductividades se debe seleccionar en el menú *Properties* → *Conductivity*. Luego, se debe elegir la opción *Assign* y seleccionar las celdas a las cuales se desea asignar la propiedad y luego, especificar el valor de la conductividad. La Figura 3.5 muestra la definición de zonas de distinta conductividad en el mismo problema de la parte anterior. Se muestran dos estratos de conductividades 2 y 1 [m/día] en azul y verde respectivamente.

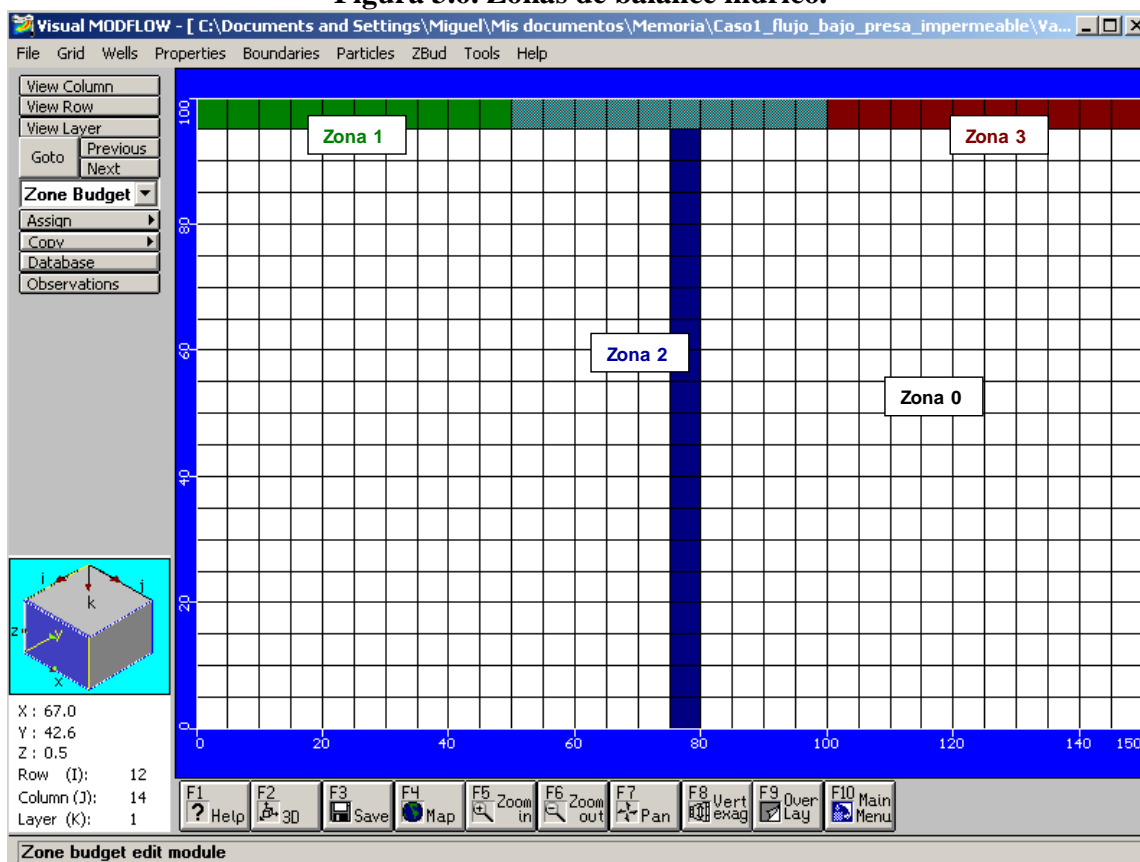
Figura 3.5. Conductividades hidráulicas.



3.1.2.6 Zone budgets.

MODFLOW permite calcular balances hídricos regionales a partir del paquete ZONEBUDGET. Para calcular el balance en una zona específica del dominio, se debe seleccionar en el menú *Zbud*. Luego, elegir la opción *Assign* y seleccionar las celdas correspondientes a la región en la cual se desea obtener el balance. La Figura 3.6 muestra la definición de zonas de balance hídrico en el problema definido en la Figura 3.4. Se muestran 4 regiones identificadas con los colores blanco, verde, azul y marrón.

Figura 3.6. Zonas de balance hídrico.



3.1.2.7 Edición de la grilla.

Dentro del módulo *INPUT* es posible editar la grilla antes definida. Para esto se debe escoger la opción *Grid* del menú. Las opciones posibles son: editar los márgenes de la grilla (sólo extendiendo el dominio), refinar o hacer más gruesa la malla e inactivar o activar celdas, si se quiere eliminar o reincorporar respectivamente, alguna zona del modelo.

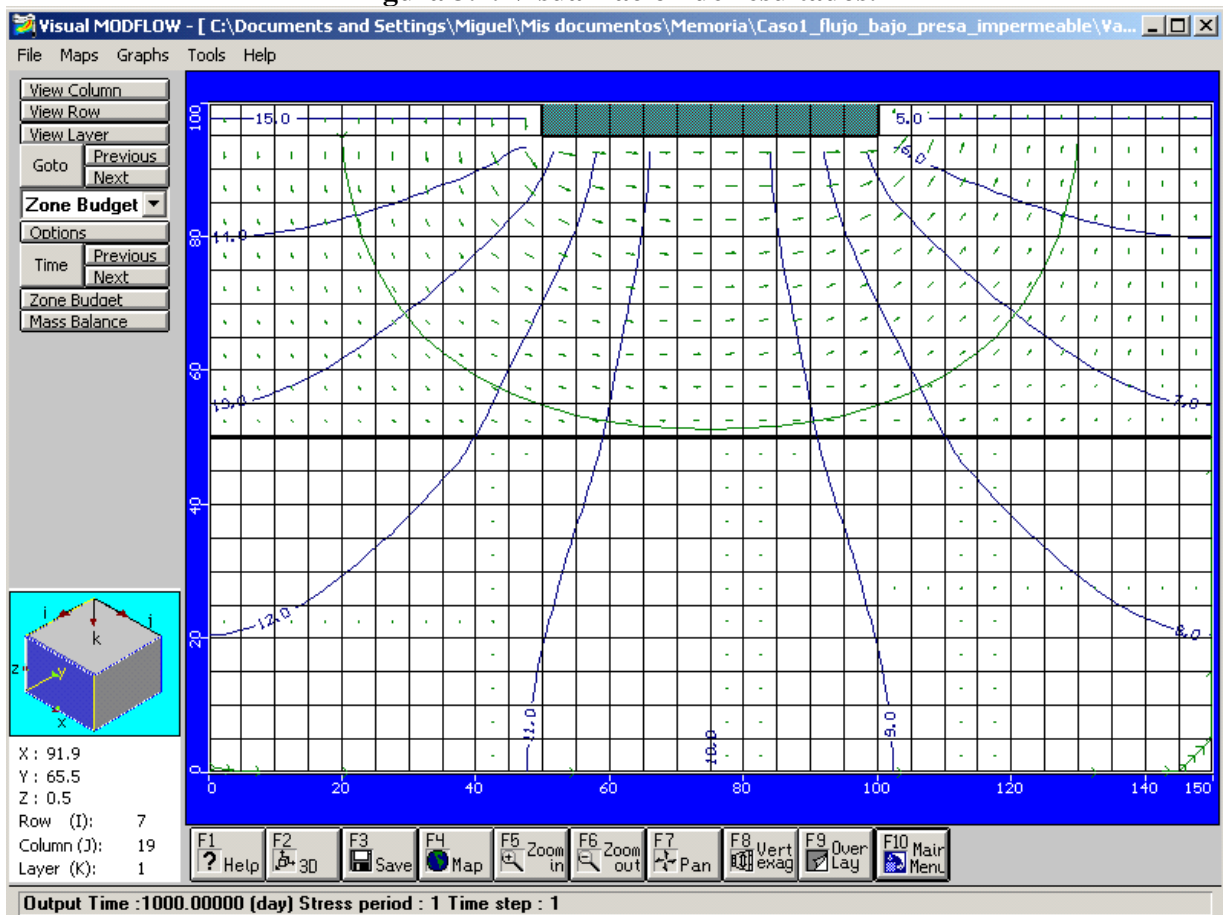
3.1.3 Ejecución del modelo generado y visualización de resultados.

Una vez definidas las variables de entrada al modelo, se debe salir del módulo *INPUT* y volver al menú principal. Para ejecutar el modelo se debe entrar al módulo *RUN*, para lo cual se debe seleccionar en el menú principal *Run* → *Run* y luego escoger los programas a ejecutar. Para resolver el problema de flujo y calcular los balances hídricos se deben seleccionar las opciones MODFLOW 2000 y Zone Budget. Una vez seleccionados los programas se debe hacer clic en la opción *Translate & Run*.

Una vez ejecutado el modelo es posible ingresar al módulo *OUTPUT*. Para esto se debe seleccionar la opción “Output” del menú principal. En el módulo *OUTPUT* es posible visualizar gráficamente líneas equipotenciales, campos de velocidad y líneas de flujo de la solución de un modelo. La Figura 3.7 muestra los resultados para el modelo descrito en las partes anteriores. Las

líneas equipotenciales, cada 1 m., se muestran en azul, el campo de velocidades es representado por flechas verdes que indican la dirección del flujo y cuyo tamaño indica la magnitud de las velocidades. Se muestra una línea de flujo, representada por la trayectoria de una partícula ubicada a 30 m. aguas arriba de la presa. La línea negra en el medio corresponde al límite entre los dos estratos definidos. Es posible apreciar que debido a la mayor conductividad del estrato superior la mayor parte del flujo ocurre en esta sección.

Figura 3.7. Visualización de resultados.



3.2 SEEP/W

3.2.1 Descripción general.

SEEP/W es un programa capaz de modelar geometrías bidimensionales para problemas que van desde casos simples de flujo en medios porosos saturados para un régimen estacionario a análisis más sofisticados de flujo saturado-no saturado en condiciones de régimen transiente.

SEEP/W es parte de Geostudio, una herramienta integrada que permite el uso de un set de programas orientados a la solución de problemas de ingeniería geotécnica. Al usar Geostudio es posible ejecutar todos estos programas en un ambiente común, permitiendo definir un solo modelo que es compartido por todos los programas. Geostudio fue desarrollado por Geo-Slope Internacional Ltd. y en este trabajo se utiliza la versión 2004 de SEEP/W.

El programa resuelve la ecuación de Richards (2.23) mediante el método Galerkin de residuos ponderados aplicado a una malla de elementos finitos que pueden ser de 4 lados o triangulares. La integración en el tiempo se realiza mediante un método de diferencias finitas.

Para resolver la ecuación de Richards es necesario conocer la curva de humedad característica del suelo. SEEP/W permite definir estas curvas manualmente o bien mediante los modelos de Arya y Paris (1981), Kovacs modificado, Fredlund y Xing (1994) y Van Genuchten (1980). A su vez, es también necesario conocer la relación funcional entre conductividad hidráulica y succión, la cual puede ser estimada en SEEP/W, utilizando los modelos de Fredlund et al (1994), Green y Corey (1971) y Van Genuchten (1980).

3.2.2 Generación de un modelo conceptual.

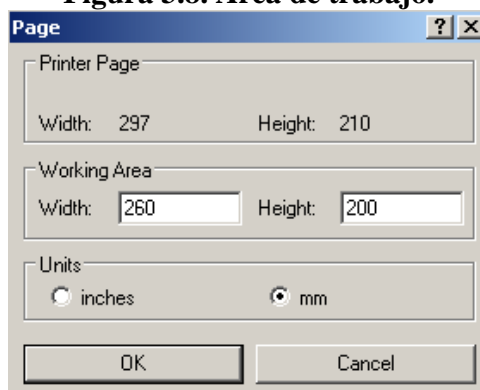
3.2.2.1 Área de trabajo y escala.

El ambiente de Geostudio está dividido en 3 componentes, los módulos *DEFINE*, *SOLVE* y *CONTOUR*. De manera similar al módulo *INPUT* en Visual Modflow, en el módulo *DEFINE* se crea el modelo y se ingresan las variables de entrada.

Para crear un nuevo modelo en SEEP/W, en el menú *File* de Geostudio se debe seleccionar la opción *New*. En la ventana que aparece se debe elegir la opción Geostudio Original Settings. Luego, al hacer clic en OK se despliega una nueva ventana, en la cual se debe escoger la opción SEEP/W. Al presionar OK se ingresa al módulo *DEFINE*.

El primer paso para crear el modelo es definir el área de trabajo, que corresponde al espacio disponible para construir el modelo, esto es, el espacio físico en la pantalla si se trabaja con la vista en un 100 %. El área de trabajo debería establecerse de modo que se pueda trabajar a una escala conveniente. Para establecer el área de trabajo se debe ingresar al menú *Set* → *Page*. Se desplegará la pantalla de la Figura 3.8. Luego, se ingresan el ancho y altura del área de trabajo en milímetros o pulgadas.

Figura 3.8. Área de trabajo.



Una vez definida el área de trabajo se procede a especificar la escala. Para ello se debe ingresar al menú *Set* → *Scale*. Aparecerá la pantalla de la Figura 3.9. En la sección *Scale* se define la escala, la cual debe ser definida de modo tal que el problema esté contenido dentro de los límites del área de trabajo. Además en la sección *Engineering units* se definen las unidades de trabajo. Al seleccionar la opción *meters* el modelo utilizará las unidades que se muestran en la Tabla 3.1. Se debe chequear en este caso que el peso unitario del agua corresponda a 9.807 en el cajón inferior de la pantalla de la Figura 3.9. Este valor está expresado en unidades de kN/m^3 .

Figura 3.9. Escala.

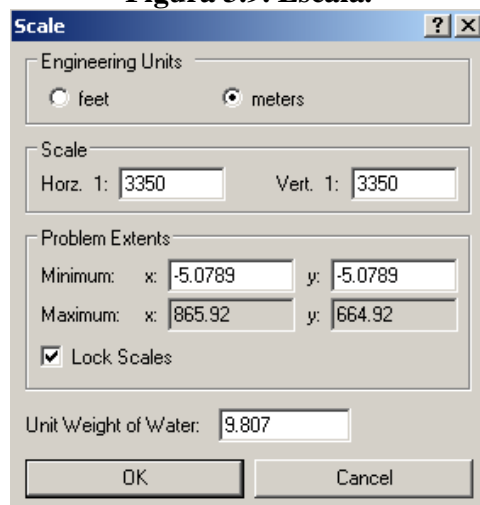


Tabla 3.1. Unidades.

Parámetro	Unidades
Longitud	metros
Tiempo	segundos
Presión	kN/m^2
Peso unitario del agua	kN/m^3
Conductividad hidráulica	m/s
Altura de presión	metros
Caudal	m^3/s

3.2.2.2 Dibujo de un esquema del modelo.

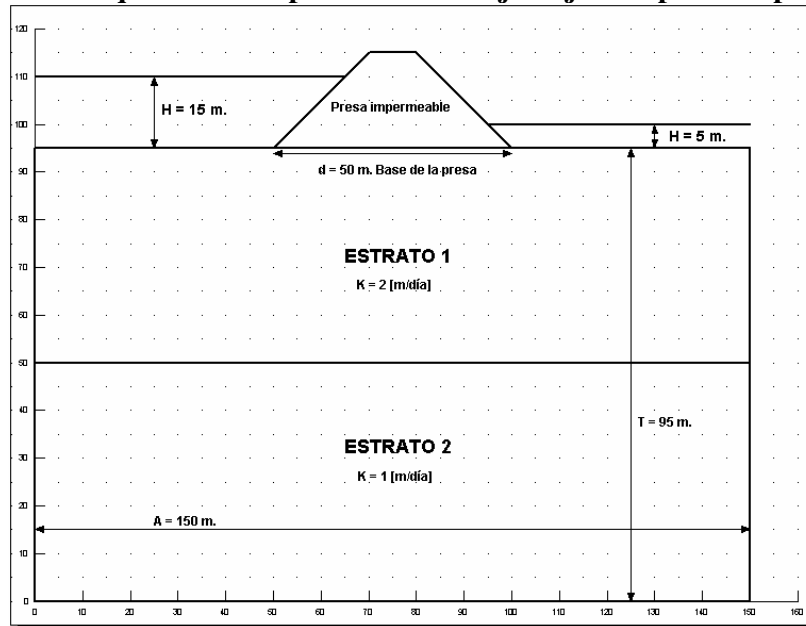
Al definir una malla de elementos finitos puede ser conveniente preparar un esquema del modelo, el cual servirá de guía para definir el problema, señalar características de interés o bien identificar las condiciones de borde.

SEEP/W permite desplegar una grilla de referencia que sirve de ayuda para dibujar un esquema del modelo. Para editar la grilla se debe seleccionar el menú *Set* → *Grid*. En la pantalla que se despliega se pide indicar el espaciamiento de la grilla.

Para dibujar el esquema se debe seleccionar el menú *Sketch* y elegir si se desea dibujar una línea, un círculo, un arco o insertar un texto. También es posible dibujar los ejes X e Y eligiendo la opción *Axes*.

La Figura 3.10 muestra un esquema para el problema de flujo bajo una presa impermeable definido en la sección 3.1.2.4.

Figura 3.10. Esquema de un problema de flujo bajo una presa impermeable.



3.2.2.3 Tipo de análisis.

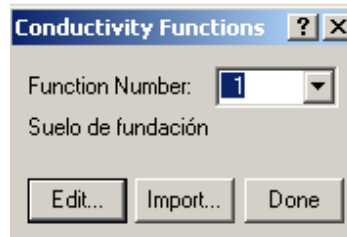
Para especificar si se realizará un análisis en régimen estacionario o transiente se debe seleccionar la opción *Analysis Settings* del menú *Key in*. En la pestaña *Type* de la ventana desplegada se especifica el tipo de análisis. En esta ventana también es posible elegir la vista del modelo y los criterios de convergencia. En la pestaña *Control* se elige la vista del modelo. Las opciones que se tienen en SEEP/W son vista en 2-D corte o planta y análisis axisimétrico en 3-D. En este trabajo sólo se utiliza la opción de vista en corte. En la pestaña *Convergence* se definen los criterios de iteración bajo los cuales correrá el programa.

3.2.2.4 Definición de funciones de conductividad hidráulica.

Como ha sido señalado, para resolver la ecuación de Richards es necesario conocer la curva de humedad característica y la relación funcional entre conductividad hidráulica y succión para cada suelo. En problemas de régimen estacionario como los tratados en este trabajo, no es estrictamente necesario conocer la curva de humedad característica, según lo visto en 2.5.1. Por tal razón, sólo se especificará como se define una función de conductividad hidráulica en SEEP/W.

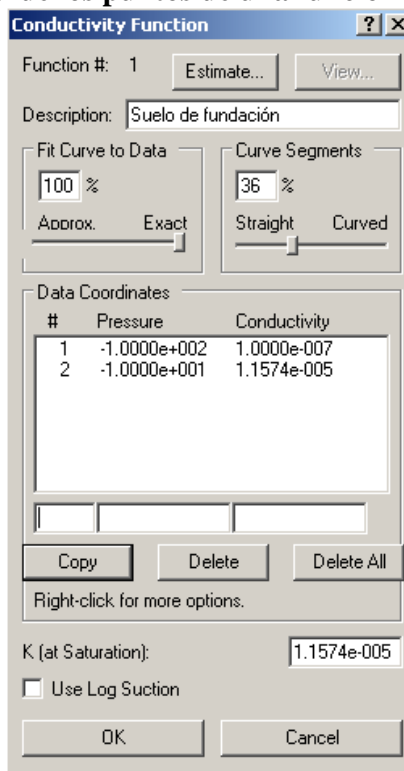
Para definir una función de conductividad hidráulica se debe seleccionar en el menú *Key in* → *Hydraulic functions* → *Hydraulic Conductivity*. Se desplegará la ventana de la Figura 3.11.

Figura 3.11. Ingreso de una función de conductividad hidráulica.



Existen 3 posibilidades para definir la función. La primera corresponde a importar una función desde otro modelo, o bien, de alguna base de datos. Para ello se debe hacer clic en el botón *Import...* de la Figura 3.11. La segunda opción corresponde a ingresar manualmente los puntos de la función. Para ello se debe hacer clic en el botón *Edit...*, con lo que aparecerá la venta de la Figura 3.12.

Figura 3.12. Ingreso manual de los puntos de una función de conductividad hidráulica.



En la sección *Data coordinates* es posible ingresar punto a punto los valores de la función. Además debe ingresarse el valor de la conductividad hidráulica en estado saturado (k_s).

La tercera posibilidad corresponde a estimar la función a partir de una curva de humedad característica de un suelo. Para esto se debe hacer clic en la opción *Estimate...* de la ventana mostrada en la Figura 3.12, con lo cual se desplegará una nueva ventana en la que se deben especificar el método de estimación a utilizar, la curva de humedad característica, el valor de la conductividad hidráulica saturada, el rango de presiones en el cual se desea definir la función y el número de puntos a utilizar en la estimación. Cada función quedará identificada con un nombre y un número.

3.2.2.5 Definición de materiales.

Para caracterizar los suelos del modelo se definen materiales con propiedades hidrogeológicas específicas. Para ello se debe ingresar a *Key in* → *Material Properties*. Para cada material se debe ingresar un número que lo identifica, una función de conductividad hidráulica asociada, una curva de humedad característica en caso de un análisis transiente y un color que permite identificarlo. Cada material queda identificado con un número.

3.2.2.6 Regiones y mallas.

Para definir la malla de elementos finitos SEEP/W utiliza el concepto de regiones. El dominio es dividido en regiones con el propósito de identificar las componentes relevantes del sistema, como

podrían ser los distintos estratos del subsuelo. En general estas regiones pueden corresponder a polígonos irregulares de cuantos lados se desee. En cada región se crea una malla de elementos finitos, la cual junto con las mallas de las otras regiones forman la malla del modelo. Las propiedades hidrogeológicas de cada región se definen asociándoles un material. Para crear una región se debe ingresar a *Draw* → *Regions* y seleccionar los vértices que la componen. Sus propiedades pueden ser editadas ingresando a *Key in* → *Regions*. Al igual que con las funciones de conductividad hidráulica y los materiales, cada región será identificada con un número.

3.2.2.7 Condiciones de borde y secciones de flujo.

Luego de definir las regiones del modelo con su discretización y propiedades hidrogeológicas se procede a definir las condiciones de borde del problema. Sólo se utilizan 2 tipos de condiciones de borde en las modelaciones de este trabajo. La primera es la condición de carga hidráulica constante y la segunda la condición de tipo *Seepage face*. Esta última corresponde a una condición dinámica que permite determinar la ocurrencia de superficies de drenaje.

