Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

UNIVERSIDAD DEL BIO BIO

FACULTAD DE INGENIERIA

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL

Determinación de curvas de evaporación desde la napa en diferentes tipos de suelos

Proyecto de Título presentado en conformidad a los requisitos para obtener el Título de Ingeniero Civil

ALFREDO O. GRANDON MORALES

Prof. Guía: Álvaro Suazo Schwencke

Concepción, Enero del 2009

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

AGRADECIMIENTOS

El recorrido para llegar a ser ingeniero civil estuvo lleno de obstáculos, sin embargo siempre había una ventana para lograr la salida. Las noches de estudio, la mala alimentación, los cafés y el sacrificio personal son parte del condimento de cada semestre. La solución a los problemas siempre estuvo acompañada de buenas personas, que sin ellas hubiera sido imposible terminar el camino.

Mis padres, sin duda alguna son parte fundamental de motivación, apoyo y ánimo que cada día necesitaba para seguir adelante. Su entrega, abnegación, pasión y amor por la familia, fue el motor de inspiración para no desertar en los momentos complicados y es a ellos mi principal agradecimiento.

A mis hermanos, familiares y amigos de toda la vida por su apoyo incondicional.

A mis amigos de carrera y sus familias por su constante apoyo académico y moral. También a mi profesor guía Álvaro Suazo y mis profesores por entregar su conocimiento para ser mejores profesionales.

A la Srta. Jessenia aguayo Beltrán, al Sr. Miguel Orellana y al Sr. Rodrigo Aguayo Gonzáles por su ayuda en la redacción y preparación de la experimentación y Tesina.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

SUMARIO

El siguiente proyecto de título tiene por objetivo determinar las curvas de evaporación para varios tipos de suelos finos, para que representen de mejor manera la tasa de evaporación a medida que el nivel freático aumenta de profundidad.

Anteriormente se estudió la posibilidad de incluir curvas no lineales que representen mejor la evaporación del agua desde la napa freática en modelos de flujo de aguas subterráneas. Estas curvas fueron calibradas sólo para una arena, donde la evaporación registrada variaba linealmente con la profundidad de la napa. Sin embargo, se estima que para suelos finos puede que esta conclusión pierda validez.

Para alcanzar el objetivo propuesto, se realizó un sistema experimental que consiste en simular un acuífero libre que tiene la napa freática a diferentes profundidades, mediante el uso de siete columnas con suelo fino. Se realizan el estudio en cinco suelos: limo compactado, limo no compactado, arcilla compactada, arcilla no compactada y suelo orgánico. La evaporación a través del suelo, se incrementa con la aplicación de una fuente de energía en su parte superior. De esta manera se registran variaciones de los niveles de agua al interior del recipiente y posteriormente se determina la tasa de evaporación para cada una de las columnas y en los cinco suelos en estudio.

De esta forma se obtuvieron valores experimentales de la tasa de evaporación de agua a través del suelo, ubicando el nivel freático a diferentes profundidades. A los resultados obtenidos se ajustaron los tres modelos de evaporación en estudio que son lineal, potencial y exponencial, para después compararlos y determinar cual de ellos posee un mejor ajuste de línea de tendencia.

Los resultados arrojados indican que para el suelo limoso, tanto en su estado compactado como suelto, el modelo que mejor se ajusta es el lineal. Para los suelos arcilloso en estado suelto y compactado, los modelos que mejor se ajustan son el potencial y exponencial respectivamente. En cuanto al suelo orgánico el modelo que mejor se ajusta es el potencial. Sin embargo, se concluye que el modelo lineal es un muy buen modelo para representar la tasa de evaporación para cualquiera de estos suelos, puesto que posee un muy buen coeficiente de ajuste en todos los casos.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