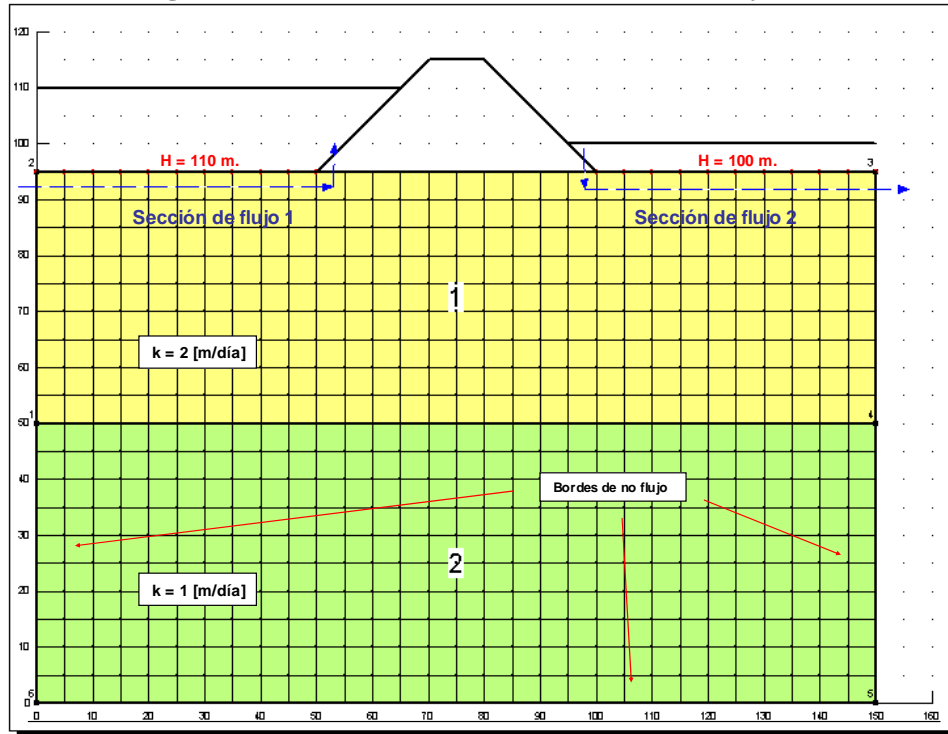
Para definir las condiciones de borde se debe seleccionar la opción *Boundary Conditions* del menú *Draw*. En la pantalla que aparece se debe escoger el tipo de condición de borde, su valor asociado y luego pinchar sobre los nodos a los que se desea asignar la condición. Al igual que en MODFLOW, si no se especifica ninguna condición de borde para un nodo, SEEP/W les asigna condición de no flujo.

SEEP/W tiene la capacidad de calcular caudales pasantes a través de secciones definidas por el usuario. Para esto SEEP/W utiliza el concepto de secciones de flujo (*flux sections*), las que permiten calcular el caudal pasante a través de una sección vertical u horizontal de un elemento o varios elementos.

Para definir una sección de flujo se debe ingresar a *Draw* → *Flux sections* y luego dibujar una flecha que atraviese la sección en la que se desea calcular el flujo pasante. Estas flechas no tienen que ser obligatoriamente líneas rectas, sino que también pueden estar constituidas por varios segmentos conectados.

La Figura 3.13 muestra la construcción del modelo con sus condiciones de borde y secciones de flujo para el problema definido en 3.1.2.4.

Figura 3.13. Regiones, discretización, condiciones de borde y secciones de flujo.



El modelo fue construido utilizando 2 regiones, donde cada una representa un estrato del subsuelo. Las regiones se identifican con los números 1 y 2, y los colores amarillo y verde están asociados a sus propiedades hidrogeológicas (materiales). Las secciones de flujo definidas permiten obtener el caudal entrante y saliente al sistema. La discretización utilizada es de $\Delta x = \Delta y = 5$ m.

Notar que la coordenada $z = 0$ se define en el fondo del relleno.

3.2.3 Ejecución del modelo y visualización de resultados.

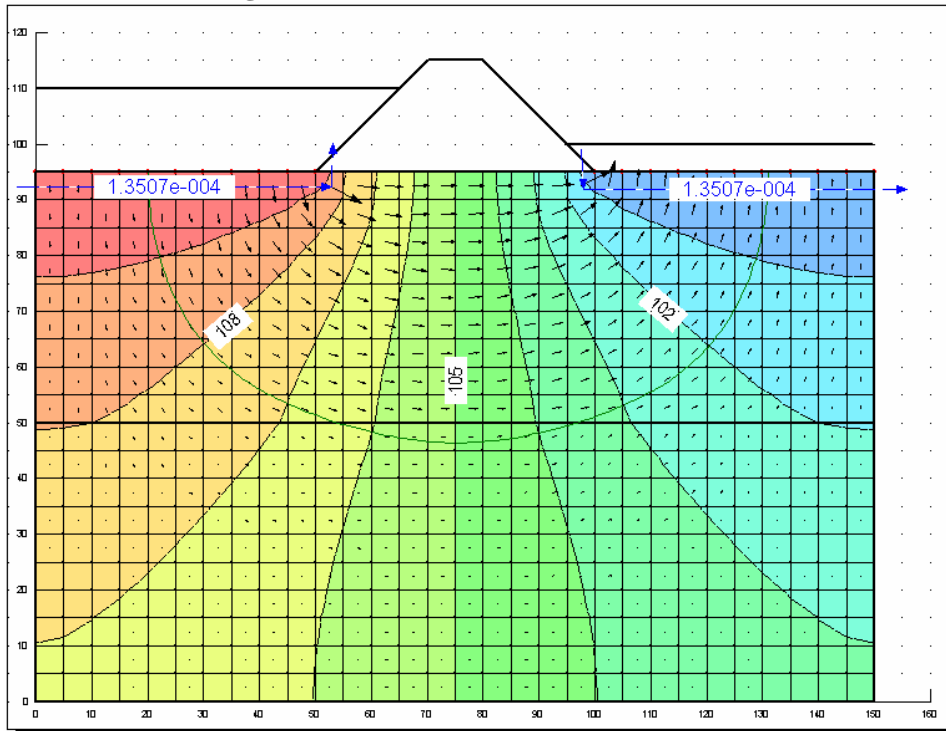
Para ejecutar el modelo generado se debe hacer clic en el botón *SOLVE* de la barra de herramientas *Analysis*, ubicada al lado izquierdo en el módulo *DEFINE*. En la ventana emergente se debe hacer clic en el botón *Start*.

Una vez ejecutado el modelo, los resultados pueden ser visualizados en el módulo *CONTOUR*. Para esto se debe hacer clic en el botón *COUNTOUR* de la barra de herramientas *Analysis*.

SEEP/W permite visualizar, entre otros, líneas equipotenciales, líneas de flujo y campos de velocidad.

La Figura 3.14 muestra la solución para el problema definido en la sección anterior.

Figura 3.14. Visualización de resultados.



La forma de presentar los resultados es similar a Visual Modflow. Las líneas equipotenciales cada 1 m., se muestran en negro. También en negro, el campo de velocidades es representado por flechas que indican la dirección del flujo y cuyo tamaño indica la magnitud de las velocidades. En verde se muestra la trayectoria de una partícula ubicada 30 m. aguas arriba de la presa. Por último, en azul sobre las secciones de flujo, el valor del flujo pasante en $[m^3/s/m]$.

3.3 HYDRUS-2D.

3.3.1 Descripción general.

HYDRUS-2D es un programa desarrollado en ambiente Windows, capaz de modelar el flujo a través de medios parcialmente saturados. HYDRUS-2D fue desarrollado por J. Simunek, K. Huang, M. Sejna y M.Th van Genuchten del U.S Salinity Laboratory, USDA/ARS, Riverside, California (Salfate, 2005).

El programa resuelve la ecuación de Richards (2.23) numéricamente mediante el método de Galerkin de residuos ponderados aplicado a una malla de elementos finitos. La integración en el tiempo se realiza mediante un método implícito de diferencias finitas.

Se utiliza la versión 2.05 de HYDRUS-2D. En esta versión sólo es posible generar mallas rectangulares. Actualmente la versión HYDRUS-2D Standard permite generar mallas generales.

HYDRUS-2D permite definir las curvas de humedad característica y las funciones de conductividad hidráulica mediante los modelos de Brooks y Corey (1964), van Genuchten (1980) y van Genuchten modificado. Además HYDRUS-2D incorpora el efecto de histéresis utilizando los modelos empíricos de Scott *et al* (1983) y Kool y Parker (1987), funciones que no se utilizan en este trabajo.

3.3.2 Generación de un modelo conceptual.

3.3.2.1 Tipo de análisis.

Para comenzar un nuevo proyecto en HYDRUS-2D se debe ingresar a *Main Processes*. En la ventana que se despliega se debe escoger el tipo de análisis que se desea realizar. Las opciones son simulación de flujo, transporte de calor, transporte de solutos o extracción de agua por medio de las plantas. En este trabajo sólo se realizan simulaciones de flujo.

3.3.2.2 Información geométrica.

En *Geometry Information* se especifican las unidades métricas de trabajo (m, cm o mm), el tipo de flujo que se modelará (plano vertical, horizontal o axisimétrico para el caso de pozos), tipo de malla (rectangular o general, esta última sólo en el caso de HYDRUS 2D-Standard), el número de materiales (suelos con propiedades hidrogeológicas específicas) y la cantidad de zonas para las cuales el programa calculará el balance de masas (*Number of Layers*).

3.3.2.3 Unidades de tiempo y discretización temporal.

En *Time Information* se especifican las unidades de tiempo (segundos, minutos, horas o días) y los parámetros de discretización temporal (tiempo inicial, final y pasos de tiempo de la simulación). A pesar de que en este trabajo no se realizan modelaciones en estado transiente, es requisito definir estos parámetros para ejecutar el modelo. Se aconseja utilizar los valores asignados por el programa salvo las unidades de tiempo, pues determinan las unidades en que el programa entrega como resultado los valores de caudal y velocidades.

3.3.2.4 Criterios de iteración y asignación de la condición inicial.

En *Water Flow - Iteration Criteria* se especifica en que se medirá la condición inicial del modelo. Las opciones son altura de presión o humedad. En este trabajo se utiliza la opción altura de presión, pues sólo estudian problemas en régimen permanente. También se pueden modificar aquí los criterios de iteración bajo los cuales se ejecuta el programa. Las modelaciones realizadas no mostraron problemas de convergencia ni balances de masas, por lo que se utilizaron los valores asignados por defecto.

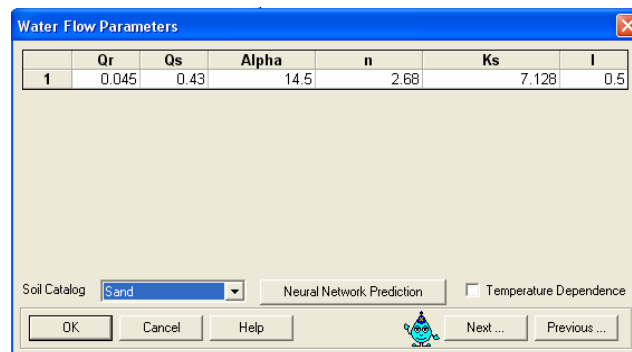
3.3.2.5 Definición de las propiedades hidrogeológicas de los materiales.

El método de estimación que se utiliza para definir las curvas de humedad característica y funciones de conductividad hidráulica se selecciona en *Water Flow – Soil Hydraulic Model*. Los modelos disponibles son Brooks y Corey, van Genuchten y van Genuchten modificado. Además se puede seleccionar si se desea incluir el fenómeno de histéresis en el análisis.

Finalmente, para asignar las curvas de humedad característica y funciones de conductividad hidráulica a cada material del modelo se debe ingresar a *Water Flow – Soil Hydraulic Parameters*. Si previamente se ha seleccionado el modelo de van Genuchten, los parámetros pedidos serán los que se muestran en la Figura 3.15.

Existen 2 posibilidades para definir estos parámetros para cada material. Una es elegir los parámetros de suelos predeterminados por el programa, para lo cual se debe seleccionar *Soil Catalog* en la pantalla de la Figura 3.15y elegir el suelo deseado. La segunda opción es ingresarlos manualmente. Los parámetros que se deben definir son α , n , θ_r , θ_s , l y k_s .

Figura 3.15. Propiedades hidrogeológicas.



3.3.2.6 Geometría de la malla

Las características geométricas del modelo y la discretización de la malla se definen en *Geometry and FEM Mesh Editor*. En la sección *Rectangular Dimensions* de la ventana desplegada se ingresan la dimensión horizontal y vertical de la grilla, según las unidades definidas en *Geometry Information* (ver 3.3.2.2).

La discretización de la malla se define en la sección *Boundary Discretization*, en la cual se ingresa el número de nodos que tendrá la malla en la dirección horizontal y vertical.

3.3.2.7 Condiciones inicial y de borde.

Una vez ingresados los parámetros anteriormente descritos se puede tener acceso a la malla de nodos generada, para lo cual se debe ingresar a *Boundary Conditions Editor*, con lo cual se despliega la pantalla mostrada en la Figura 3.16.

Es posible definir diversas condiciones de borde en HYDRUS-2D, sin embargo sólo se refiere aquí a la condición de altura de presión constante, pues es la única de interés en el desarrollo de este trabajo. Para definir este tipo de condición se debe ingresar a *Condition* → *Boundary Condition Water – Flow* → *Constant Pressure Head* del menú principal de la ventana de la Figura 3.16. Una vez seleccionada esta opción, aparecerá una mano en la pantalla mediante la cual se asigna la condición de borde a los nodos deseados oprimiendo el botón izquierdo y desplazando el mouse con el botón apretado. Los nodos seleccionados quedan marcados de color celeste. La condición de borde por defecto corresponde a condición de no-flujo, la cual queda marcada de color blanco.

La Figura 3.16 muestra las condiciones de borde para el problema de flujo bajo una presa impermeable definido en 3.1.2.4.

3.3.3 Ejecución del modelo y visualización de resultados.

Para ejecutar el modelo generado se debe seleccionar del menú principal *Calculation* → *Run HYDRUS-2D*. Una vez terminado el cálculo se debe presionar *ENTER*.

HYDRUS-2D permite visualizar gráficamente los resultados. Para ello, se debe ingresar a *Post-processing* → *Graphical Display of Results*.

La Figura 3.17 muestra el campo de velocidades para el problema de la parte anterior. A diferencia de MODFLOW y SEEP/W no es posible visualizar líneas equipotenciales de carga hidráulica en HYDRUS-2D, sino que solamente líneas de altura de presión constante.

Figura 3.16. Condiciones de borde para un problema de flujo bajo una presa impermeable.

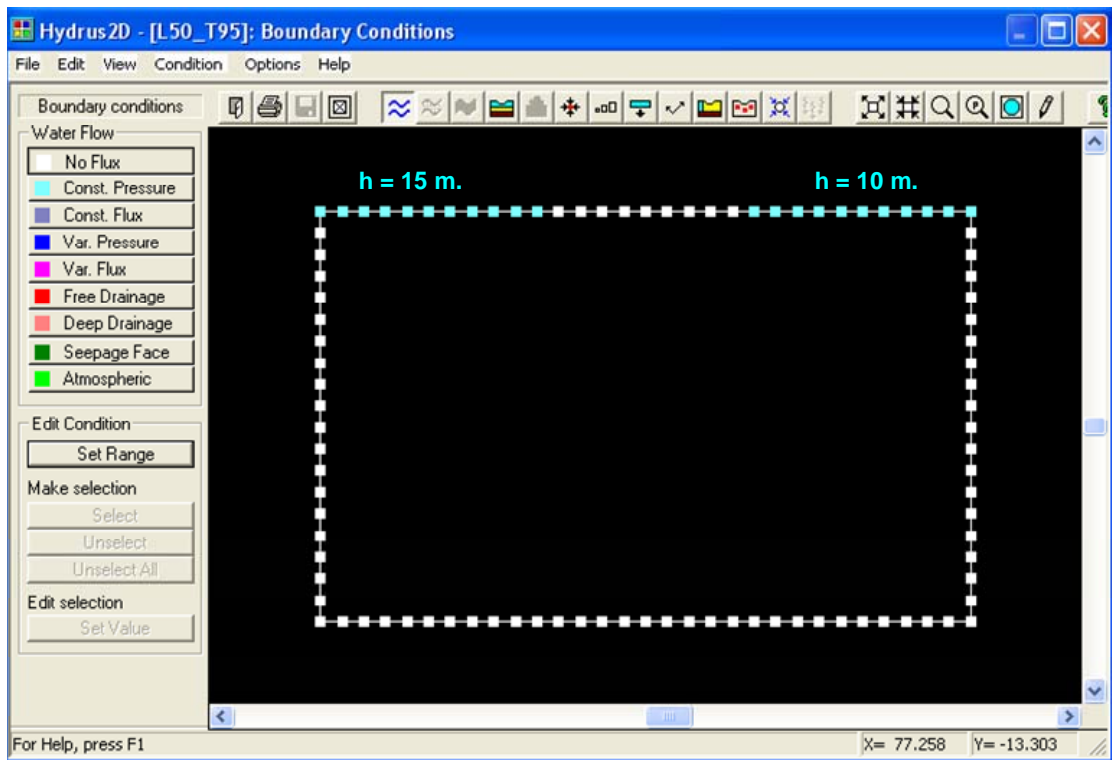
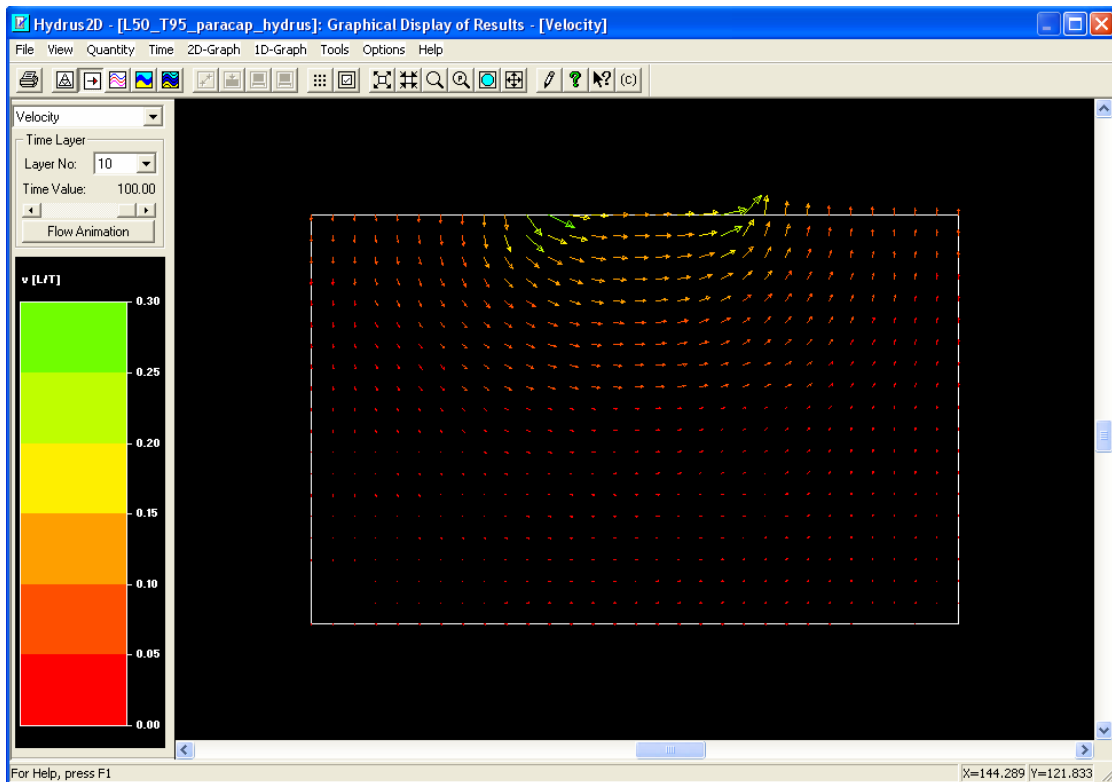


Figura 3.17. Visualización de resultados.



4 Análisis de casos simples

4.1 Introducción.

En este capítulo se analizan las diferencias en los resultados obtenidos mediante esquemas analíticos y los programas MODFLOW, SEEP/W y HYDRUS-2D aplicados a dos problemas clásicos de flujo en presas, a saber, el flujo bajo una presa impermeable y el flujo a través de una presa de tierra con dren horizontal al pie. Es preciso notar que en el segundo caso no se utiliza el programa HYDRUS-2D, debido a que no es posible generar mallas que no sean rectangulares en la versión utilizada.

4.2 Flujo bajo una presa impermeable.

4.2.1 Introducción.

En este acápite se revisa el problema de flujo bajo una presa impermeable utilizando un esquema analítico y los programas: MODFLOW, SEEP/W y HYDRUS-2D. El análisis se centra en la determinación de los caudales pasantes con cada esquema y la comparación de los resultados obtenidos. Además se estudia el efecto de la discretización espacial en los modelos numéricos.

4.2.2 Antecedentes generales y geometría.

Se considera el flujo bidimensional en régimen permanente bajo una presa impermeable de espesor d , sobre un relleno homogéneo e isotrópico de permeabilidad k con espesor T y ancho L , a cada lado de la presa.

Los niveles de embalse aguas arriba y aguas abajo de la presa se denotan como h_1 y h_2 respectivamente. A la diferencia entre estos niveles de energía, h_1-h_2 , se le denomina h .

Al caudal pasante por unidad de ancho de la presa se le llamará Q . Al caudal pasante calculado con MODFLOW, SEEP/W o HYDRUS-2D se le denominará Q_{modf} , Q_{seep} y Q_{hydrus} respectivamente.

Las condiciones de borde corresponden a niveles de energía constante en los embalses aguas arriba y aguas abajo, de valores h_1 y h_2 respectivamente. La impermeabilidad de la presa define una condición de borde de no-flujo bajo ella. Para los bordes izquierdo y derecho del dominio se consideran condiciones de no flujo, las cuales representan la ausencia de fuentes además de los embalses que aporten agua al sistema. Se considera que el borde inferior del dominio corresponde a la posición del basamento rocoso, por lo cual, se le asigna una condición de no-flujo.

En la Figura 4.1 se muestran la geometría y condiciones de borde del problema.

Para los análisis respectivos se considera arbitrariamente una conductividad hidráulica $k = 1$ [m/día] y $d = 50$ [m].

A lo largo de este capítulo se resolverá el problema descrito, utilizando MODFLOW, SEEP/W, HYDRUS-2D y un esquema analítico. Los resultados obtenidos serán comparados, en muchos casos, mediante la diferencia porcentual entre sus valores, la cual, por ejemplo, para el caudal pasante, se define como sigue:

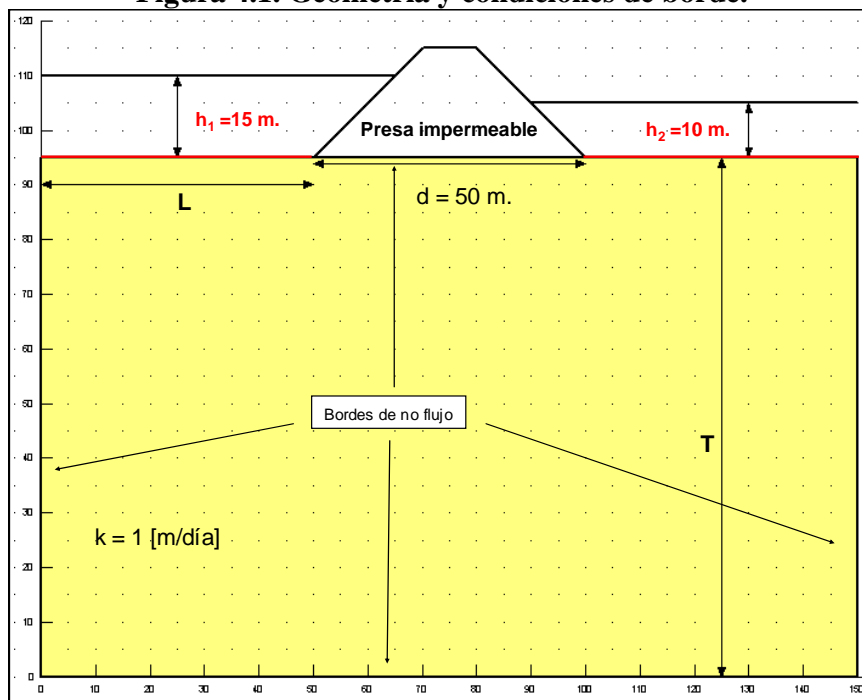
$$\Delta Q_{2-1} = \frac{(Q_2 - Q_1)}{Q_1} \cdot 100, \text{ donde}$$

ΔQ_{2-1} : Diferencia porcentual del resultado obtenido con el método 2 con respecto al del método 1.

Q_1 : Caudal obtenido según el método 1.

Q_2 : Caudal obtenido según el método 2.

Figura 4.1. Geometría y condiciones de borde.



4.2.3 Efecto del tamaño de la grilla en el caudal pasante.

Para estudiar el efecto del tamaño de la discretización utilizada se resolvió el problema de flujo refinando la malla gradualmente, calculando la diferencia porcentual del caudal obtenido con cada malla con respecto a su anterior más gruesa. A dicha diferencia se le ha denominado ΔQ . Valores positivos de ΔQ indican un aumento del caudal y valores negativos una disminución.

El grado de finura de la malla se caracterizó a través del número de celdas o elementos que la constituyen, generando así un parámetro adimensional.

Se modeló para 2 geometrías distintas, caracterizadas por los siguientes valores de L y T:

- Geometría 1. L = 50 [m], T = 95 [m].
- Geometría 2. L = 90 [m], T = 30 [m].

Los resultados obtenidos con cada programa se detallan a continuación.

4.2.3.1 MODFLOW.

Las Tabla 4.1 y la Tabla 4.2 resumen los resultados obtenidos con MODFLOW.

Tabla 4.1. Efecto del tamaño de la grilla en el caudal pasante. Geometría 1. MODFLOW

L = 50 [m], T = 95 [m]			
$Q_{\text{modf}} [\text{m}^3/\text{d}]$	$\Delta x = \Delta y [\text{m}]$	Nº de celdas	$\Delta Q [\%]$
2.77	5	600	-
2.91	2.5	2400	5.1
3.01	1	1500	03.4
3.1	0.5	57600	3

Tabla 4.2. Efecto del tamaño de la grilla en el caudal pasante. Geometría 2. MODFLOW

L = 90 [m], T = 30 [m]			
$Q_{\text{modf}} [\text{m}^3/\text{d}]$	$\Delta x = \Delta y [\text{m}]$	Nº de celdas	$\Delta Q [\%]$
1.76	5	322	-
1.84	2.5	1288	4.5
1.91	1	7130	3.8
1.95	0.5	28520	2.1

Se observa que al refinar la malla se produce un aumento del caudal. Sin embargo, dicho aumento medido en función de ΔQ no supera valores del 5 % y es cada vez menor en cada nueva refinación de la malla.

4.2.3.2 SEEP/W y HYDRUS-2D.

La Tabla 4.3 y la Tabla 4.4 resumen los resultados obtenidos en SEEP/W.

Tabla 4.3. Efecto del tamaño de la grilla en el caudal pasante. Geometría 1. SEEP/W

L = 50 [m], T = 95 [m]			
Q _{seep} [m ³ /d]	Δx = Δy [m]	Nº de elementos	ΔQ [%]
3.16	5	570	-
3.13	2.5	2280	-1.1
3.11	1	14250	-0.7

Tabla 4.4. Efecto del tamaño de la grilla en el caudal pasante. Geometría 2. SEEP/W

L = 90 [m], T = 30 [m]			
Q _{seep} [m ³ /d]	Δx = Δy [m]	Nº de elementos	ΔQ [%]
2.02	5	276	-
1.99	2.5	1104	-1.4
1.97	1	6900	-0.8

La Tabla 4.5 y la Tabla 4.6 presentan los resultados obtenidos con HYDRUS 2-D.

Tabla 4.5. Efecto del tamaño de la grilla en el caudal pasante. Geometría 1. HYDRUS 2-D

L = 50 [m], T = 95 [m]			
Q _{hydrus} [m ³ /d]	Δx = Δy [m]	Nº de elementos	ΔQ [%]
3.22	5	570	-
3.16	2.5	2280	-1.9
3.12	1	14250	-1.3

Tabla 4.6. Efecto del tamaño de la grilla en el caudal pasante. Geometría 2. HYDRUS 2-D

L = 90 [m], T = 30 [m]			
Q _{hydrus} [m ³ /d]	Δx = Δy [m]	Nº de elementos	ΔQ [%]
2.05	5	276	-
2.01	2.5	1104	-2.0
1.98	1	6900	-1.5

Los resultados para SEEP/W y HYDRUS 2-D muestran el mismo comportamiento, esto es, una disminución del caudal al refinar la malla. Sin embargo, esta disminución, medida en función de ΔQ no supera valores del 2 % y disminuye en cada nueva refinación de la malla.

4.2.3.3 Comentarios generales.

La solución numérica determinada, ya sea con MODFLOW, HYDRUS-2D o SEEP/W, debería aproximar mejor a la solución real mientras más fina sea la malla utilizada. Sin embargo, no es posible definir una malla tan fina como se quiera, ya sea por limitaciones de memoria en el computador o limitaciones del mismo software. A su vez, en mallas demasiado finas pueden

producirse problemas numéricos y de convergencia. De todos modos, como muestran los resultados de este análisis, es posible determinar un tamaño de grilla que asegure un resultado confiable y para el cual un aumento en la finura de la malla no producirá diferencias sustanciales.

Según los resultados obtenidos, se ha determinado que utilizando un número de celdas del orden de 20000 en el caso de MODFLOW y un número de elementos del orden de 1000 en el caso de SEEP/W y HYDRUS-2D, se aseguran resultados que no variarían más allá de un 2% con la utilización de una malla más fina.

Es importante señalar que al comparar dos problemas de distintas dimensiones, es recomendable utilizar mallas que tengan asociados errores de valor similar en la determinación del caudal. Como se ha visto, el error asociado depende del número de celdas o elementos utilizado. Así, para generar mallas con errores asociados similares, resulta útil definir la finura de la malla en función de un parámetro adimensional como el propuesto en este análisis. Esto significa utilizar un número similar de celdas y no necesariamente la misma discretización en cuanto a los valores de Δx y Δy .

El análisis aquí realizado sólo se ha aplicado a la determinación del caudal pasante, pues constituye la variable principal que se desea evaluar en este trabajo. Sin embargo, el mismo esquema de análisis puede ser aplicado a, por ejemplo, la determinación de la carga hidráulica, lo cual determinará distintas sensibilidades respecto a la finura de la malla. Así, según la variable que se interese conocer, no siempre el mismo nivel de finura entrega la misma precisión.

La Tabla 4.7 y la Tabla 4.8 corresponden a cuadros comparativos de los 3 esquemas de cálculo para las Geometrías 1 y 2 respectivamente. Se muestran los caudales pasantes para las mallas más finas utilizadas con cada programa.

Tabla 4.7. Resultados de los 3 esquemas de cálculo. Geometría 1.

L = 50 [m], T = 95 [m]		
Q_{modf} [m ³ /d]	Q_{seep} [m ³ /d]	Q_{hvdrus} [m ³ /d]
3.1	3.11	3.12

Tabla 4.8. Resultados de los 3 esquemas de cálculos. Geometría 2.

L = 90 [m], T = 30 [m]		
Q_{modf} [m ³ /d]	Q_{seep} [m ³ /d]	Q_{hvdrus} [m ³ /d]
1.95	1.97	1.98

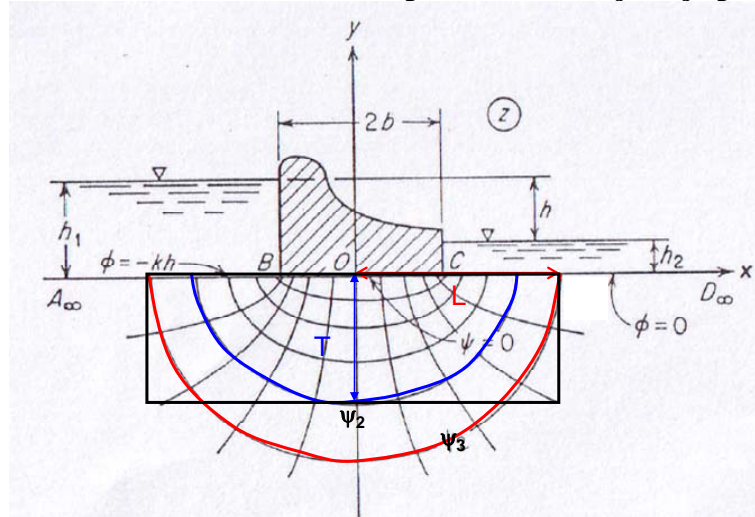
Se observa gran similitud entre los resultados obtenidos con cada programa. En la sección 4.2.4 se analizan con mayor detalle las diferencias entre los resultados obtenidos con cada programa y un esquema analítico.

4.2.4 Variación del ancho (L) y profundidad (T) del acuífero.

Se analizó el efecto sobre el caudal pasante de variar el ancho del acuífero, manteniendo su profundidad constante. Del mismo modo, se analizó el efecto de la variación de la profundidad del acuífero manteniendo su ancho constante.

Se han considerado dos modos de evaluar el caudal pasante del problema de flujo con espesor y ancho definidos a partir de la solución analítica del problema de ancho y espesor indefinidos. Considérese la geometría de la Figura 4.2, donde el espesor y ancho del relleno se han enmarcado en un rectángulo de color negro. La primera manera de determinar el caudal consiste en considerar la sección de flujo comprendida entre la línea de flujo $\psi = 0$ y la línea de flujo ψ_2 , correspondiente a la línea que intersecta al eje y en $y^* = T$. La segunda es considerar el flujo entre las líneas $\psi = 0$ y ψ_3 , correspondiente a la línea de flujo que intersecta al eje x en $x^* = L$. En la Figura 4.2 se muestran dichas secciones de flujo. Debido a que en el primer esquema el resultado depende de T, al caudal obtenido de esta manera se le llamará $Q(T)$. Del mismo modo, al caudal obtenido según el segundo esquema se le denomina $Q(L)$.

Figura 4.2. Esquema analítico de solución del problema de flujo bajo presa impermeable.



Fuente: Elaboración propia, basado en Harr (1962).

Los resultados obtenidos con la modelación numérica se compararán con los obtenidos a partir de los esquemas teóricos descritos.

4.2.4.1 Variación del ancho del acuífero.

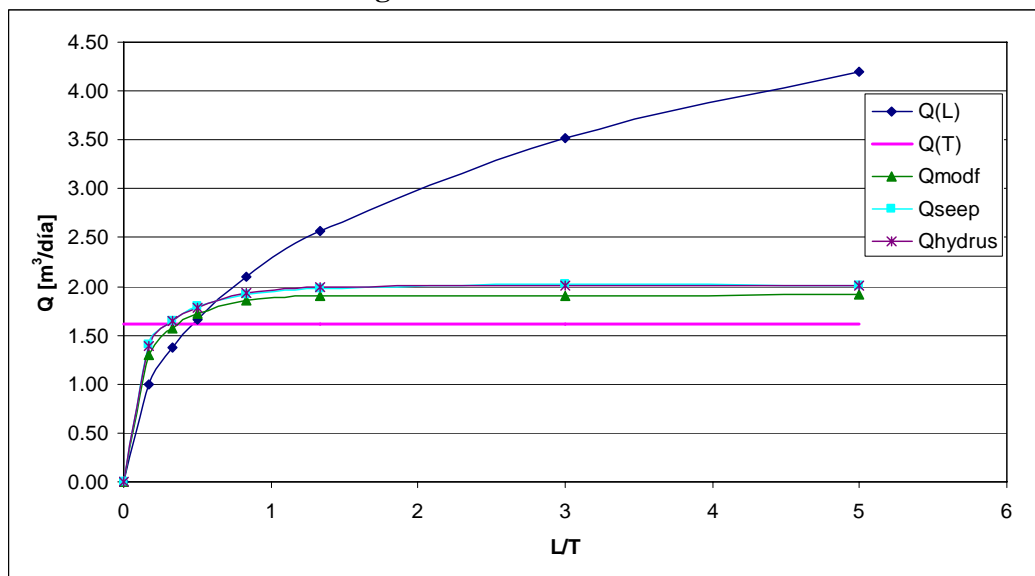
Para analizar el efecto de la variación del ancho del acuífero se consideró arbitrariamente un valor de $T = 30$ [m]. Se modeló para valores de L entre 5 y 150 [m]. La Tabla 4.9 muestra los caudales obtenidos con MODFLOW, SEEP/W, HYDRUS-2D y los esquemas teóricos, los cuales son denominados Q_{modf} , Q_{seep} , Q_{hydrus} , $Q(L)$ y $Q(T)$ respectivamente.

Tabla 4.9. Efecto de la variación del ancho del acuífero en el caudal.

L [m]	T [m]	L/T -	Q(L) [m ³ /día]	Q(T) [m ³ /día]	Q _{modf} [m ³ /día]	Q _{seep} [m ³ /día]	Q _{hydrus} [m ³ /día]
0	30	0	0	1.62	0	0	0
5	30	0.17	0.99	1.62	1.3	1.41	1.39
10	30	0.33	1.38	1.62	1.57	1.65	1.64
15	30	0.50	1.67	1.62	1.72	1.79	1.78
25	30	0.83	2.10	1.62	1.85	1.92	1.94
40	30	1.33	2.56	1.62	1.91	1.97	1.99
90	30	3.00	3.51	1.62	1.91	2.02	2.01
150	30	5.00	4.19	1.62	1.92	2.02	2.01

La Figura 4.3 muestra los resultados en forma gráfica. Se utiliza el parámetro L/T para adimensionalizar los resultados.

Figura 4.3. Caudal v/s L/T.



Como en este caso se varía solamente el ancho (L) manteniendo la profundidad (T) constante, se observa un comportamiento creciente de la curva Q(L), pues la sección de flujo crece cada vez que aumenta el valor de L. En cuanto a Q(T) su valor es constante, pues T no varía.

El punto de intersección entre las curvas Q(L) y Q(T) permite identificar 2 zonas en relación al comportamiento de los caudales obtenidos con los modelos numéricos. Hacia la izquierda de este punto en el gráfico los caudales crecen, para luego tender hacia una asíntota horizontal a la derecha de este punto.

En cuanto a los valores obtenidos se observa una discrepancia de, en general, un 5 a 10 % entre Q_{modf} y Q_{seep} y entre Q_{modf} y Q_{hydrus}. Entre Q_{seep} y Q_{hydrus} las diferencias no son mayores al 2 %.

Al comparar el valor de los caudales modelados con los obtenidos de acuerdo a los esquemas teóricos, nuevamente el punto de intersección entre las curvas Q(L) y Q(T) permite identificar dos zonas. A la izquierda de este punto los caudales modelados se asemejan mejor a la curva

Q(L) y a la derecha de este punto a la curva Q(T). Los caudales modelados sobreestiman a los obtenidos con los esquemas teóricos respectivos, en un orden del 30 % para el peor caso.

4.2.4.2 Variación de la profundidad del acuífero.

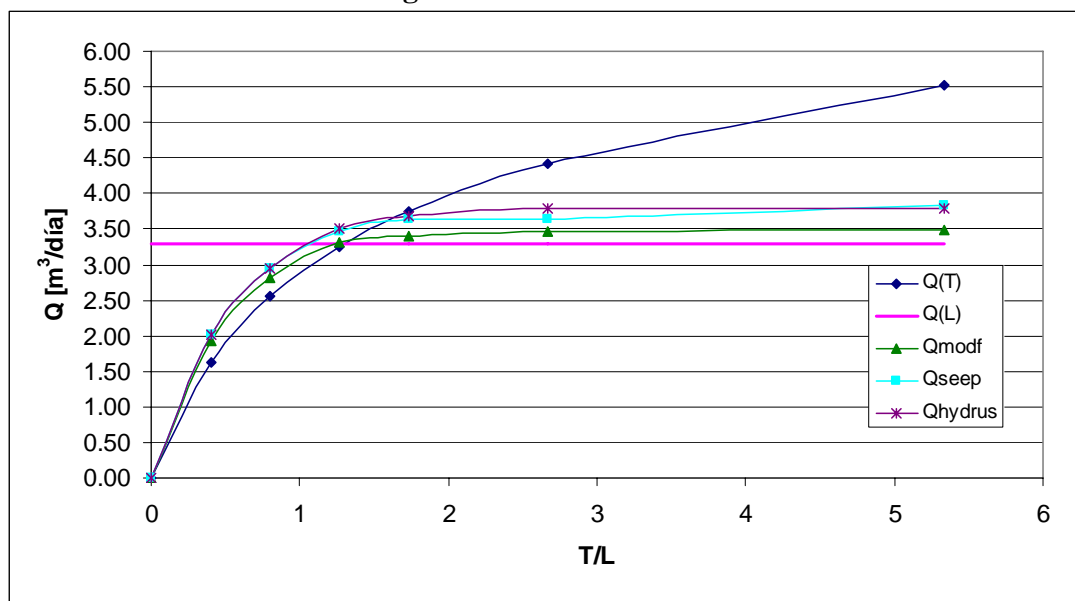
En el caso de la variación de la profundidad del acuífero se utilizó arbitrariamente un valor de $L = 75$ [m]. Se modeló para valores de T entre 30 y 400 [m]. La Tabla 4.10 muestra los caudales obtenidos con cada programa y según los esquemas teóricos.

Tabla 4.10. Efecto de la variación de la profundidad del acuífero en el caudal.

T [m]	L [m]	T/L -	Q(T) [m ³ /día]	Q(L) [m ³ /día]	Q _{modf} [m ³ /día]	Q _{seep} [m ³ /día]	Q _{hydrus} [m ³ /día]
0	75	0	0	3.28	0	0	0.00
30	75	0.40	1.62	3.28	1.93	2.02	2.01
60	75	0.80	2.56	3.28	2.82	2.96	2.95
95	75	1.27	3.25	3.28	3.31	3.46	3.50
130	75	1.73	3.74	3.28	3.39	3.64	3.69
200	75	2.67	4.42	3.28	3.47	3.63	3.79
400	75	5.33	5.52	3.28	3.48	3.84	3.80

La Figura 4.4 muestra los resultados en función del parámetro adimensional T/L.

Figura 4.4. Caudal v/s T/L



En este caso, es la curva Q(T) la que muestra un comportamiento creciente, pues la sección de flujo crece cada vez que se aumenta el valor de T. En el caso de Q(L), su valor es constante, pues el valor de L es constante.

Al igual que en el caso anterior, el punto de intersección entre las curvas Q(T) y Q(L) permite identificar 2 zonas en relación al comportamiento de los caudales modelados. A la izquierda de este punto los caudales muestran un comportamiento creciente para luego tender a una asíntota horizontal a la derecha de este punto.

En cuanto a los valores obtenidos para el caudal, las diferencias entre un programa y otro son del mismo orden de magnitud que en el caso anterior. Así, se observan discrepancias de un 5 a 10 % entre Q_{modf} y Q_{seep} y entre Q_{modf} y Q_{hydrus} . Para Q_{seep} y Q_{hydrus} las diferencias no son mayores al 2 %.

En cuanto a la comparación con los resultados teóricos, se observa que a la izquierda en el gráfico del punto de intersección entre las curvas $Q(L)$ y $Q(T)$, los resultados numéricos se asemejan mejor a la curva $Q(T)$, en tanto que a la derecha de este punto lo hacen a la curva $Q(L)$.

4.2.4.3 Comentarios generales.

La forma de las curvas obtenidas con los programas para la relación entre el caudal y el ancho o el caudal y la profundidad, puede ser explicada por la Ley de Darcy:

$$Q = k \cdot \frac{\Delta h}{\Delta l} \cdot A, \quad \text{donde}$$

- Q : Caudal pasante [m^3/s].
- k : Conductividad hidráulica [m/s].
- Δh : Diferencia de energía [m].
- Δl : Longitud de la línea media de flujo [m].
- A : Área de escurrimiento [m^2].

Al aumentar progresivamente el valor de L (o T), manteniendo constante el valor de T (o L) se incrementa el valor del área, pero al mismo tiempo, se incrementa la longitud de la línea media de flujo (Δl). En un principio, el aumento del área es mayor al aumento de Δl , con lo cual el caudal aumenta, pero a partir de cierto punto se produce un equilibrio tal que explica el comportamiento asintótico descrito.

Utilizando los resultados de este análisis es posible desarrollar una metodología para evaluar rápidamente el caudal utilizando las fórmulas del esquema teórico. Sean L^* y T^* , el ancho y espesor del problema. Primero se deben confeccionar las curvas $Q(L)$ y $Q(T^*)$ en función de L/T^* . Luego, calcular el valor de L/T^* y chequear si se encuentra a la izquierda o a la derecha del punto de intersección de las curvas. Si se encuentra a la izquierda el caudal corresponde a $Q(L)$, de lo contrario a $Q(T^*)$. Del mismo modo esta metodología se puede desarrollar considerando las curvas $Q(T)$ y $Q(L^*)$.

4.3 Flujo a través de una presa con dren horizontal al pie.

4.3.1 Introducción.

En este acápite se analizan los efectos sobre el caudal pasante de incluir la zona no saturada en el análisis del problema de flujo a través de una presa impermeable con dren al pie.