INDICE

1. INTRODUCCIÓN 1
1.1 Objetivo General 2
1.2 Objetivos Específicos 2
2. MARCO TEORICO 3
2.1 Evaporación 3
2.1.1. Factores que actúan en el proceso de evaporación 5
2.1.2. Medición de la Evaporación 7
2.1.3. Tipos de Evaporación 8
2.1.4. Evaporación desde superficies líquidas 10
2.1.5. Evaporación desde nieve y hielo 11
2.1.6. Evaporación a través del suelo 12
2.1.7. Transpiración 13
2.2 Aguas Subterráneas y Acuíferos 14
2.2.1. Zona Saturada y Zona No Saturada 15
2.2.2. Formaciones geológicas y las aguas subterráneas. 18
2.2.3. Tipos de Acuíferos. 19
2.2.4. Propiedades Hidráulicas de los Acuíferos 22
2.2.5. Ley de Darcy 23
2.2.6. Transmisibilidad (T) 25
2.2.7. Coeficiente de Almacenamiento (S) 25
2.2.8. Curva de evaporación 26
2.2.8. Relación Humedad – Succión en el suelo 27
2.2.9. Factores que afectan la permeabilidad de los suelos. 28
3. METODOLOGÍA 30
3.1 Caracterización de los suelos utilizados. 30
3.2 Ensayos de calibración. 31
3.2.1. Equipos utilizados de calibración. 34
3.2.2. Montaje de las columnas. 36
3.3 Ajuste de modelos de evaporación 39
3.3.1. Modelo lineal 39
3.3.2. Modelo potencial 40
3.3.3. Modelo exponencial 41
3.4 Ensayo de validación 42
3.4.1. Montaje de columnas para la validación 42
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS 44
4.1 Características de los suelos utilizados 44
4.2 Calibración de curvas de evaporación. 45
4.2.1. Limo sin compactar 45
4.2.2. Limo compactado 50
4.2.3. Arcilla sin compactar 55

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

4.2.4. Arcilla compactada 58
4.2.5. Suelo orgánico 62
4.3 Validación 68
4.4 Comparación de curvas de distintos suelos 70
4.5 Relación entre pendientes de modelos lineales y permeabilidad 72

5. CONCLUSIONES 73

BIBLIOGRAFÍA 75

ANEXO 1: RESULTADOS FASE EXPERIMENTAL

ANEXO 2: RESULTADOS ENSAYOS A SUELOS

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

1. INTRODUCCIÓN

Al momento de realizar un balance hidrológico para una determinada cuenca o parte de esta, la evaporación es uno de los parámetros más importantes a considerar, ya que además de actuar como regulador térmico en la atmósfera, produce la pérdida del recurso hídrico desde el suelo.

Si bien la evaporación a través de superficies libres es de gran importancia, no deja de serlo al tratarse del suelo, pues es un depósito de agua capaz de almacenar un gran volumen dependiendo de su naturaleza.

Hay que considerar que la evaporación producida desde suelos áridos es más significativa que la producida en suelos finos, por esto se puede señalar que las tasas de evapotranspiración y evaporación no resultan para nada insignificantes, al mismo tiempo es esencial ahondar más en el proceso, ya que permite estimar la pérdida del recurso hídrico desde suelos finos.

El proceso de evaporación está dado por tres factores, los cuales se diferencian por: las características externas de la atmósfera, las propiedades de transmisibilidad del suelo y por los gradientes térmicos cuando el suelo está seco.

De esta forma se hace necesario cuantificar las tasas de evaporación para suelos finos tales como: limo, arcilla y orgánico, ya que de esta forma se conoce de manera más exacta la cantidad de recurso hídrico que se evapora a la atmósfera, lo cual permitirá predecir las futuras demandas del recurso que habrá sobre la zona.

En estudios anteriormente realizados para suelos áridos (Cifuentes, 2008), se analizó la vialidad de incorporar curvas de evaporación no lineales para flujos de aguas subterráneas. Sin embargo la curva que mejor se adecuaba al comportamiento real de evaporación del agua a través del suelo seguía siendo lineal.

De este modo, el objetivo principal de este estudio es analizar la vialidad de incorporar curvas no lineales para limos, arcillas y suelos orgánicos, pues se estima que para suelos finos puede que pierda validez esta conclusión del estudio anterior y la evaporación real registrada varíe no linealmente a través de la profundidad de la napa.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

1.1 Objetivo General

- Determinar las curvas de evaporación del nivel freático desde diferentes tipos de suelo

1.2 Objetivos Específicos

- Proponer y validar una metodología de ensayo para la determinación de curvas de evaporación.
- Seleccionar el modelo que mejor se ajuste a las curvas medidas

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

2. MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se explican los conceptos teóricos que fundamentan la presente investigación. Para comenzar se aborda la evaporación con su definición, siguiendo con los procesos que ocurren y los factores que intervienen. Además se distingue entre la evaporación hidrológica y meteorológica, como también se analiza la evaporación desde distintas superficies y la transpiración en las plantas.

Se explican algunos aspectos significativos del comportamiento de las aguas subterráneas y se describen algunas de las formaciones geológicas de interés en el estudio, las cuales producen un almacenamiento de agua en el suelo. Continuando con la misma metodología se abordan los acuíferos, los cuales son analizados en torno a dos características principales, las propiedades hidráulicas que poseen y los tipos que existen.

Se abordan los flujos a través de los medios porosos, los cuales sean estos suelos gruesos o finos, están definidos por la Ley de Darcy, la cual relaciona las propiedades hidráulicas de un suelo y la tasa de flujo en el suelo.

Para finalizar el capítulo se definen las propiedades hidráulicas de suelo un suelo poroso, para después analizar relación Humedad-succión en suelos no saturados. Posteriormente se analizan los factores que afectan la permeabilidad, como lo son el grado de compactación, textura y la estructura del suelo.

2.1 Evaporación

Se define como parte del ciclo hidrológico en el cual la precipitación caída sobre la superficie de la tierra retorna a la atmósfera en forma de vapor. Desde el punto de vista físico, la evaporación es el proceso físico por el cual una sustancia en estado líquido pasa al estado gaseoso, tras haber adquirido energía suficiente para vencer la tensión superficial. A diferencia de la ebullición, este proceso se produce a cualquier temperatura, siendo más rápido cuanto más elevada esté.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Para estudiar la evaporación se deben considerar los distintos orígenes desde los que se produce. A continuación se mencionan algunos de ellos:

Una parte de lluvia queda en los vegetales, interceptada por las hojas o troncos, desde donde se produce evaporación. Otra parte llega al suelo y lo moja, así habrá también evaporación desde el suelo húmedo, con variaciones del grado de humedad; una vez saturado el suelo, el agua corre por la superficie, y también desde ésta se produce evaporación. Por último, una parte alcanza los cauces y entonces se tendrá evaporación desde superficies líquidas continuas, es decir, mares, lagos y ríos.

Hay otra forma especial de evaporación, la que se produce a partir de la nieve y de los hielos, en donde el paso no se produce desde el estado líquido al gaseoso, sino del sólido al gaseoso; este fenómeno se conoce como sublimación o volatilización.

Se puede observar evaporación en todos los lugares donde se produce acumulación de líquido, al mismo tiempo es importante señalar que las plantas no están libres de experimentar este cambio físico, ya que ellas toman el agua del suelo por medio de sus raíces y a través de la transpiración la regresan a la atmósfera. Es por esta razón que debido a una similitud de conceptos se engloba la evaporación y transpiración en una sola variable denominada evapotranspiración, pues no interesa distinguir qué parte es de evaporación propiamente tal y cuál es de transpiración.

Además se ha establecido como Evapotranspiración Potencial, “la cantidad máxima posible de agua que perdería el suelo por evaporación y transpiración, suponiendo que éste estuviera saturado”. Sólo en condiciones ideales la evapotranspiración real coincidirá con la potencial; en los demás casos, generalmente, la real será menor. (Thornthwaite, 1948)

La evaporación se produce cuando las partículas de agua adquieren la suficiente energía cinética para emerger por sí solas de la superficie del agua y superar la tensión superficial. De esta manera las partículas de agua escapan al aire, consumen calor, produciendo así una disminución de la temperatura ambiental.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

La evaporación depende de el poder evaporante de la atmósfera, el cual se traduce como la capacidad que posee el ambiente para absorber humedad, la que al mismo tiempo se encuentra influido por variables de diferente complejidad y de otros factores externos.

2.1.2 Factores que actúan en el proceso de evaporación

El valor de la evaporación está sujeto a la tensión de vapor de la superficie del agua y la del aire. Si la evaporación natural se considerada como un proceso de intercambio de energía, se puede demostrar que la *radiación* es, sin lugar a dudas, el factor más importante, y que es básicamente aplicable el término evaporación solar, específicamente en este experimento.

A su vez este factor depende de: Temperatura del agua y aire, del viento, presión Atmosférica, naturaleza y forma de la superficie y la calidad del agua.