Se comparan los resultados que se obtienen usando un esquema analítico y MODFLOW, en cuyo caso sólo se considera la parte saturada del flujo, con los resultados de SEEP/W, los cuales incluyen la parte no saturada al análisis.

Para definir las propiedades hidrogeológicas que describen el comportamiento hidráulico en la zona no saturada se ha utilizado una batería de suelos incluida en las bases de datos de SEEP/W, HYDRUS-2D y ROSETTA. Las curvas $k(\psi)$ de los suelos utilizados se detallan en Anexos.

Se considera un problema con geometría fija en la cual se varía el tipo de material de la presa y otro en que se varía la longitud del dren.

Al comparar los resultados se considera que teóricamente la influencia de la zona no saturada es menor para suelos gruesos que para suelos finos, esto pues, en suelos finos se producen ascensos capilares mayores, los cuales inciden en que la conductividad hidráulica disminuya menos al aumentar la succión.

No se modela el problema descrito con el programa HYDRUS-2D, debido a que no es posible generar mallas que no sean rectangulares en la versión utilizada, por lo cual, no se puede aplicar a este caso.

4.3.2 Antecedentes generales y geometría.

Se considera el problema de flujo bidimensional en régimen permanente, a través de una presa de tierra de permeabilidad saturada k , fundada sobre base impermeable con un dren horizontal al pie. El material de la presa se considera homogéneo e isotrópico.

Las características geométricas del problema quedan definidas por el nivel del embalse H , la altura de la presa h_{presa} , la pendiente de la cara aguas arriba, el ancho de coronamiento Δ y la posición y longitud del dren (l_{dren}). La posición del dren se considera de modo que no se genere una superficie de drenaje en la cara de aguas abajo.

Las condiciones de borde del problema corresponden a carga hidráulica constante e igual a H en el contacto del embalse con la cara de aguas arriba y carga hidráulica nula en el dren, pues descarga en presión atmosférica y la cota $z = 0$ se define en la base de la presa. Para el resto del dominio, la condición de borde dependerá de si se considera sólo la zona saturada del flujo o bien las zonas saturada y no-saturada. En el primer caso, la posición de la línea freática constituye una condición de borde de no flujo. En el segundo caso, en la cara de aguas abajo corresponde una

condición de borde de tipo *Seepage face*, con la cual se verifica la inexistencia de superficies de drenaje. Para el resto de las caras, la condición de borde corresponde a flujo nulo.

Para el análisis de este problema, se considerarán los siguientes valores para las variables geométricas:

H : 15 [m.]

h_{presa} : 18 [m.]

Δ : 10 [m.]

Pendiente de la cara aguas arriba: 1:1.

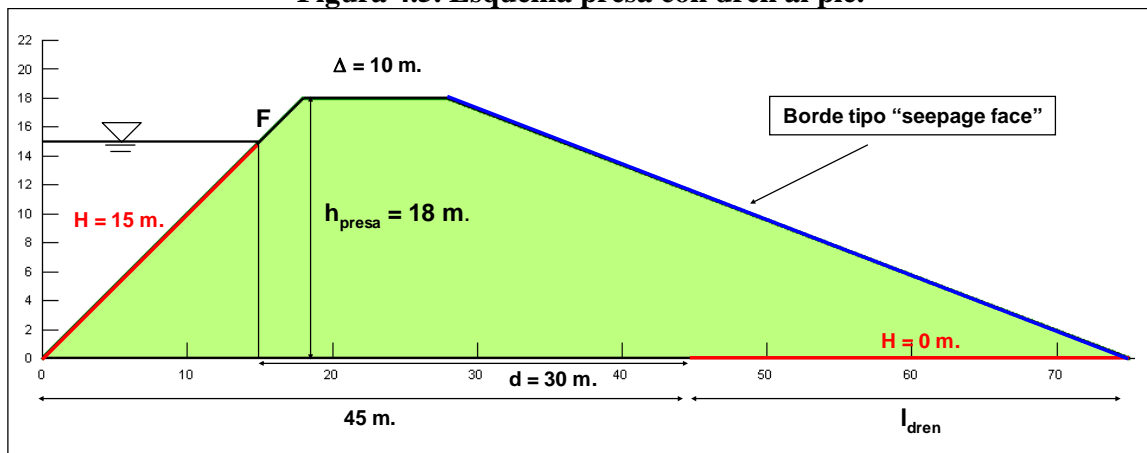
Posición del dren: A 45 [m.] desde el inicio de la presa.

Con esto, los únicos parámetros que se varían corresponden a la longitud del dren y las propiedades hidrogeológicas del material de la presa.

En general al caudal pasante se le denomina Q . Específicamente, los caudales pasantes obtenidos con el esquema analítico y MODFLOW se denominarán $Q_{\text{analítico}}$ y Q_{modf} respectivamente. En el caso de SEEP/W es posible diferenciar entre el caudal pasante que ocurre en la zona saturada y el que ocurre en la zona no saturada, los cuales se denominarán Q_{sat} y $Q_{\text{no-sat}}$ respectivamente. El caudal total pasante obtenido con SEEP/W se denotará como Q_{seep} y equivale a la suma de Q_{sat} y $Q_{\text{no-sat}}$. Estos caudales serán muchas veces comparados en función de su diferencia porcentual, según se la define en 4.2.2.

La Figura 4.5 muestra un esquema del problema a analizar.

Figura 4.5. Esquema presa con dren al pie.



4.3.3 Solución teórica.

La solución teórica del problema de flujo a través de una presa con dren horizontal al pie, descrito en 2.4.2, corresponde a una aproximación de la solución del problema descrito, puesto que la primera considera geometría parabólica para la cara de aguas arriba de la presa y no considera la zona no saturada del flujo. Sin embargo, es posible considerar que es lo suficientemente precisa como para representar la zona saturada del flujo y se utilizará para la estimación del caudal pasante.

Así, el caudal pasante queda dado por:

$$Q_{analítico} = k \cdot \left(\sqrt{d^2 + H^2} - d \right) \quad (4.1)$$

donde:

- $Q_{analítico}$: Caudal por unidad de ancho de la presa obtenido según la solución teórica.
- k : Permeabilidad saturada del material de la presa.
- d : Distancia entre la proyección del punto F en la base de la presa y el comienzo del dren (ver Figura 4.5).
- H : Nivel del embalse.

4.3.4 Solución utilizando MODFLOW.

4.3.4.1 Método de solución.

La solución del problema definido en este acápite determina dos zonas de ocurrencia del flujo, una saturada y otra no saturada. Al resolver este problema con MODFLOW sólo se considera la componente saturada del flujo.

Sería posible resolver este problema en la vista en corte de MODFLOW, pero ella es muy restrictiva en cuanto al número de “layers” que se pueden definir, lo que limita la posibilidad de construir mallas lo suficientemente finas. En comparación, sólo es posible crear 60 layers, en cambio se pueden crear hasta 499 columnas o filas. Por esta razón, se ha utilizado la vista en planta de MODFLOW para resolver el problema.

Es preciso señalar que es válido resolver este problema en la vista en planta de MODFLOW debido a que la ecuación de flujo en medios porosos saturados (2.3) no incluye explícitamente un término gravitatorio, pues el efecto de la gravedad está implícito en el valor de la carga hidráulica. Así la ecuación toma la misma forma ya sea utilizando el plano “x-y” o “x-z”

Al resolver en la vista en planta, MODFLOW no reconocerá si el medio está o no saturado, por lo cual, es necesario evaluar manualmente si esto se cumple. La condición de saturación es que la presión de poros sea positiva, o equivalentemente que la altura de presión lo sea. Así, utilizando la definición de carga hidráulica:

$$H = h + z, \text{ donde}$$

- H: carga hidráulica.
- h: altura de presión.
- z: cota geométrica.

De acuerdo a la expresión anterior, la condición de saturación se puede escribir como sigue:

$$H - z > 0 \quad (4.2)$$

Para resolver el problema se considerará que la coordenada “y” de la vista en planta de MODFLOW corresponde al eje vertical de la presa o dicho de otro modo “y” representará la cota geométrica “z”. MODFLOW define la coordenada “y” de cada celda en su punto central (esquema de bloques centrados). Se considera que la condición de saturación debe cumplirse para el punto de mayor cota en la celda, con lo cual la condición (4.2), para cada celda, se escribe como sigue:

$$H - \left(y + \frac{\Delta y}{2} \right) > 0, \text{ donde} \quad (4.3)$$

H: carga hidráulica en la celda.

y: cota de la celda.

Δy : discretización en el eje y.

Una celda también puede encontrarse parcialmente saturada, en cuyo caso cumplirá la condición (4.4).

$$y - \frac{\Delta y}{2} < H < y + \frac{\Delta y}{2} \quad (4.4)$$

Las celdas que cumplan esta última condición determinan la posición de la línea freática.

En cuanto a la coordenada “z” de MODFLOW se define un “layer” de espesor 1 m., con lo cual los resultados obtenidos para el caudal se expresan en [m³/día/m].

La condición de borde en el dren no se puede definir como H = 0 m, ya que MODFLOW exige que los valores de H sean mayores a la menor elevación del modelo. Así, se ha decidido entregar un valor de H correspondiente a la coordenada “y” de MODFLOW en las celdas del dren.

Los pasos a seguir para resolver el problema son los siguientes:

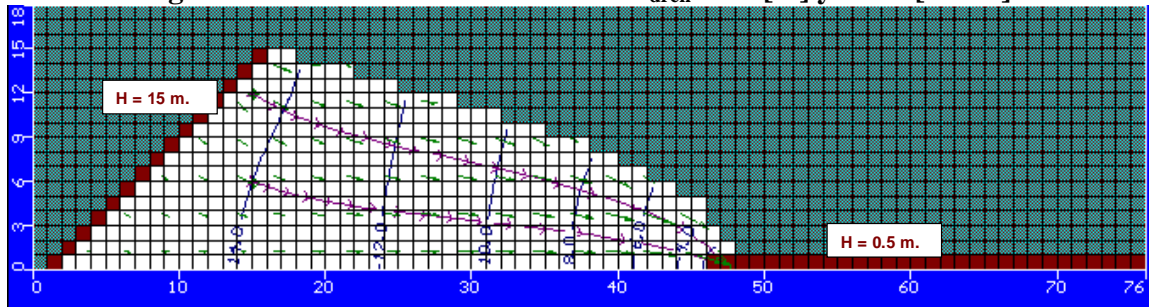
1. Plantear una aproximación inicial de la posición de la línea freática, lo que define el dominio de solución, y luego ejecutar el modelo.
2. Desactivar las celdas que no cumplan las condiciones 4.3 y 4.4, es decir, las condiciones de saturación y de saturación parcial.
3. Reactivar las celdas que se encuentren justo sobre una celda activa que cumple la condición 4.3, es decir, que está completamente saturada.
4. Si es que 2 celdas consecutivas a lo largo de una columna cumplen con la condición 4.4, se debe desactivar la celda superior. Con esto, la posición de la línea freática queda determinada por la celda activa de mayor cota en cada columna.
5. Volver a ejecutar el programa.

Repetir los pasos 2 a 5 hasta que no sea necesario reincorporar o eliminar celdas.

4.3.4.2 Solución considerando $l_{dren} = 30$ [m] y $k = 1$ [m/día].

A modo de ejemplo, en la Figura 4.6 se muestra la solución obtenida considerando $l_{dren} = 30$ [m] y $k = 1$ [m/día]. Las condiciones de borde se señalan en marrón y las líneas equipotenciales en azul, separadas cada 2 m., desde un valor de 14 m. hasta 4 m. También se dibujan las trayectorias de 2 partículas ubicadas longitudinalmente a 15 m. del inicio de la base de la presa y a alturas de 12 y 6 m. En verde se muestra el campo de velocidades. Notar que la condición de borde en el dren corresponde a $H = 0.5$ m. y no $H = 0$ m, según lo explicado en 4.3.4.1.

Figura 4.6. Solución en MODFLOW. $l_{dren} = 30$ [m] y $k = 1$ [m/día].



Se obtiene un valor de $Q_{modf} = 3.14$ [m³/día/m].

4.3.4.3 Sensibilidad a la discretización de la malla.

Se estudió el efecto del tamaño de la grilla en el caudal pasante. Se consideró una geometría con $l_{dren} = 10$ [m] y se adoptó arbitrariamente el valor de 1 [m/día] para k . Se calcula la diferencia porcentual del caudal obtenido con cada malla con respecto a su anterior más gruesa, a la cual se le denomina ΔQ .

Los resultados se pueden apreciar en la Tabla 4.11.

Tabla 4.11. Efecto del tamaño de la grilla en el caudal pasante. MODFLOW.

Q_{modf} [m ³ /día/m]	$\Delta x = \Delta y$ [m]	Nº de celdas -	ΔQ [%]
3.16	1	1008	
3.17	0.5	4032	0.3
3.15	0.25	16128	-0.6

Se aprecia que la variación producida por el refinamiento de la malla no es significativa, por lo cual es posible resolver este problema de manera precisa, en lo que respecta al caudal, con un número pequeño de celdas.

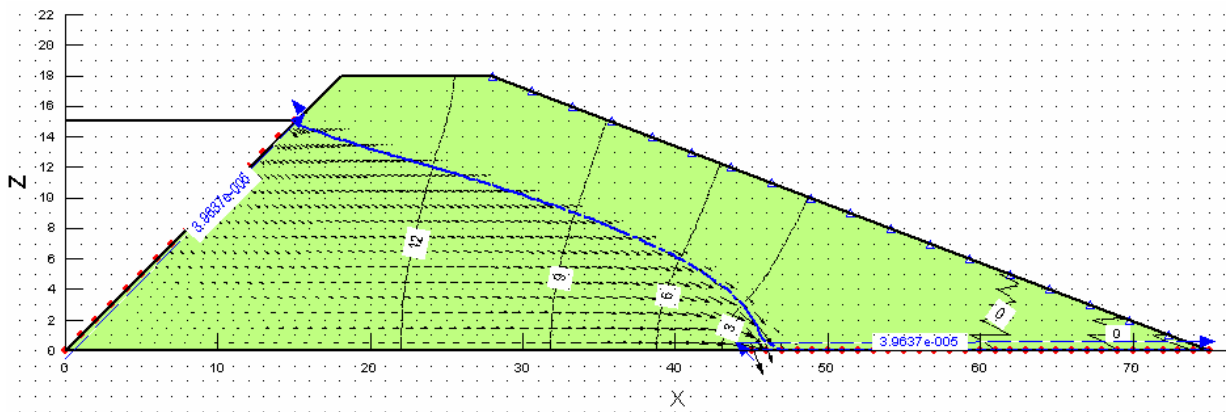
4.3.5 Solución utilizando SEEP/W.

La solución que se obtiene con SEEP/W tiene en cuenta tanto la zona saturada como no saturada del flujo. Por esto, a diferencia de MODFLOW, en este caso es necesario definir las propiedades hidrogeológicas del suelo no saturado.

Para resolver este problema con SEEP/W no es necesaria ninguna metodología especial como en el caso de MODFLOW, sino que simplemente se debe construir el modelo de acuerdo a la metodología general explicada en el capítulo 3.2.

La Figura 4.7 muestra la solución obtenida considerando $l_{\text{dren}} = 30$ [m] y $k_s = 1$ [m/día]. El suelo utilizado corresponde a una arena de la base de datos de HYDRUS-2D, cuya curva $k(\psi)$ se modifica para obtener $k_s = 1$ [m/día]. Se muestran líneas equipotenciales cada 3 m., la posición de la línea freática en azul y el campo de velocidades.

Figura 4.7. Solución en SEEP/W. $l_{\text{dren}} = 30$ [m] y $k_s = 1$ [m/día].



Se obtiene un valor de $Q_{\text{seep}} = 3.42$ [m³/día/m].

4.3.5.1 Sensibilidad al tipo de construcción de la malla.

La malla generada en SEEP/W variará según como se construyan las regiones del modelo. Se estudiarán 2 tipos de malla con el fin de determinar la más adecuada para realizar los análisis que siguen. La Figura 4.8 y la Figura 4.9 muestran los dos tipos de malla a estudiar, a las cuales se les llamará malla tipo 1 y 2 respectivamente.

La malla tipo 1 se define creando una sola región para toda la presa. La discretización se define utilizando un valor de $\Delta x = 1$ m. para la base de la presa y $\Delta y = 1$ m. para los nodos de las caras.

En la malla tipo 2 se crean 3 regiones, denotadas con los números 1, 2 y 3 en la Figura 4.9. Las regiones 1 y 3 son de geometría triangular y la 2 es rectangular. La discretización se definió de modo tal que en la base de la región 3 se tuviera $\Delta x = 1$ m. En cuanto al eje “y”, la malla se definió de modo tal que los elementos fueran idealmente cuadrados, sin embargo, el ajuste de la forma de la malla realizado por los algoritmos de SEEP/W no permite que esto se logre.

Figura 4.8. Malla tipo 1.

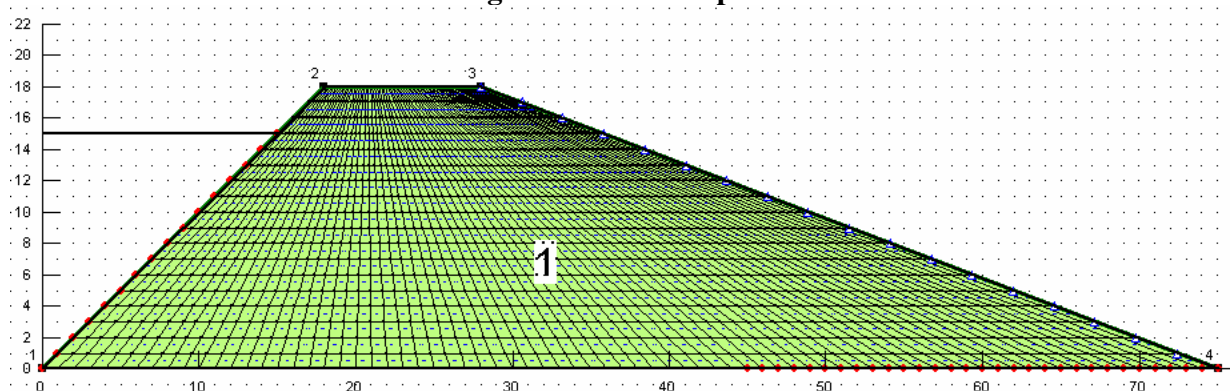
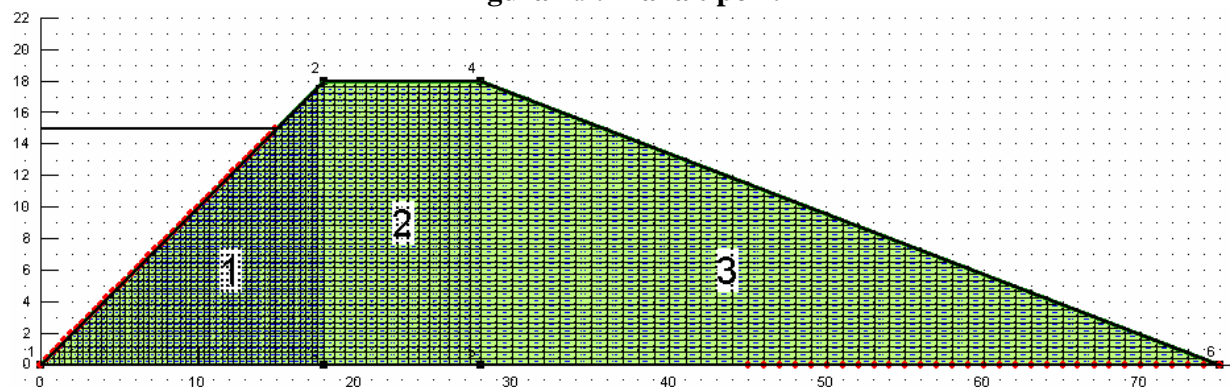


Figura 4.9. Malla tipo 2.



Para comparar el funcionamiento de estos tipos de malla, se ha modelado para $l_{\text{dren}} = 30$ [m]. El suelo considerado es una arena, obtenida de la base de datos de HYDRUS-2D ($k_s = 7.13$ [m/día]). Se calcula el caudal total pasante (Q_{seep}) y el caudal pasante en la zona saturada (Q_{sat}). Estos caudales son comparados con los caudales obtenidos utilizando MODFLOW.

Como el suelo utilizado es una arena, se espera verificar que el aporte de flujo que ocurre en la zona no saturada sea muy pequeño en relación al aporte de la zona saturada. De este modo, los caudales Q_{seep} y Q_{sat} deberían ser similares y además parecidos a Q_{modf} , pues éste último representa la zona saturada del flujo.

Los resultados obtenidos para la malla tipo 1 se muestran en la Tabla 4.12.

Tabla 4.12. Caudales pasantes. Malla tipo 1.

Q_{seep} [m ³ /día/m]	Q_{sat} [m ³ /día/m]	Q_{modf} [m ³ /día/m]	$\Delta Q_{seep-modf}$ [%]	$\Delta Q_{sat-modf}$ [%]
23.23	23.18	22.38	3.8	3.5

Los resultados obtenidos para la malla tipo 2 se muestra en la Tabla 4.13

Tabla 4.13. Caudales pasantes. Malla tipo 2.

Q_{seep} [m ³ /día/m]	Q_{sat} [m ³ /día/m]	Q_{modf} [m ³ /día/m]	$\Delta Q_{seep-modf}$ [%]	$\Delta Q_{sat-modf}$ [%]
22.92	14.4	22.38	2.4	-35.6

En el caso de Q_{seep} ambos tipos de malla muestran resultados muy similares, los cuales difieren en porcentajes menores al 4 % respecto al resultado obtenido con MODFLOW, lo cual resulta coherente con lo esperado. Sin embargo, en relación a Q_{sat} , los resultados obtenidos difieren. Para la malla tipo 1 se observa una pequeña diferencia porcentual respecto al valor de MODFLOW, pero para la malla tipo 2, el valor de Q_{sat} es un 35.6 % menor al calculado con MODFLOW. Así, se concluye que ambas mallas resultan adecuadas para obtener el caudal total pasante, pero la malla tipo 2 falla en el cálculo de Q_{sat} .

Por lo tanto, en general, en el caso que se desee calcular los caudales totales pasantes no es necesario un análisis demasiado riguroso respecto al tipo de malla, pero si desea realizar un análisis más fino para diferenciar el aporte saturado del aporte no saturado, es preciso hacer una revisión más exhaustiva del tipo de malla a utilizar.

En lo que sigue se precisa diferenciar el aporte de la zona saturada y no saturada, por lo cual se usará la malla tipo 1 de aquí en adelante.

4.3.5.2 Sensibilidad a la discretización de la malla.

Se estudió el efecto del tamaño de la grilla en Q_{seep} y Q_{sat} . Se consideró una longitud del dren de 30 m. El suelo considerado corresponde a una arena de la base de datos de HYDRUS 2-D.

El refinamiento de la malla se realizó disminuyendo el valor de Δx en la base de la presa, pero manteniendo el valor de Δy en las caras. Se calcula la diferencia porcentual del caudal obtenido con cada malla con respecto a su anterior más gruesa, a la cual se le denomina ΔQ_{seep} en el caso del cálculo de Q_{seep} y ΔQ_{sat} en el caso de Q_{sat} .

Los resultados se muestran en la Tabla 4.14.

Tabla 4.14. Efecto del tamaño de la grilla en el caudal pasante. SEEP/W.

Q_{seep} [m ³ /s/m]	Q_{sat} [m ³ /s/m]	Δx [m]	N° de elementos -	ΔQ_{seep} [%]	ΔQ_{sat} [%]
23.23	23.18	1	1350	-	-
23.19	22.40	0.5	2700	-0.16	-3.36
23.19	22.16	0.25	5400	0	-1.07

Se considera que con un número de entre 1000 y 2000 elementos se alcanza un valor aceptable tanto para Q_{seep} como para Q_{sat} , puesto que las variaciones producidas por el refinamiento de la malla no superan el 1 % en el caso de Q_{seep} y el 4 % en el caso de Q_{sat} .

4.3.6 Análisis para distintos tipos de suelo.

4.3.6.1 Introducción.

Si sólo se considera el flujo en la zona saturada, el caudal pasante depende únicamente de la conductividad hidráulica del material de la presa, pero al considerar tanto la zona saturada como no saturada, el caudal pasante dependerá, además del valor de k , de la forma de la curva $k(\psi)$.

Para analizar el efecto en el caudal pasante de las propiedades hidrogeológicas del material de la presa, se modeló con MODFLOW y SEEP/W para una variedad de suelos incluidos en las bases de datos disponibles (ROSETTA, HYDRUS-2D y SEEP/W). Se utiliza un valor de $l_{dren} = 30$ [m].

Luego, se comparan los resultados obtenidos con MODFLOW, SEEP/W y el método analítico.

4.3.6.2 Caudal pasante.

La Tabla 4.15 muestra los resultados obtenidos con el esquema analítico, MODFLOW y SEEP/W. Se exhiben los valores de caudal pasante y diferencia porcentual entre los valores obtenidos con MODFLOW y SEEP/W.

Tabla 4.15. Resultados de caudal pasante para distintos tipos de suelo.

Tipo de suelo	Suelo	k_s [m/s]	$Q_{analítico}$ [m ³ /día/m]	Q_{modf} [m ³ /día/m]	Q_{seep} [m ³ /día/m]	$\Delta Q_{seep-modf}$ [%]
ARENAS	Arena uniforme (SEEP/W)	1.00E-04	26.96	27.13	30.76	13.4
	Arena (HYDRUS 2-D)	8.25E-05	22.24	22.38	23.23	3.8
	Arena (ROSETTA)	7.44E-05	20.05	20.18	21.30	5.5
	Arena fina uniforme #1 (SEEP/W)	2.15E-05	5.80	5.83	6.36	9.1
	Arena fina uniforme #2 (SEEP/W)	1.13E-06	0.30	0.31	0.32	5.9
	Arena muy fina (SEEP/W)	2.00E-08	5.39E-03	5.43E-03	5.85E-03	7.8
ARCILLAS	Arcilla(ROSETTA)	1.71E-06	0.46	0.46	0.49	6.1
	Arcilla (HYDRUS 2-D)	5.56E-07	0.15	0.15	0.16	7.9
	Arcilla bien graduada # 3 (SEEP/W)	7.00E-10	1.89E-04	1.90E-04	2.22E-04	17.1
LIMO	Limo(ROSETTA)	5.06E-06	1.37	1.37	1.52	10.5
	Limo #2 (SEEP/W)	1.00E-06	0.27	0.27	0.35	27.3
	Limo (HYDRUS 2-D)	6.94E-07	0.19	0.19	0.20	5.7
	Limo (SEEP/W)	2.50E-07	6.74E-02	6.78E-02	8.41E-02	24.1
	Limo (Relaves) (SEEP/W)	5.80E-08	1.56E-02	1.57E-02	1.92E-02	21.8
	Limo uniforme (SEEP/W)	1.00E-08	2.70E-03	2.71E-03	4.82E-03	77.7

Los resultados muestran que, en términos generales, las mayores diferencias de caudal se dan en suelos finos, esto es, arcillas y limos. También se observa que existe variabilidad dentro de un mismo tipo de suelo, encontrándose limos con diferencias porcentuales en un rango del 5.7 a 77.7 %.

Es posible apreciar además que la diferencia entre el resultado de MODFLOW y el del esquema analítico es muy pequeña ($\Delta Q_{\text{modf-analítica}} = 0.64 \%$). Esto reafirma la hipótesis inicial de que la solución teórica representa de buena manera la parte saturada del flujo.

4.3.6.3 Caudal pasante en la zona saturada.

Los resultados de SEEP/W serán coherentes en el caso que representen de buena manera la zona saturada del flujo. Para evaluar esto, se comparan los caudales obtenidos con SEEP/W, sólo en la zona saturada (Q_{sat}), con los caudales obtenidos con MODFLOW y el esquema analítico

La Tabla 4.16 muestra la comparación entre los caudales pasantes en la zona saturada obtenidos con SEEP/W, MODFLOW y el esquema analítico.

Tabla 4.16. Resultados de caudal pasante en la zona saturada para distintos tipos de suelo.

Tipo de suelo	Suelo	k_s [m/s]	$Q_{\text{analítico}}$ [m ³ /día/m]	Q_{modf} [m ³ /día/m]	Q_{sat} (SEEP) [m ³ /día/m]	$\Delta Q_{\text{sat-modf}}$ [%]
ARENAS	Arena uniforme (SEEP/W)	1.00E-04	26.96	27.13	25.97	-4.3
	Arena (HYDRUS 2-D)	8.25E-05	22.24	22.38	23.18	3.5
	Arena (ROSETTA)	7.44E-05	20.05	20.18	20.47	1.4
	Arena fina uniforme #1 (SEEP/W)	2.15E-05	5.80	5.83	5.76	-1.3
	Arena fina uniforme #2 (SEEP/W)	1.13E-06	0.30	0.31	0.31	0.9
	Arena muy fina (SEEP/W)	2.00E-08	5.39E-03	5.43E-03	5.38E-03	-0.8
ARCILLAS	Arcilla(ROSETTA)	1.71E-06	0.46	0.46	0.47	1.0
	Arcilla (HYDRUS 2-D)	5.56E-07	0.15	0.15	0.15	-1.0
	Arcilla bien graduada # 3 (SEEP/W)	7.00E-10	1.89E-04	1.90E-04	1.75E-04	-7.9
LIMO	Limo(ROSETTA)	5.06E-06	1.37	1.37	1.33	-3.1
	Limo #2 (SEEP/W)	1.00E-06	0.27	0.27	0.24	-11.0
	Limo (HYDRUS 2-D)	6.94E-07	0.19	0.19	0.19	1.2
	Limo (SEEP/W)	2.50E-07	6.74E-02	6.78E-02	6.06E-02	-10.7
	Limo (Relaves) (SEEP/W)	5.80E-08	1.56E-02	1.57E-02	1.47E-02	-6.8
	Limo uniforme (SEEP/W)	1.00E-08	2.70E-03	2.71E-03	1.65E-03	-39.1

En el caso de las arenas no se observan diferencias significativas entre Q_{modf} y Q_{sat} .

En cuanto a arcillas y limos, salvo el caso del suelo “Limo uniforme”, se observan diferencias algo mayores al caso de las arenas, pero también se puede considerar que no son significativas, pues son siempre menores al 11 %. La gran diferencia obtenida en el caso del limo uniforme puede ser explicada al observar el campo de velocidades de la solución (Figura 4.12), que muestra que existe un gran flujo de la zona saturada hacia la zona no saturada, con lo cual el valor de Q_{sat} disminuye considerablemente.

En general, los valores de Q_{sat} son menores a Q_{modf} , lo cual tiene sentido pues al considerar la zona no saturada, se produce un flujo desde la zona saturada hacia la zona no saturada.

Con esto se concluye que SEEP/W representa de buena manera la parte saturada del problema.

4.3.6.4 Comparación de campos de velocidades entre 3 suelos utilizando SEEP/W.

Se muestran los campos de velocidades para los siguientes suelos: Arena (HYDRUS-2D), Arcilla bien graduada #3 (SEEP/W) y Limo uniforme (SEEP/W).

Figura 4.10. Campo de velocidades. Arena (HYDRUS-2D).

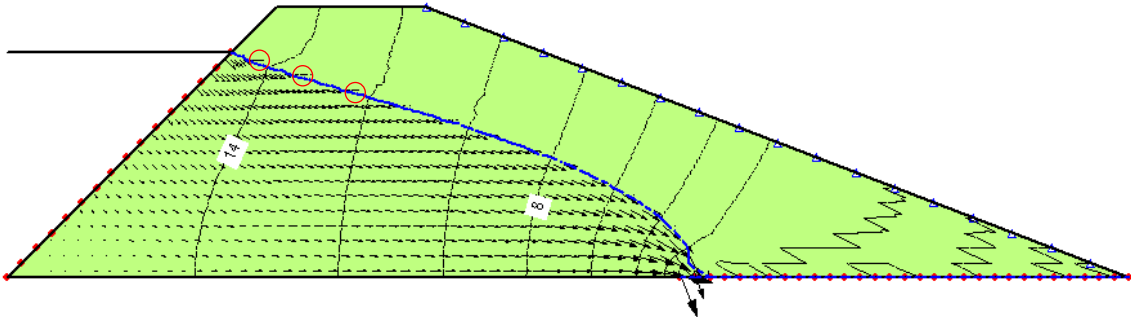


Figura 4.11. Campo de velocidades. Arcilla bien graduada #3 (SEEP/W).

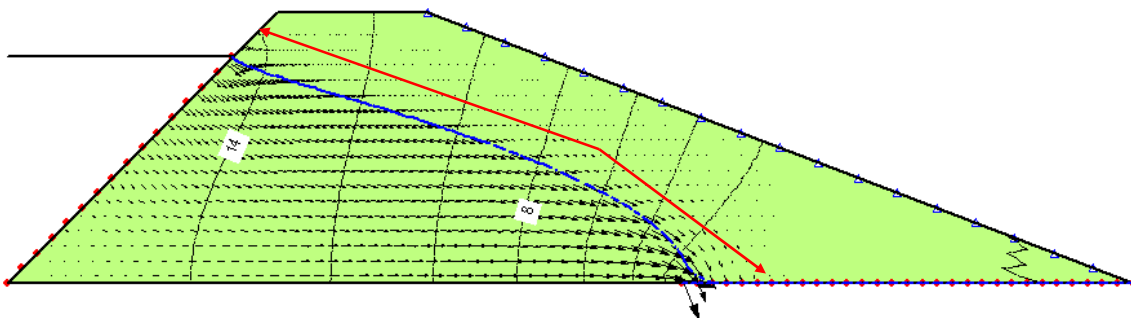
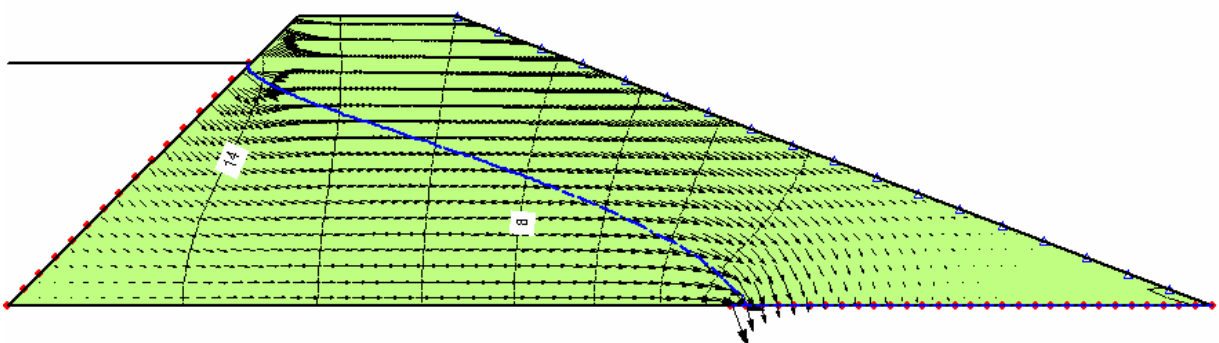


Figura 4.12. Campo de velocidades. Limo uniforme (SEEP/W).



La visualización de los campos de velocidades permite explicar las diferencias de caudal que se observan entre un suelo y otro. Se puede apreciar que mientras mayor sea esta diferencia, mayor importancia adquiere la zona no saturada del flujo.

Así, para el caso de la arena se observa que existen sólo pequeñas zonas de flujo en la zona no saturada, las cuales están marcadas por círculos de color rojo. Para la arcilla se observa un aporte no saturado bastante mayor al caso de la arena, el cual se muestra enmarcado entre la línea freática y las líneas rojas de la Figura 4.11.

En el caso del limo uniforme, se observa un importante flujo en casi toda el área de la presa, lo que explica la alta diferencia en este caso entre Q_{modf} y Q_{seep} .

4.3.6.5 Comparación de curvas $k(\psi)$ para suelos de similar k_s .

A pesar de que en la Tabla 4.15 se observa que, en términos generales, el aporte de la zona no saturada es mayor en los suelos finos, los cuales a su vez se relacionan con menores valores de k_s , no siempre el aporte no saturado estará relacionado con dicho valor, sino más bien con la forma de la curva $k(\psi)$.

A continuación, se comparan dos suelos de similar valor de k_s , pero con curvas $k(\psi)$ marcadamente distintas, lo cual genera resultados también significativamente opuestos.

La Figura 4.13 muestra la curva $k(\psi)$ del suelo arena muy fina # 4 ($k_s = 2 \cdot 10^{-8}$) y la Figura 4.14 muestra la curva del suelo limo uniforme ($k_s = 1 \cdot 10^{-8}$) .

Figura 4.13. Función $k(\psi)$. Arena muy fina #4.

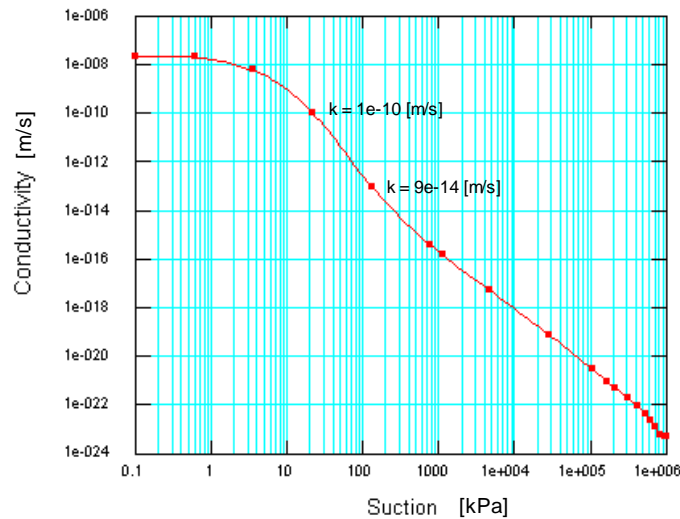
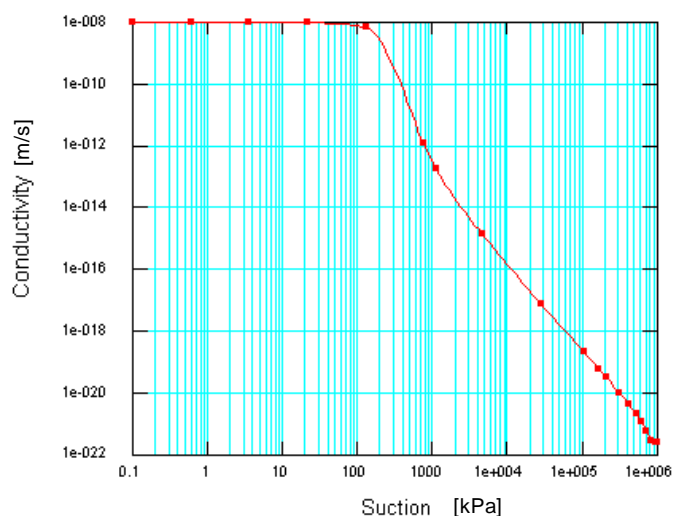


Figura 4.14. Función $k(\psi)$. Limo uniforme.



La curva $k(\psi)$ de la arena fina se caracteriza por un descenso relativamente rápido de la conductividad al aumentar la succión, disminuyendo alrededor de 2 órdenes para una succión de 20 [kPa], y 6 órdenes para una succión de 100 [kPa]. En cambio, en la curva del limo uniforme el valor de k permanece invariable hasta un valor de 100 [kPa].

El descenso rápido de la conductividad determina que el aporte de la zona no saturada sea mucho menor en comparación con el caso en que permanezca constante, lo cual explica las diferencias porcentuales entre los resultados obtenidos con SEEP/W y MODFLOW para ambos suelos (7.8 % en el caso de la arena fina v/s 77.7 % en el caso del limo).

4.3.7 Análisis de la variación de la longitud del dren.

Se estudió el efecto sobre el caudal pasante de variar la longitud del dren para 3 suelos escogidos de la base de datos de SEEP/W.

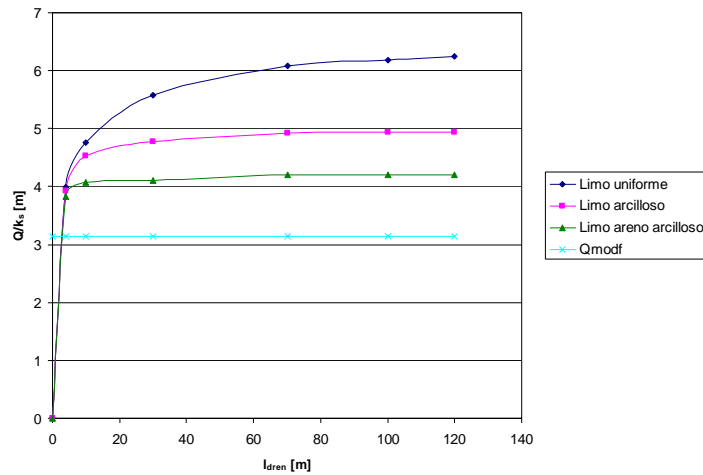
Los suelos utilizados se muestran en la Tabla 4.17.

Tabla 4.17. Suelos utilizados.

Suelo	k_s [m/s]
Limo areno arcilloso	$1.5 \cdot 10^{-8}$
Limo arcilloso	$8.4 \cdot 10^{-9}$
Limo uniforme	$1 \cdot 10^{-8}$

Los resultados se muestran en la Figura 4.15,

Figura 4.15. Q_{seep}/k_s v/s l_{dren} .



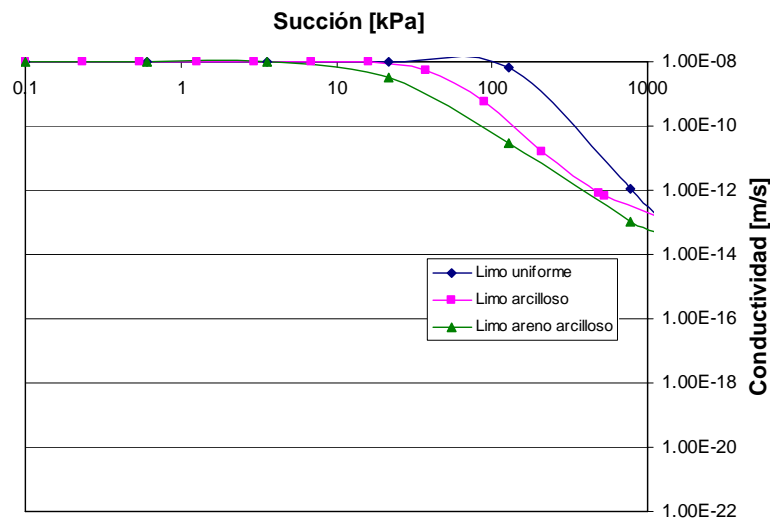
Para independizar los resultados del valor de k_s , éstos se presentan en función de Q/k_s .

Se observa que los suelos se comportan de manera similar para valores pequeños de l_{dren} , pero al aumentar el valor de l_{dren} , las curvas se separan y se aprecian mayores caudales para el limo uniforme seguido del limo arcilloso y los menores caudales para el limo areno arcilloso.

En todos los casos, para cierto valor de l_{dren} , el caudal deja de aumentar y tiende a una asíntota horizontal.

Nuevamente, es posible recurrir a las curvas $k(\psi)$ de cada suelo para explicar el comportamiento observado. La Figura 4.16 muestra las curvas de los 3 suelos considerados.

Figura 4.16. Curvas $k(\psi)$ para los suelos utilizados.



Se observa que para valores de succión menores a 10 [kPa], las 3 curvas mantienen un valor de conductividad constante. Al aumentar la succión las 3 curvas se separan y el limo uniforme

muestra mayores valores de conductividad, seguido del limo arcilloso y finalmente el limo areno arcilloso con las menores conductividades.

Para valores pequeños de l_{dren} , los valores de succión se encuentran en el rango en que sus curvas $k(\psi)$ son similares, por lo cual los caudales observados son similares. Luego, al aumentar el valor de l_{dren} , los suelos se diferencian en su comportamiento, pues las curvas $k(\psi)$ lo hacen. Los mayores caudales se producen en los suelos con mayores valores de conductividad para valores más altos de succión. Finalmente para cierto valor de l_{dren} , las succiones que se producen son tan altas que no influyen en el caudal, ya que las conductividades asociadas son muy pequeñas, lo cual explica el comportamiento asintótico de los caudales.

5 Aplicación a un caso real

5.1 Introducción.

En el presente capítulo se describen los procesos de desarrollo conceptual, elaboración de modelos de flujo y el cálculo de filtraciones a través de los muros de un tranque de relaves diseñado para un proyecto de explotación de la minería del cobre ubicado en la zona norte de nuestro país.

Para la disposición de los relaves generados por el proyecto, se contempla la construcción de 5 muros de contención, para los cuales se desea calcular las filtraciones que pueden producirse a través de ellos.

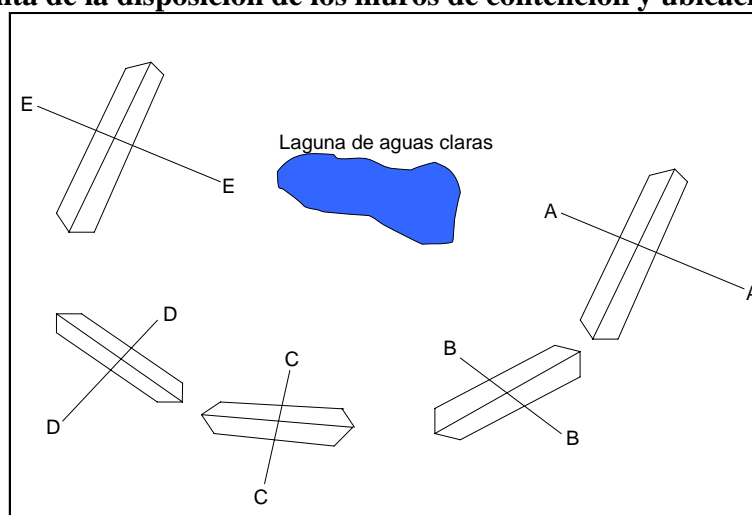
Para la elaboración de los modelos de flujo se utilizan los programas MODFLOW y SEEP/W.

5.2 Antecedentes generales.

Para el cálculo de las filtraciones se ha considerado un perfil vertical representativo para cada muro, los cuales corresponden a 5 situaciones extremas, en cuanto a la ubicación y cota de la laguna de aguas claras, según se ha determinado en el diseño del proyecto.

La Figura 5.1 muestra un dibujo esquemático de la disposición de los muros de contención y la ubicación de los perfiles a analizar.

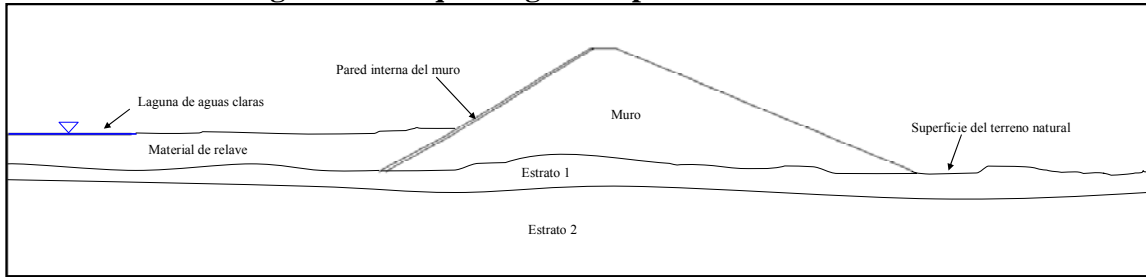
Figura 5.1. Planta de la disposición de los muros de contención y ubicación de los perfiles.



Fuente: Elaboración propia.

La Figura 5.2 muestra el esquema general que permite describir las características más relevantes de los perfiles considerados.

Figura 5.2. Esquema general perfiles de los muros.



Fuente: Elaboración propia.

5.3 Datos utilizados.

La información básica con que se cuenta para el cálculo de los caudales de filtración es la siguiente:

- Geometría de los perfiles AA a EE.
- Ubicación de laguna de aguas claras con respecto a muro de tranque de relaves y cota del pelo de agua.
- Conductividades hidráulicas para terreno natural estimadas a partir de las experiencias de Lefranc y Lugeon en sondajes de explotación.

5.3.1 Distancia a laguna aguas claras y cota del pelo de agua.

La información de distancias a la laguna de aguas claras y la cota de agua correspondiente se incluye en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1. Distancia a laguna de aguas claras y cota del pelo de agua.

PERFIL	Distancia [m]	Cota agua [m.s.n.m]
AA	200	1192
BB	0	1114
CC	200	1114
DD	1200	1192
EE	550	1192

5.3.2 Datos geométricos de interés.

La longitud de la base de los muros y su altura media se resumen en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2. Base y altura media de los muros.

PERFIL	Base [m]	Altura [m]
AA	340	85
BB	580	75
CC	430	100
DD	260	70
EE	220	60

5.3.3 Conductividades hidráulicas.

La información de conductividades hidráulicas para los elementos de diseño de los muros se resume en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3. Conductividades hidráulicas de saturación para los elementos de diseño de los muros.

MATERIAL	k_s [m/s]
Muro de estéril	10^{-2}
Material de Relave	10^{-8}
Pared interna tranque de relaves	10^{-4}

En cuanto a los materiales o suelos naturales ubicados en cada perfil, la información correspondiente se presenta en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4. Conductividades hidráulicas de saturación para los suelos naturales.

Material	Profundidad [m]	k_s [m/s]
Perfil AA		
Gravas arenosas	0 a 25	10^{-5}
Macizo rocoso	25 a 45	10^{-7}
Macizo rocoso	> 45	10^{-8}
Perfil BB		
Estrato 1	0 a 10	10^{-6}
Estrato 2	> 10	10^{-7}
Perfil CC		
Estrato 1	0 a 10	10^{-6}
Estrato 2	> 10	10^{-7}
Perfil DD		
Estrato 1	0 a 10	10^{-6}
Estrato 2	> 10	10^{-7}
Perfil EE (sin cortina de inyecciones)		
Estrato 1	0 a 15	10^{-4}
Estrato 2	15 a 20	10^{-6}
Estrato 3	> 20	10^{-8}
Perfil EE (con cortina de inyecciones)		
Estrato 1	0 a 15	10^{-6}
Estrato 2	15 a 20	10^{-7}
Estrato 3	> 20	10^{-8}

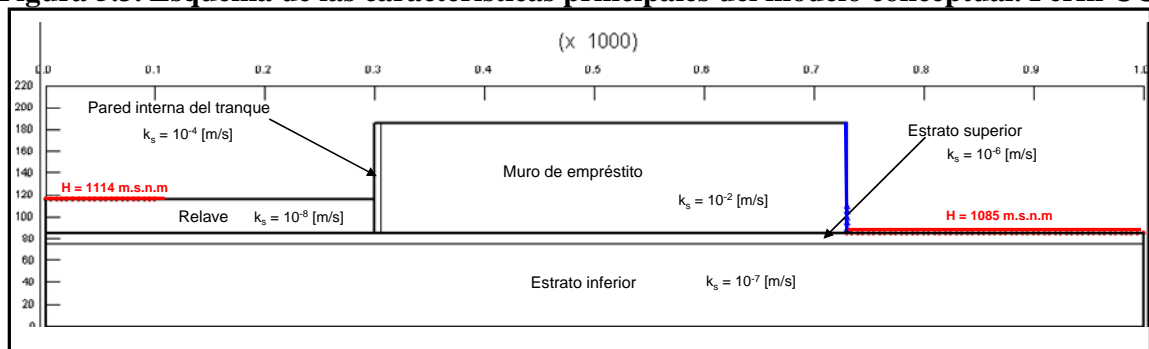
5.4 Modelo conceptual.

Para la construcción del modelo de flujo se han considerado las siguientes hipótesis simplificadoras:

- Estratos de suelo natural se consideran homogéneos y de espesor constante.
- Extensión de la laguna de aguas claras igual a 100 m.
- Como condición de borde de aguas arriba se considera la ubicación y cota de la laguna de aguas claras.
- Como condición de borde de aguas abajo se considera que el agua no debería superar la cota de terreno al pie de la presa (condición extrema).
- En base a la realización de un análisis de sensibilidad, el cual se detalla en 5.5.2, se ha observado que la definición de una pendiente en las caras del muro no influye en la determinación de los caudales de filtración. Por lo tanto, no se considerarán dichas pendientes.

La Figura 5.3 muestra las características principales del modelo para el caso del perfil CC.

Figura 5.3. Esquema de las características principales del modelo conceptual. Perfil CC.



Fuente: Elaboración propia.

Nota: En azul se indica la condición de borde de tipo *Seepage face*.

5.5 Construcción del modelo.

5.5.1 Introducción.

En base al modelo conceptual definido se construye el modelo de flujo en MODFLOW y en base a éste se construye un modelo análogo en SEEP/W.

Al simplificar el problema real se deben tomar decisiones, como por ejemplo que cota considerar al pie de la presa, dado que la geometría del terreno es irregular. A continuación se estudia como

influyen la definición de algunos parámetros del problema en los resultados que se obtienen, específicamente, en los valores del caudal pasante, que es la variable que se desea determinar.

Para que los resultados obtenidos sean comparables, los modelos deben ser análogos en cuanto a la definición de los parámetros mencionados. Se utiliza MODFLOW para definir el valor de los parámetros y en base a éste se construye el modelo en SEEP/W.

5.5.2 Análisis de sensibilidad a las variables de definición del problema.

Utilizando MODFLOW se analizó el efecto en el caudal pasante del valor de la diferencia de energía entre la cota de agua en la laguna y el nivel de terreno al pie de la presa (ΔH), la discretización, el espesor del estrato, la profundidad del relleno y la extensión de terreno aguas abajo.

Para el análisis, se utilizan los datos del Perfil CC.

Los valores de los parámetros utilizados como caso base se muestran en la Tabla 5.5:

Tabla 5.5. Valores de parámetros para caso base. Perfil CC.

Variable	Valor	Unidad
ΔH	29	[m]
$\Delta x = \Delta y$	5	[m]
Espesor Estrato 1	10	[m]
Profundidad del relleno	85	[m]
Extensión aguas abajo	270	[m]

El caudal de filtración obtenido para el caso base corresponde a $Q_{\text{modf}} = 0.05704 \text{ [m}^3/\text{día/m]}$

Los resultados obtenidos al variar los parámetros de definición del problema se muestran en la Tabla 5.6. El caudal obtenido al variar un parámetro se denota Q'_{modf} y ΔQ corresponde a la diferencia porcentual de Q'_{modf} respecto a Q_{modf} .

Tabla 5.6. Resultados variación de parámetros de definición del modelo.

Variable modificada	Valor [m]	Q_{modf} [m ³ /día/m]	Q'_{modf} [m ³ /día/m]	ΔQ [%]
ΔH	24	0.05704	0.04400	-22.9
$\Delta x = \Delta y$	2.5	0.05704	0.05505	-3.5
Espesor Estrato 1	20	0.05704	0.06269	9.9
T	185	0.05704	0.06123	7.3
Extensión aguas abajo	470	0.05704	0.05710	0.1

Según lo que se observa en la Tabla 5.6, el parámetro que provoca la mayor variación de caudal corresponde a ΔH . De este modo, para maximizar el caudal (situación más desfavorable), se opta por elegir la menor cota al pie de la presa de acuerdo a la información disponible.

Otro factor que adquiere importancia en la definición del problema es el espesor del estrato superior. Al variar este espesor de 10 a 20 m., se produce un aumento de un 9.9 % en el caudal. Por otra parte, al aumentar la profundidad del relleno en 100 m. se observa un aumento del caudal

similar al producido por el incremento del espesor del estrato superior. Lo anterior refleja el hecho de que la conductividad del estrato superior es 10 veces mayor que la del inferior.

Se recomienda entonces, dar un margen hacia arriba al definir el espesor del estrato superior. Con esto se maximiza el caudal y además se puede simular la incertidumbre, en cuanto a la determinación de la profundidad del relleno.

En cuanto a la discretización y la extensión del terreno aguas abajo, las variaciones producidas son menores. En adelante se considera utilizar, en lo posible, una discretización de $\Delta x = \Delta y = 5$ m. Se comprueba que, en general, no es necesario utilizar un valor muy alto para la extensión aguas abajo. Lo que se debe hacer para comprobar que este parámetro esté bien determinado, es verificar que la mayor parte del flujo, por ejemplo un 90 %, se produce en la mitad o menos de la extensión considerada.

También se analizó la influencia de considerar pendiente en las caras del muro y mayor detalle en la geometría de la superficie del terreno natural. Definir una pendiente en las caras del muro no produce variaciones en la solución, pues el flujo siempre ocurre en la parte inferior del muro. Se comprueba también que considerar detalles en la geometría del terreno no produce mayores variaciones en el caudal obtenido.

De acuerdo a este análisis se construyen los modelos de cada perfil en MODFLOW. Los valores de ΔH , profundidad del relleno y la extensión aguas abajo utilizados se resumen en la Tabla 5.7.

Tabla 5.7. Parámetros de definición de los modelos para los perfiles AA, BB, CC, DD, EE.

Perfil	ΔH [m]	Profundidad del relleno [m]	Extensión aguas abajo [m]
AA	77	115	200
BB	64	100	100
CC	29	85	270
DD	62	130	200
EE	42	150	130

El valor finalmente utilizado para la discretización corresponde a $\Delta x = \Delta y = 5$ m., salvo en el caso del Perfil DD en SEEP/W. Debido a las grandes dimensiones de este perfil, se utilizó $\Delta x = \Delta y = 10$ m., pues una malla más fina generaba demasiados elementos y el programa no era capaz de definir el problema.

5.5.3 Definición de las propiedades hidrogeológicas de los suelos.

En el caso de MODFLOW sólo es necesario definir los valores de k_s para cada material. En cambio, en el caso de SEEP/W, debido a que éste considera la zona no saturada, es necesario definir además las curvas $k(\psi)$ para cada material.

Para definir las propiedades hidrogeológicas en la zona no saturada se utilizaron funciones $k(\psi)$ incluidas en la base de datos de SEEP/W.

El criterio de asignación de estas funciones a los materiales del problema consistió en que, en lo posible, la forma de la curva representara las características del material y que los valores de las conductividades hidráulicas fueran similares.

SEEP/W permite modificar el valor de k_s para una curva determinada, con lo cual se genera un material con la misma forma de la función $k(\psi)$, pero con el valor k_s que se desee.

La Tabla 5.8 muestra los suelos utilizados para los elementos de diseño de los muros.

Tabla 5.8. Suelos utilizados para los materiales de diseño de los muros.

Material	k_s	Función $k(\psi)$
	[m/s]	
Muro de estéril	10^{-2}	Arena fina uniforme #2
Material de Relave	10^{-8}	Arcilla limosa (Relaves finos)
Pared interna tranque de relaves	10^{-4}	Arena uniforme

La Tabla 5.9 resume los suelos utilizados para los materiales ubicados en cada perfil.

Tabla 5.9. Suelos utilizados para los materiales de suelo natural.

Material	k_s [m/s]	Función $k(\psi)$
Perfil AA		
Gravas arenosas	10^{-5}	Arena fina uniforme #1
Macizo rocoso	10^{-7}	Sedimento glaciario (Compactado)
Macizo rocoso	10^{-8}	Limo uniforme
Perfil BB		
Estrato 1	10^{-6}	Limo #2
Estrato 2	10^{-7}	Sedimento glaciario (Compactado)
Perfil CC		
Estrato 1	10^{-6}	Limo #2
Estrato 2	10^{-7}	Sedimento glaciario (Compactado)
Perfil DD		
Estrato 1	10^{-6}	Limo #2
Estrato 2	10^{-7}	Sedimento glaciario (Compactado)
Perfil EE (sin cortina de inyecciones)		
Estrato 1	10^{-4}	Arena uniforme
Estrato 2	10^{-6}	Limo #2
Estrato 3	10^{-8}	Limo uniforme
Perfil EE (con cortina de inyecciones)		
Estrato 1	10^{-6}	Limo #2
Estrato 2	10^{-7}	Sedimento glaciario (Compactado)
Estrato 3	10^{-8}	Limo uniforme.

5.6 Solución del problema de flujo.

5.6.1 Perfiles AA, CC, DD y EE.

En este acápite se describen las características principales de la solución obtenida para los perfiles AA, CC, DD y EE. El perfil BB muestra características especiales, las cuales hacen necesario un análisis diferenciado.

Las soluciones al problema de flujo en los perfiles AA, CC, DD y EE muestran un comportamiento bastante similar. La Figura 5.4 y la Figura 5.5, corresponden a la solución del perfil AA en MODFLOW y SEEP/W respectivamente. A partir de este caso se ilustran las principales características de la solución obtenida.

Figura 5.4. Perfil AA. MODFLOW.

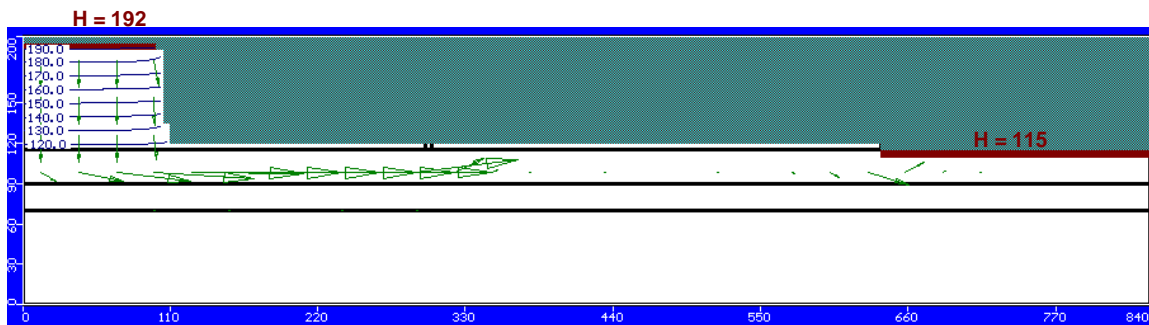
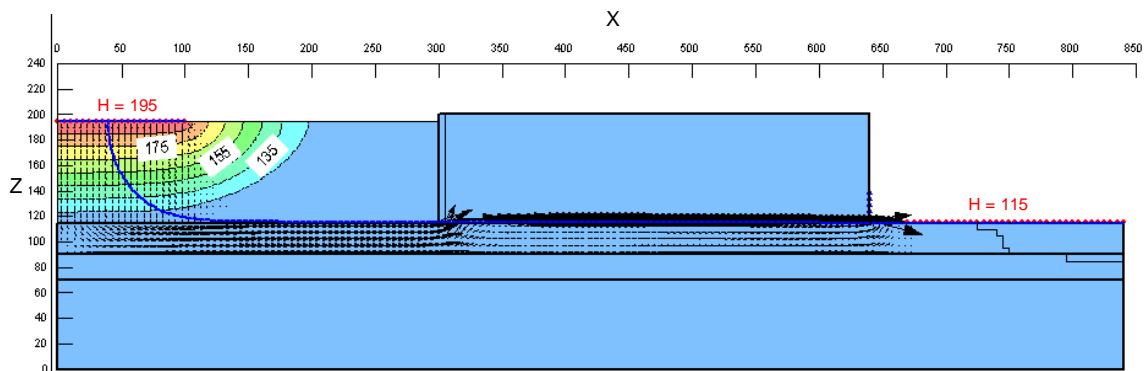


Figura 5.5. Perfil AA. SEEP/W.



En ambas figuras se han dibujado las líneas equipotenciales cada 10 m. Se aprecia que la mayor parte de la energía se pierde en la zona bajo la laguna., observándose una muy baja pérdida en el resto del dominio.

En cuanto al flujo, se observa que la mayor parte ocurre en el estrato superior y en la zona inferior de la presa, es decir, en las zonas de mayor conductividad.

En lo que respecta a la posición de la línea freática, en los perfiles AA y EE (sin cortina), se observa en el caso de SEEP/W, un corrimiento de la línea freática hacia la izquierda en la zona de

la laguna, originándose una zona no saturada bajo ella. De todos modos, se observa que se produce un flujo importante bajo toda la extensión de la laguna, evidenciado por el campo de velocidades (ver Figura 5.5). Esto sugiere que aunque en este sector se producen presiones de poros negativas, la conductividad hidráulica del medio no cambia mucho. Si consideráramos este flujo dentro de la zona saturada resultaría que la posición de la línea freática es muy similar en MODFLOW y SEEP/W. De este modo SEEP/W refleja características físicas del problema que en MODFLOW no es posible identificar.

En general es posible apreciar bastante similitud entre las líneas equipotenciales y campos de velocidad.

Por último es preciso notar que por la forma en que se implementa la malla en SEEP/W, las condiciones de borde de carga constante en la laguna tuvieron que ajustarse a la cota del nodo más alto.

La Figura 5.6 y la Figura 5.7 muestran las soluciones para el perfil CC en MODFLOW y SEEP/W respectivamente.

Figura 5.6. Perfil CC. MODFLOW.

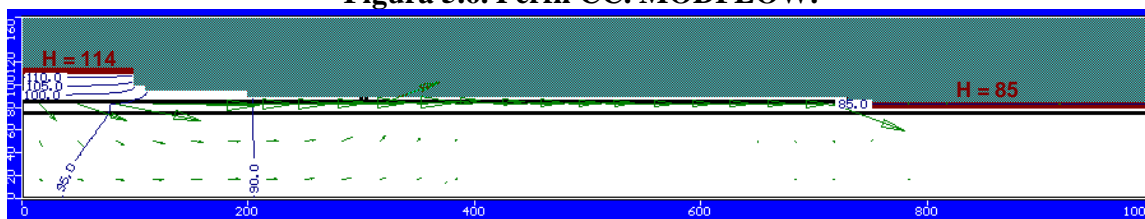
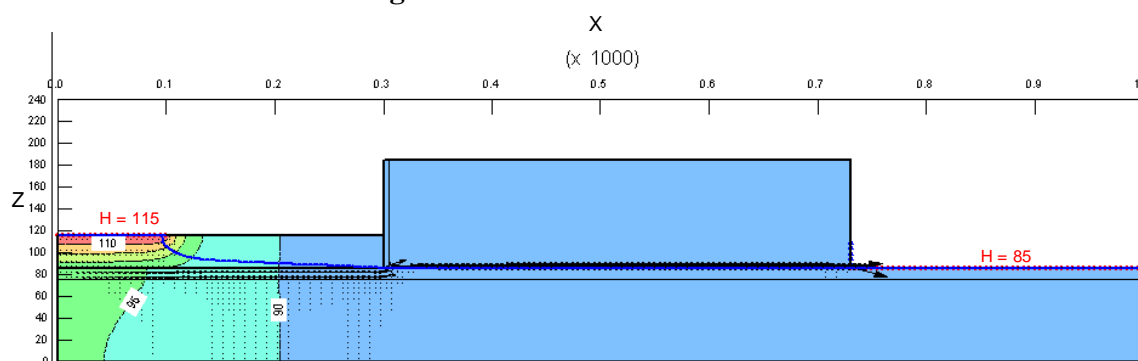


Figura 5.7. Perfil CC. SEEP/W.



La Figura 5.8 y la Figura 5.9 muestran las soluciones para el perfil DD en MODFLOW y SEEP/W respectivamente.

Figura 5.8. Perfil DD. MODFLOW.

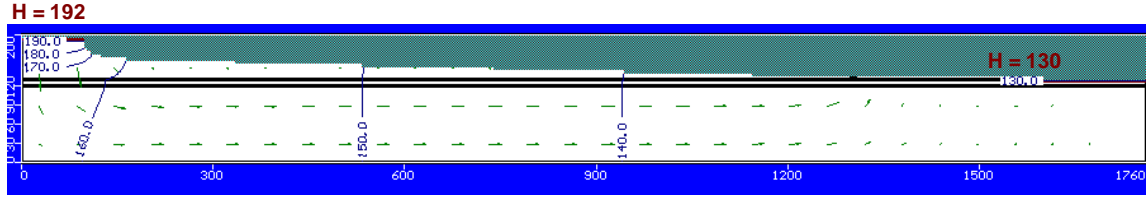
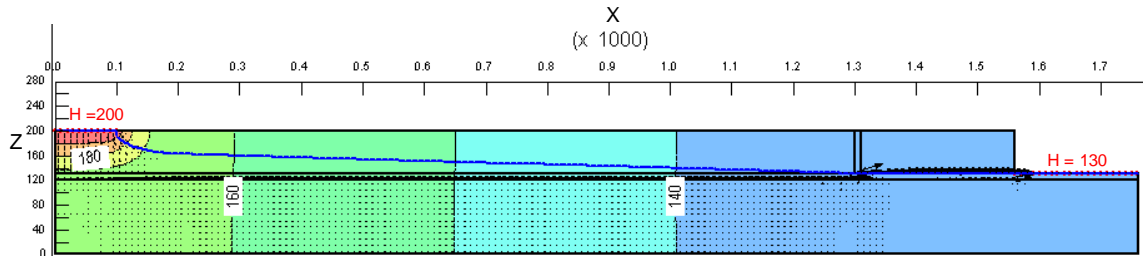


Figura 5.9. Perfil DD. SEEP/W



La Figura 5.10 y la Figura 5.11 muestran las soluciones para el perfil EE en el caso sin cortina, obtenidas con MODFLOW y SEEP/W respectivamente.

Figura 5.10. Perfil EE (sin cortina). MODFLOW.

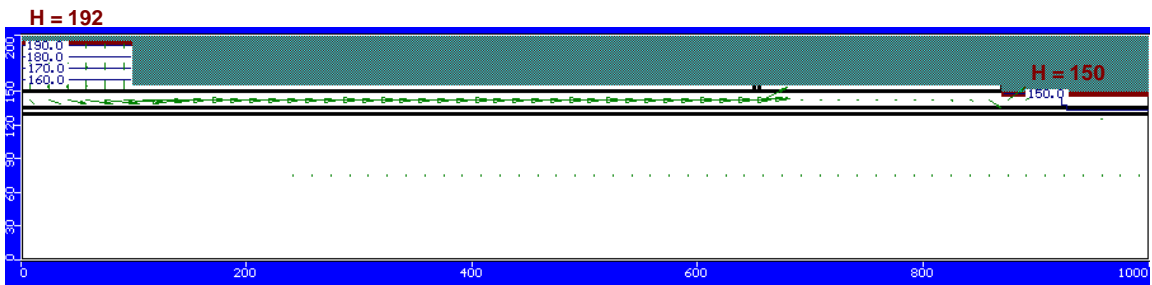
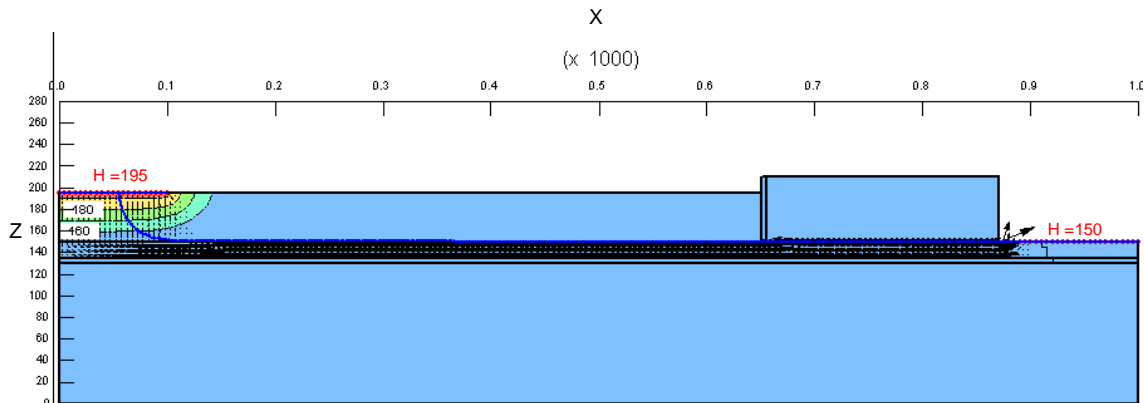


Figura 5.11. Perfil EE (sin cortina). SEEP/W.



La Figura 5.12 y la Figura 5.13 muestran las soluciones para el perfil EE en el caso con cortina, obtenidas con MODFLOW y SEEP/W respectivamente.

Figura 5.12. Perfil EE (con cortina). MODFLOW.

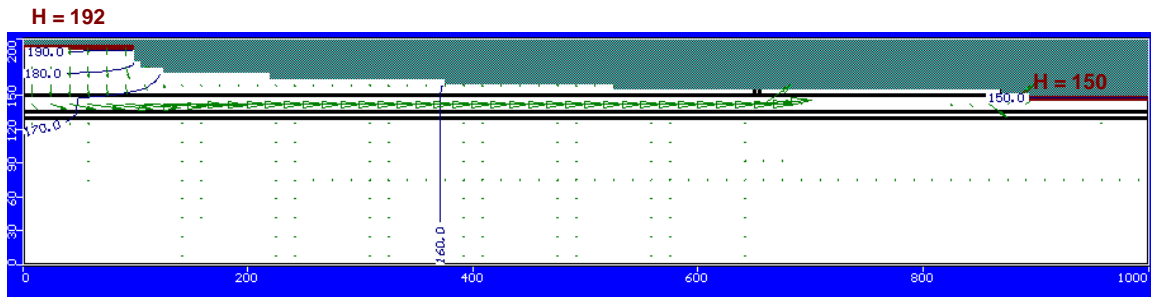
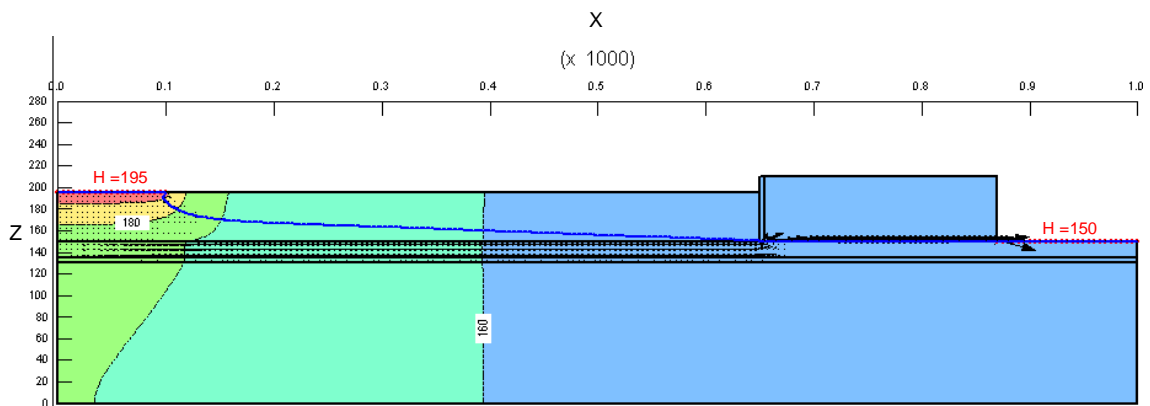


Figura 5.13. Perfil EE (con cortina). SEEP/W.



5.6.2 Perfil BB.

La Figura 5.14 y la Figura 5.15 muestran las soluciones para el perfil BB, obtenidas con MODFLOW y SEEP/W respectivamente.

Figura 5.14. Perfil BB. MODFLOW.

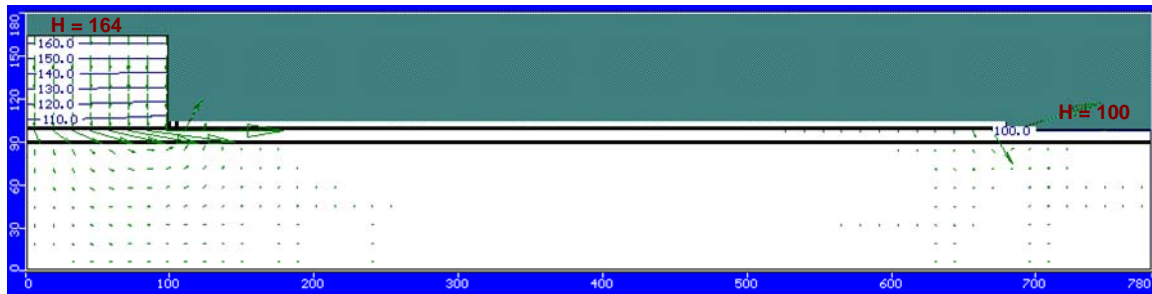
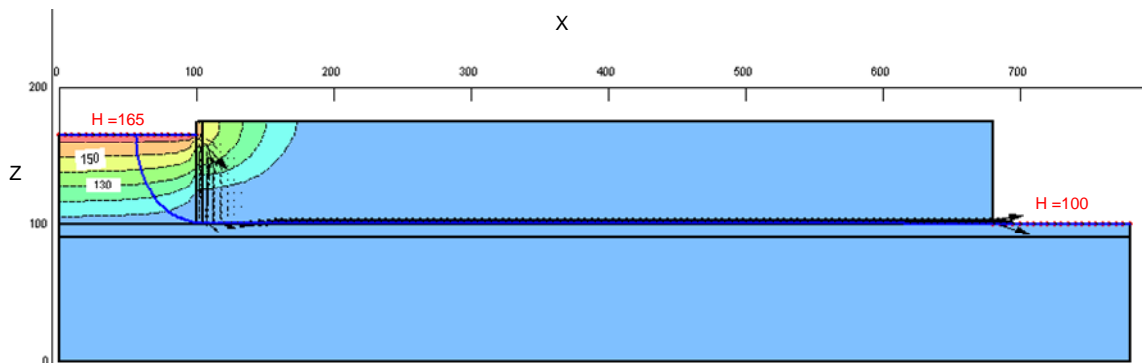


Figura 5.15. Perfil BB. SEEP/W.



En el caso de la solución con MODFLOW, la única manera en que se pudo resolver el problema fue restringiendo el dominio a la zona exterior al muro y la parte inferior del mismo. Así, la solución obtenida no toma en cuenta la zona de contacto entre el relave y el muro. Incluir cualquier parte del muro que no fuera la parte inferior produjo soluciones carentes de sentido físico con líneas equipotenciales convergiendo en la zona más alta del contacto entre muro y material de relave.

En cuanto a la solución obtenida con SEEP/W se observa una zona con altas velocidades en el contacto entre el material de relave y el muro, la cual incide en forma importante en el caudal pasante. En este caso se producen grandes diferencias entre los resultados obtenidos con SEEP/W y MODFLOW, las que son estudiadas en la sección siguiente.

5.7 Caudales de filtración.

5.7.1 Caso base.

Considerando las propiedades hidrogeológicas definidas en 5.5.3 se calcularon los caudales de filtración para cada perfil en MODFLOW y SEEP/W.

Los resultados se muestran en la Tabla 5.10.

Tabla 5.10. Caudales de filtración para el caso base.

Perfil	Q_{modf} [m ³ /día/m]	Q_{seep} [m ³ /día/m]	Error de cierre MODFLOW [%]	Error de cierre SEEP/W [%]
AA	0.0850	0.0905	-0.28	0.00
BB	0.0837	2.0938	-0.05	0.11
CC	0.0596	0.0607	-0.49	0.00
DD	0.0473	0.0473	-0.52	0.00
EE (sin cortina de inyección)	0.0847	0.0871	-0.10	0.00
EE (con cortina de inyección)	0.0479	0.0498	-0.11	0.00

Los caudales de filtración obtenidos con cada programa, salvo para el caso del perfil BB, son similares entre sí, al igual que las soluciones del problema de flujo que se muestran en la sección 5.6.1. En el caso del perfil BB el caudal calculado con SEEP/W es 2 órdenes mayor al de MODFLOW. Esta gran diferencia se produce debido a la existencia de un importante flujo descendente en la zona de contacto entre el material de relave y el muro (Figura 5.15), la cual no es considerada en el análisis de MODFLOW. Físicamente lo que ocurre es el contacto entre 2 materiales con curvas $k(\psi)$ muy diferentes (el material de relave y el muro de empréstito) donde el flujo en la zona bajo la laguna se encuentra con un material grueso (muro) a través del cual desciende rápidamente. A pesar de que este contacto se produce en todos los perfiles, el caso del perfil BB es distinto, pues en este caso el contacto se produce en una zona de mayor humedad, como es la zona bajo la laguna.

Los errores de cierre obtenidos en ambos programas son bastante pequeños.

5.7.2 Variación de las propiedades hidrogeológicas del material del muro.

En el caso de MODFLOW la única propiedad hidrogeológica que caracteriza a cada suelo es k_s . En cambio en SEEP/W al incluirse la zona no saturada en el análisis, cada suelo se caracteriza por k_s y además por la curva $k(\psi)$ correspondiente.

Se estudio el efecto sobre el caudal pasante de variar las propiedades hidrogeológicas de la zona no saturada en el material del tranque. Para esto se utilizaron 2 funciones de conductividad hidráulica, además del caso base, para caracterizar el material del muro. El valor de k_s se mantuvo constante.

Se presentan en la Tabla 5.11 los resultados obtenidos y se incluye la diferencia porcentual del valor obtenido con SEEP/W respecto al obtenido con MODFLOW.

Tabla 5.11. Caudales de filtración. Variación de las propiedades hidrogeológicas del material del muro.

Función $k(\psi)$ utilizada	Q_{modf} [m³/día/m]	Q_{seep} [m³/día/m]	$\Delta Q_{\text{modf-seep}}$ [%]
Perfil AA			
Arena uniforme #2 (caso base)	0.0850	0.0905	6.46
Arena uniforme	0.0850	0.0907	6.71
Limo uniforme	0.0850	0.0907	6.74
Perfil BB			
Arena uniforme #2 (caso base)	0.0837	2.0938	2401.51
Arena uniforme	0.0837	0.0894	6.85
Limo uniforme	0.0837	0.0885	5.69
Perfil CC			
Arena uniforme #2 (caso base)	0.0596	0.0607	1.89
Arena uniforme	0.0596	0.0614	3.10
Limo uniforme	0.0596	0.0616	3.31
Perfil DD			
Arena uniforme #2 (caso base)	0.0473	0.0473	0.16
Arena uniforme	0.0473	0.0477	0.90
Limo uniforme	0.0473	0.0480	1.44
Perfil EE (sin cortina de inyecciones)			
Arena uniforme #2 (caso base)	0.0847	0.0871	2.78
Arena uniforme	0.0847	0.0872	2.95
Limo uniforme	0.0847	0.0873	3.01
Perfil EE (con cortina de inyecciones)			
Arena uniforme #2 (caso base)	0.0479	0.0498	4.02
Arena uniforme	0.0479	0.0501	4.61
Limo uniforme	0.0479	0.0501	4.67

Los resultados obtenidos con MODFLOW y SEEP/W difieren en porcentajes bastante pequeños, salvo para el caso base del perfil BB como se ha mencionado anteriormente. Sin embargo, la diferencia observada en los caudales en el perfil BB no se manifiesta cuando se modifican las propiedades del material del muro a una función cuya conductividad no cambia tan abruptamente al aumentar la succión (por ejemplo, el limo uniforme), en cuyo caso los caudales también resultan similares a los obtenidos con MODFLOW. En estos casos el material del muro representa un material de alta conductividad con un mayor rango de succiones donde la conductividad no cambia, lo cual podría representar una mezcla entre arena y arcilla. La arena le da la mayor permeabilidad y la arcilla produce el efecto del rango de succiones. Así, en estos casos, debido a las características del nuevo material del muro, el flujo en la zona bajo la laguna se encuentra con un material en el cual no se produce la zona de altas velocidades observada cuando el material del muro se representa con una arena en la cual la conductividad desciende abruptamente al aumentar la succión.

5.7.3 Variación de las propiedades hidrogeológicas del material de relave.

Siguiendo el esquema de la parte anterior, se estudió el efecto sobre el caudal pasante de variar las propiedades hidrogeológicas del material de relave. Los resultados se muestran en la Tabla 5.12.

Tabla 5.12. Caudales de filtración. Variación de las propiedades hidrogeológicas del material de relave.

Función $k(\psi)$ utilizada	Q_{modf} [m ³ /día/m]	Q_{seep} [m ³ /día/m]	$\Delta Q_{\text{modf-seep}}$ [%]
Perfil AA			
Arcilla limosa. Relaves finos (caso base)	0.0850	0.0905	6.46
Limo (Relaves)	0.0850	0.0863	1.53
Limo uniforme	0.0850	0.0994	16.96
Perfil BB			
Arcilla limosa. Relaves finos (caso base)	0.0837	2.0938	2401.51
Limo (Relaves)	0.0837	0.8360	898.79
Limo uniforme	0.0837	0.1856	121.77
Perfil CC			
Arcilla limosa. Relaves finos (caso base)	0.0596	0.0607	1.89
Limo (Relaves)	0.0596	0.0594	-0.35
Limo uniforme	0.0596	0.0619	3.79
Perfil DD			
Arcilla limosa. Relaves finos (caso base)	0.0473	0.0473	0.16
Limo (Relaves)	0.0473	0.0464	-1.87
Limo uniforme	0.0473	0.0485	2.52
Perfil EE (sin cortina de inyecciones)			
Arcilla limosa. Relaves finos (caso base)	0.0847	0.0871	2.78
Limo (Relaves)	0.0847	0.0836	-1.25
Limo uniforme	0.0847	0.0926	9.38
Perfil EE (con cortina de inyecciones)			
Arcilla limosa. Relaves finos (caso base)	0.0479	0.0498	4.02
Limo (Relaves)	0.0479	0.0488	1.95
Limo uniforme	0.0479	0.0508	5.95

Al igual que al considerar la variación de las propiedades del material del muro, las diferencias entre los caudales obtenidos con MODFLOW y SEEP/W no son de importancia, salvo en el caso del perfil BB, en el cual las propiedades del material del muro no varían, por lo que se produce el efecto del contacto entre 2 materiales con curvas $k(\psi)$ muy diferentes (el material de relave y el muro de empréstito) expuesto en 5.7.1.

5.7.4 Comparación de los caudales de filtración para el peor caso.

La Tabla 5.13 muestra los valores de los caudales de filtración para cada perfil en el peor caso.

Tabla 5.13. Caudales de filtración para el peor caso.

Perfil	Q_{modf} [m ³ /día/m]	Q_{seep} [m ³ /día/m]	$\Delta Q_{\text{modf-seep}}$ [%]
AA	0.0850	0.0994	16.96
BB	0.0837	2.0938	2401.51
CC	0.0596	0.0619	3.79
DD	0.0473	0.0485	2.52
EE (sin cortina de inyección)	0.0847	0.0926	9.38
EE (con cortina de inyección)	0.0479	0.0508	5.95

En los perfiles AA, CC, DD y EE, el peor caso corresponde a cuando se utiliza la función $k(\psi)$ del limo uniforme para caracterizar el material de relave.

6 Conclusiones

6.1 Resultados generales.

El punto de partida de este estudio ha sido comprender las bases conceptuales de las metodologías analíticas de solución de problemas de flujo en presas. Con esto ha sido posible establecer sus limitaciones, las cuales son principalmente: la imposibilidad, salvo en casos muy particulares, de incluir análisis transientes, heterogeneidad y anisotropía del medio, además de estar restringidos a geometrías muy simples. Todo lo anterior hace difícil su utilización en la gran mayoría de los casos reales.

Como resultado del análisis del problema de flujo bajo una presa impermeable se ha verificado que los 3 modelos numéricos utilizados se comportan de manera similar en condiciones de saturación, existiendo diferencias muy pequeñas entre los caudales obtenidos con SEEP/W y HYDRUS-2D (menores al 1 %), los cuales sobreestiman en alrededor de un 10 % a los obtenidos con MODFLOW. El análisis de este problema también ha permitido visualizar la importancia de realizar un análisis de sensibilidad al tamaño de la grilla con el fin de determinar la malla adecuada a utilizar. Este tipo de análisis se repite a lo largo de este estudio.

La imposibilidad de generar mallas generales con el software HYDRUS-2D impidió que fuera utilizado en el análisis del problema de flujo a través de una presa de tierra con dren al pie y en el caso real. El estudio del efecto en los caudales de incorporar la zona no saturada en el análisis se ha realizado utilizando SEEP/W, comparando con los resultados de MODFLOW que sólo consideran la zona saturada del flujo. .

El análisis del problema de flujo a través de una presa de tierra con dren horizontal al pie muestra un aumento del caudal pasante al incorporar la zona no saturada en el análisis. Este aumento es mayor en el caso de suelos finos y generalmente despreciable en suelos gruesos. Sin embargo los suelos finos se asocian a menores conductividades, por lo que aunque las diferencias de caudal pueden llegar a ser bastante considerables (por ejemplo un 77 % en el caso del suelo limo uniforme), los valores de caudal son muy pequeños (del orden de algunos litros por día en el mismo caso del limo uniforme), lo que puede ser considerado despreciable por ejemplo para el diseño del dren, el cual quedaría de todos modos sobreestimado o bien para un caso en que se considera descargar esta agua a un curso superficial y ella contuviera un contaminante. En este último caso, el caudal descargado seguiría siendo pequeño, por lo que seguramente no tendría un mayor impacto.

En casos de régimen permanente como los estudiados en este trabajo, las propiedades hidrogeológicas del medio no saturado se caracterizan por medio de las funciones que relacionan conductividad hidráulica con la presión de poros o succión en el suelo ($k(\psi)$). La forma de estas curvas determina el comportamiento que tendrá el suelo, siendo de particular importancia conocer el rango de succiones en que la conductividad se mantiene relativamente constante. Este rango se caracteriza por el valor de la presión de entrada de aire (Air entry value o AEV en inglés) que corresponde al valor de la presión de poros para el cual entra aire al medio con lo cual disminuye la conductividad hidráulica. Se observa en este estudio que mientras mayor sea este rango mayor será la diferencia entre los caudales obtenidos con SEEP/W y MODFLOW.

Se estudió un caso real de cálculo de filtraciones en los muros de un tranque de relaves. Se utilizaron 5 perfiles representativos para el cálculo. El análisis permitió determinar las variables más relevantes en cuanto a su incidencia en el valor del caudal. La variable de mayor relevancia corresponde a la diferencia de niveles de energía (ΔH) entre la ubicación de la laguna y el nivel de terreno aguas abajo de la presa. En segundo lugar se encuentra el espesor de los estratos superiores más permeables. Otras variables como la profundidad del relleno, el detalle considerado en la geometría del problema y la extensión del terreno aguas abajo de la presa no resultan de mayor importancia. La baja permeabilidad de los estratos inferiores determina que la profundidad del relleno no influya de manera importante en el valor del caudal. En cuanto a incluir detalles en la geometría del suelo natural o pendiente en las caras de la presa se constata que no modifica el valor del caudal en más de un 1 %. El análisis permitió establecer una técnica para determinar el valor de la extensión de terreno aguas abajo de la presa a considerar. Se recomienda suponer un primer valor y luego comprobar que al menos el 90 % del caudal calculado ocurra en la mitad más cercana a la presa de la extensión total. Extensiones del orden de 100 m. entregan buenos resultados en el caso estudiado.

Para todos los perfiles estudiados, salvo el perfil BB, las diferencias entre los caudales obtenidos con SEEP/W y MODFLOW resultaron pequeñas, siendo en el peor caso de un 16 %. La diferencia del perfil BB con el resto de los perfiles radica en que la laguna de aguas claras se encuentra junto al muro de la presa y no alejada de éste. Al modelar el perfil BB en MODFLOW, para obtener un resultado, se tuvo que eliminar el muro del problema, salvo en su parte inferior, pues de otro modo se obtenían resultados sin sentido físico. Así, la zona de contacto entre el material de relave y el muro no es tomada en cuenta por MODFLOW. En este perfil, el caudal obtenido con SEEP/W es 2 órdenes mayor al de MODFLOW. Esta gran diferencia se produce debido a la existencia de un importante flujo descendente en la zona de contacto entre el material de relave y el muro, la cual no es considerada en el análisis de MODFLOW. Físicamente lo que ocurre es el contacto entre 2 materiales con curvas $k(\psi)$ muy diferentes (el material de relave y el muro de empréstito) donde el flujo en la zona bajo la laguna se encuentra con un material grueso (muro) a través del cual desciende rápidamente. A pesar de que este contacto se produce en todos los perfiles, el caso del perfil BB es distinto, pues en este caso el contacto se produce en una zona de mayor humedad, como es la zona bajo la laguna.

6.2 Fortalezas y debilidades de los programas utilizados.

A partir de este estudio ha sido posible determinar fortalezas y debilidades de los programas utilizados con respecto a su utilización en problemas de flujo en presas. En primer lugar, en cuanto a HYDRUS-2D, al no ser posible la generación de mallas generales, se restringen de manera importante sus posibilidades de aplicación. En efecto, no ha podido ser utilizado en el estudio del caso real planteado en este trabajo.

MODFLOW por su parte es un programa ampliamente usado y conocido, por lo que se cuenta con mucha información respecto a su funcionamiento. Por otro lado, los resultados que se obtienen con MODFLOW son más fáciles de interpretar, pues representan una física más simple, aunque esto es al mismo tiempo una debilidad, pues MODFLOW no incluye aspectos de la física del problema que podrían ser relevantes, como la zona no saturada del flujo. Otra debilidad de MODFLOW es la necesidad del uso de una metodología especial para resolver los problemas estudiados en este trabajo, la cual podría resultar engorrosa para algunos usuarios.

Al contrario de MODFLOW, SEEP/W es un programa ad hoc para la resolución de problemas de filtraciones en presas, lo cual hace bastante sencilla la implementación del modelo de flujo y presenta una forma muy atractiva de visualizar los resultados. Sin embargo es un programa más nuevo por lo que se cuenta con menos información acerca de su funcionamiento. SEEP/W incorpora la parte no saturada del flujo, lo cual lo hace más completo que MODFLOW desde un punto de vista conceptual, sin embargo en algunos casos puede ser más complicado interpretar sus resultados debido a que representa una física más compleja.

Los resultados de este trabajo muestran que en general, los resultados obtenidos con SEEP/W no presentan una gran diferencia en comparación con los de MODFLOW, por lo que la utilización de MODFLOW para resolver problemas de flujo en presas es válida y se puede considerar la aplicación de un factor de seguridad no necesariamente muy alto para simular el efecto no saturado. Sin embargo, en algunos casos específicos como el del perfil BB en el análisis del caso real, MODFLOW no es capaz de representar en forma correcta la física del problema y los resultados obtenidos para el caudal difieren de manera sustancial, en este caso en 2 órdenes de magnitud. Por lo tanto, para casos como el del perfil BB, en que la laguna de aguas claras se encuentra junto a la presa, se recomienda la utilización de SEEP/W.

La manera óptima de enfrentar problemas como los estudiados en el presente trabajo sería utilizar ambos programas. Este análisis conjunto permite determinar si la influencia de la zona no saturada es lo suficientemente relevante como para hacer necesario incorporar la determinación de las propiedades hidrogeológicas del suelo no saturado. Es más, la determinación de la línea freática permite descartar la necesidad de investigar las propiedades hidrogeológicas del suelo no saturado en el caso de los materiales que permanecerán completamente saturados.

Es preciso notar que la metodología utilizada en MODFLOW resulta impracticable para realizar análisis de tipo transiente. En este caso la única alternativa es utilizar SEEP/W.

Por último, en relación con problemas de convergencia y balances de masa no se presentaron problemas en ninguno de los programas utilizados y los tiempos de modelación no constituyeron una variable que sea digna de mencionar.

6.3 Recomendaciones.

En este trabajo se ha realizado un análisis comparativo de los resultados obtenidos con cada modelo numérico, sin embargo éstos no se han validado utilizando datos reales. Sería interesante la construcción de un modelo físico que permitiera comparar de forma controlada los resultados de cada modelo con datos reales. Dentro del mismo marco se recomienda la utilización de una mayor variedad de modelos numéricos, tales como la versión HYDRUS-2D Standard y MODFLOW-SURFACT, lo cual entrega un análisis más completo.

La construcción del modelo físico sería también interesante para evaluar si los modelos que incluyen la zona no saturada en el análisis son capaces de reproducir características físicas del problema que no es posible reproducir con MODFLOW, lo cual llevaría a un mejor entendimiento de la física del problema.

También podría resultar de interés incorporar un análisis de transporte de contaminantes conservativos, debido a las repercusiones ambientales de un buen control de estas filtraciones.

Por último, se sugiere incorporar al análisis realizado en este estudio la versión HYDRUS-2D Standard, la cual permite la generación de mallas generales, con lo cual sería posible contrastar los resultados obtenidos con SEEP/W con otro modelo que también considera la zona no saturada. También podría ser interesante incluir el modelo MODFLOW-SURFACT que corresponde a un paquete que funciona con MODFLOW, el cual permite modelar la zona no saturada por medio de evitar el secamiento de las celdas asignándoles un valor de humedad. Es preciso notar que SURFACT no ha sido diseñado para resolver problemas de flujo en presas, si no más bien para atacar problemas de convergencia producidos por el secamiento de celdas en MODFLOW, pero de todos modos sería interesante incluirlo en el análisis para evaluar su funcionamiento en casos de flujo en presas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

Baeza S., H. (1973). Esguerrimiento en medios permeables. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Obras Civiles.

Compañía Minera Carmen de Andacollo. (2006). Resumen del Estudio de Impacto ambiental Proyecto Hipógeno.

Espinoza, C. (2007). Apuntes del Curso Hidráulica de Aguas Subterráneas, CI51J. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

Espinoza, C. (2008). Apuntes del Curso Modelación de Aguas Subterráneas, CI66J. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

GEO-SLOPE International Ltd (2009). Descripción de SEEP/W. <<http://www.geo-slope.com/products/seepw2007.aspx>>

Harbaugh, A.W. (2005). MODFLOW-2005, The U.S. Geological Survey modular ground-water model—the Ground-Water Flow Process: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A16.

Harr, M. (1962). Groundwater and seepage. Mc Graw-Hill Book Company.

Herrera, P. (2000). Modelación numérica de flujo en medios porosos saturados y no saturados. *Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.*

Krahn, J. (2004). Seepage modeling with SEEP/W. An engineering methodology. GEO-SLOPE International Ltd.

Lambe, T. William y Whitman, R. (1998). Mecánica de Suelos. Noriega Editores.

Salfate, E. (2005). Modelación numérica de la recirculación de lixiviados en un relleno sanitario, aplicación al relleno sanitario Santiago Poniente. *Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.*

Simunek J., Sejna M. y van Genuchten M. Th. (1999). The HYDRUS-2D Software Package for Simulating the Two-Dimensional Movement of Water, Heat and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media, Version 2.0, U.S Salinity Laboratory, Agricultural Research Service, USDA, Riverside, California.

United States Department of Agriculture. Agricultural Research Service (USDA/ARS, 2009). Base de datos del modelo ROSETTA. <<http://www.ars.usda.gov/Services/docs.htm?docid=8953#references>>

United States Department of Agriculture. Agricultural Research Service (USDA/ARS, 2009). Descripción de HYDRUS-2D. <<http://www.ars.usda.gov/services/docs.htm?docid=8939>>

United States Geological Survey (2009). Descripción de MODFLOW.
<<http://water.usgs.gov/nrp/gwsoftware/modflow.html>>

Wang, H. and Anderson M.P. (1982). Introduction to Groundwater Modelling. Academic Press.

Wilmans, W. (2005). Estudio práctico teórico y numérico acerca de la atenuación natural en suelos naturales. *Tesis para optar al Grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería Mención Recursos y Medio Ambiente Hídrico. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.*

ANEXOS

Figura A. 1. Arena uniforme (SEEP/W).

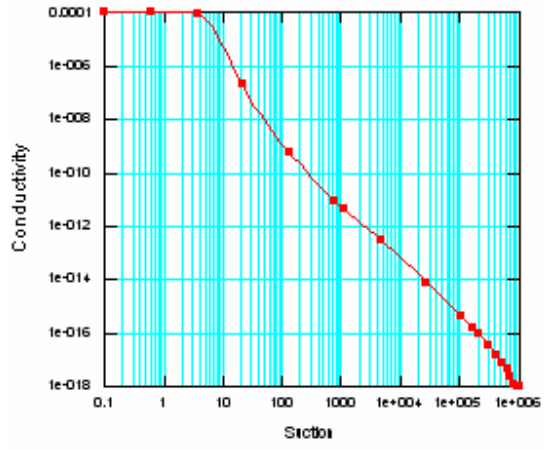


Figura A. 2. Arena (HYDRUS-2D).

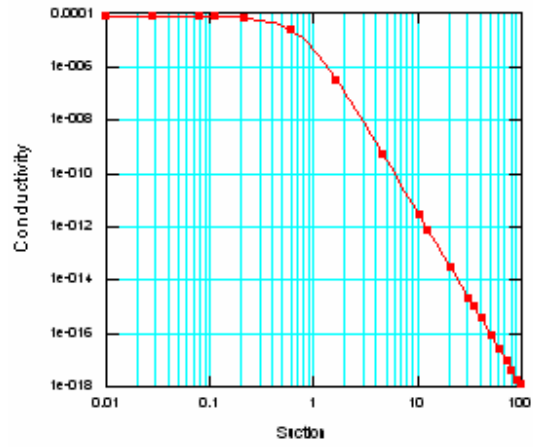


Figura A. 3. Arena (ROSETTA).

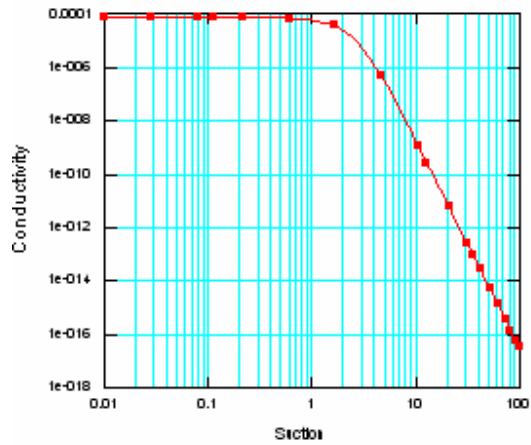


Figura A. 4. Arena fina uniforme #1 (SEEP/W).

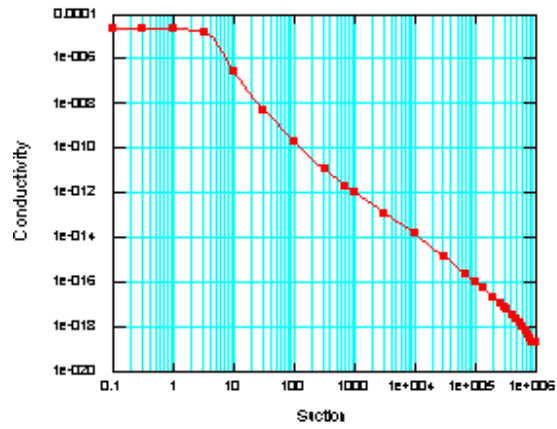


Figura A. 5. Arena fina uniforme #2 (SEEP/W).

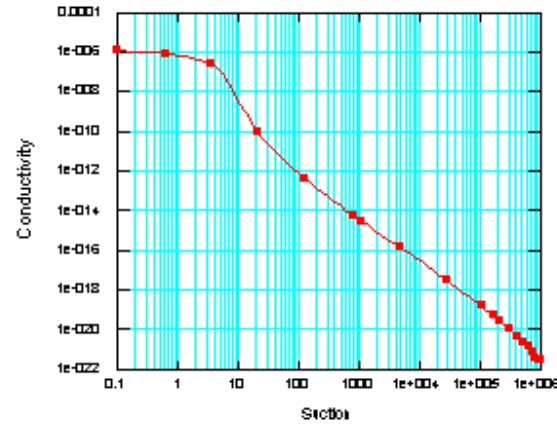


Figura A. 6. Arena muy fina (SEEP/W).

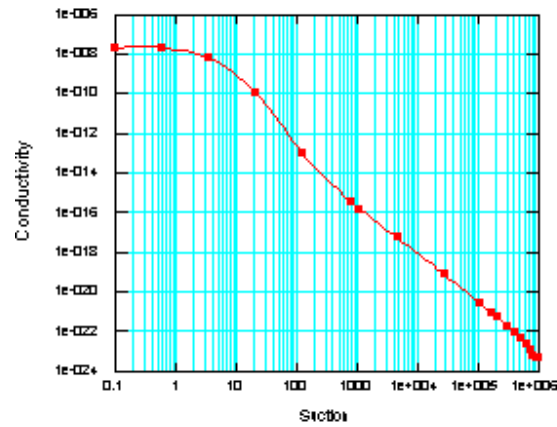


Figura A. 7. Arcilla (ROSETTA).

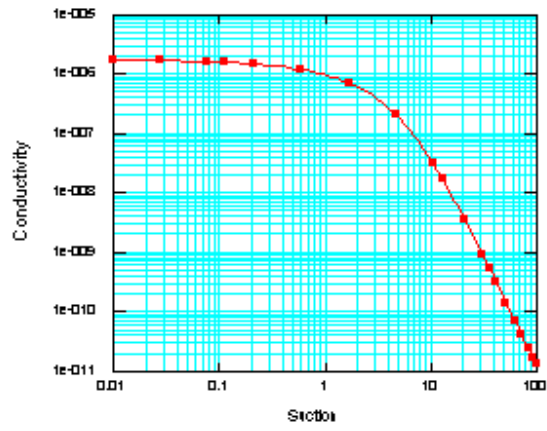


Figura A. 8. Arcilla (HYDRUS 2-D)

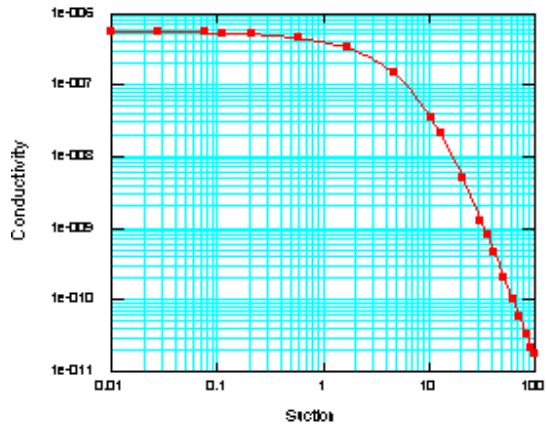


Figura A. 9. Arcilla bien graduada # 3 (SEEP/W).

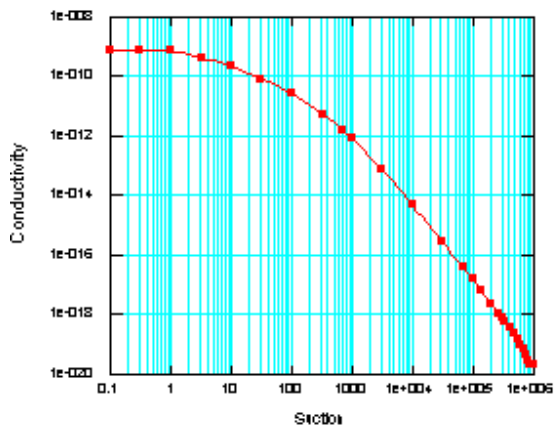


Figura A. 10 Limo (ROSETTA).

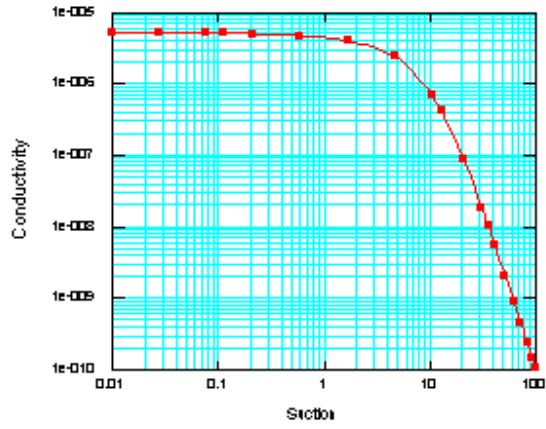


Figura A. 11. Limo # 2 (SEEP/W).

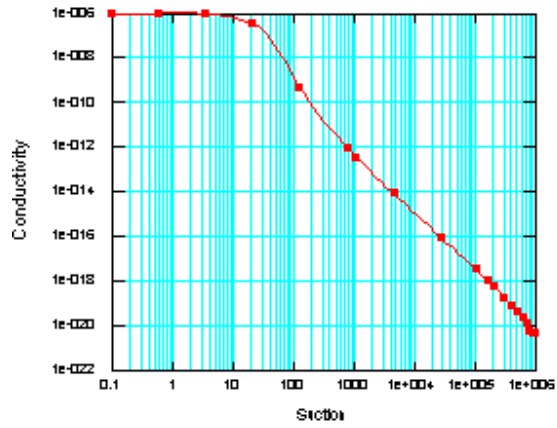


Figura A. 12. Limo (HYDRUS 2-D).

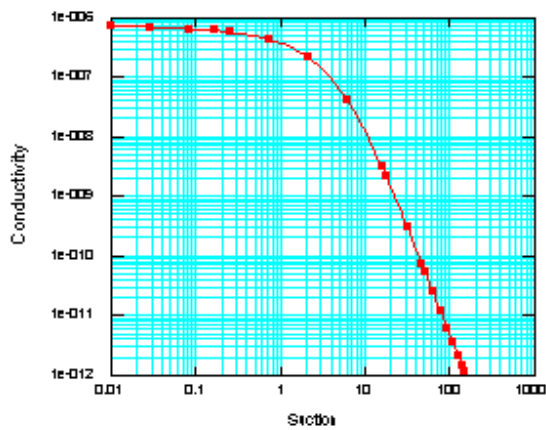


Figura A. 13. Limo (SEEP/W).

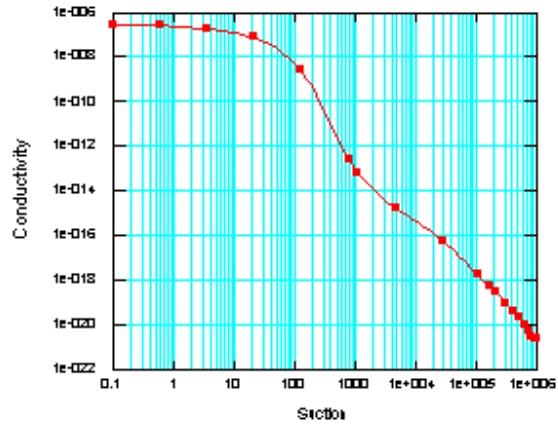


Figura A. 14. Limo (Relaves) (SEEP/W).

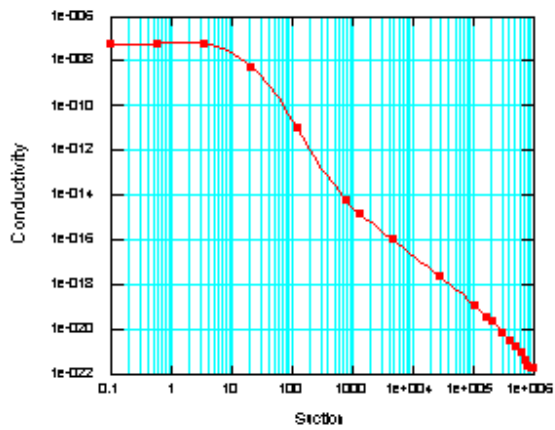


Figura A. 15. Limo uniforme (SEEP/W).

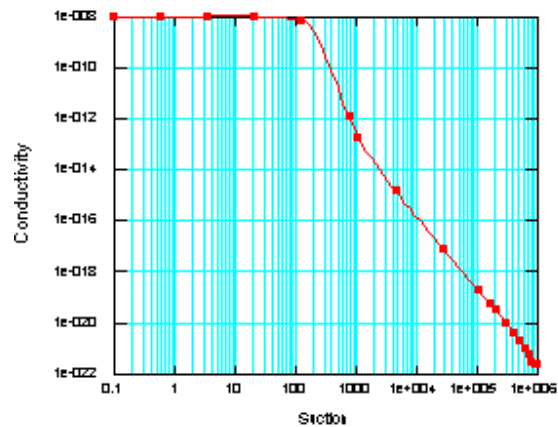


Figura A. 16. Arcilla limosa (Relaves finos) (SEEP/W).

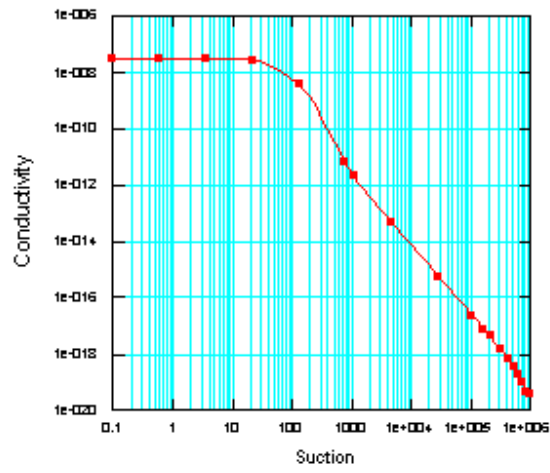


Figura A. 17. Sedimento glaciar (Compactado) (SEEP/W).