Temperatura: La tensión de vapor del agua se incrementa con la temperatura, ya que la energía cinética aumenta con tal elevación. Un acrecentamiento de la temperatura del aire ambiente, aumentará la tensión de vapor en el agua y en el aire. Como la evaporación es proporcional a la diferencia de tensión de vapor entre el agua y el aire, incrementos similares pueden no aumentar la evaporación. Para que la evaporación continúe debe comunicarse una cantidad de calor igual a la pérdida por evaporación. De otra forma, al igualarse las temperaturas, cesa la evaporación.

La insolación es considerada como un factor determinante de la temperatura, ya que la evaporación necesita calor para producirse; este calor lo recibe el agua que se va a evaporar o el terreno saturado, tomándolo de otros cuerpos próximos que, a su vez, lo reciben de la energía solar. En consecuencia, cuando las horas de insolación se incrementan, la evaporación aumenta, es decir lo que hace la insolación, es actuar sobre la temperatura del aire y de los objetos en contacto con el agua e incrementar su temperatura.

Velocidad y turbulencia del viento: Si bien la ley de Dalton hace alusión al aire en estado de reposo, la influencia de la velocidad y turbulencia del viento es considerable, pues cuando una

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

masa de aire que ya ha absorbido humedad es desplazada y substituida por otra con menor contenido de humedad, por lo tanto con mayor diferencia entre la tensión de vapor a la temperatura del agua y la tensión de vapor real de la atmósfera en ese instante, es capaz de producir nueva evaporación. De esta manera, si el aire se encuentra en reposo, al cabo de cierto tiempo la diferencia antes mencionada habrá disminuido, es decir, la humedad relativa del ambiente habrá aumentado y esto reducirá la evaporación a lo largo del tiempo. En cambio, si el aire no está en reposo, hay turbulencia y la renovación que traerá aire con menor contenido de humedad podrá mantener constante el valor de la evaporación, en lugar de ir decreciendo con el tiempo. Por otro lado resulta importante señalar que efecto del viento puede ser más elevado en grandes extensiones de agua que en pequeñas. Sin embargo este factor es descartado, puesto que se trabajó todo el tiempo en un galpón cerrado sin presencia de viento.

Presión Atmosférica: La influencia de la presión atmosférica es pequeña y queda incluida dentro de la ley de Dalton.

Naturaleza y forma de la superficie: Un volumen de agua con una superficie plana tiene presión de vapor superior que una cóncava, pero menor que una convexa bajo las mismas condiciones. Se ha intentado corregir la ecuación de evaporación según los tipos de superficies. Se acepta que la evaporación es proporcional a la dimensión, diámetro, no al área.

Calidad del agua: El efecto de la salinidad o sólidos disueltos, trae como consecuencia la reducción de presión de vapor de la solución. La presión de vapor del agua salada en el mar, es menor en 2 % que la presión de vapor del agua pura a la misma temperatura, siendo la reducción de evaporación un poco menor. En extensos períodos de tiempo los efectos de la salinidad pueden despreciarse. Indiscutiblemente la presencia de cualquier material extraño afectará el proceso de evaporación.

La turbiedad del agua resulta ser una variable importante de mencionar. Sin embargo la cantidad de ensayos realizados, han arrojado como resultado que no posee mayor relevancia. En consecuencia se puede concluir lo siguiente: que el agua posea partículas sólidas en suspensión no altera el proceso de la evaporación; lo contrario a lo que ocurre con la salinidad. En el

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

experimento este factor también es descartado, ya que todas las semanas el agua es cambiada por agua potable, sin presencia de salinidad y turbiedad.

2.1.3. Medición de la Evaporación

La evaporación se mide por el espesor de la capa de agua evaporada expresada en mm y suele tomarse como intervalo entre dos observaciones consecutivas.

Teniendo en cuenta que una lámina de agua de 1 mm de espesor y de 1 m^2 de extensión equivale a un litro, el mismo número que expresa el agua evaporada en milímetros representará también la cantidad en litros de agua evaporada por metro cuadrado de superficie evaporante.

La evaporación es una magnitud difícil de medir, debido a que sufre considerables variaciones de carácter local y no se ha podido encontrar un proceso suficientemente representativo de las condiciones medias de una región determinada. La evaporación en terrenos secos es distinta a la de terrenos con cuerpos de agua, en un río es diferente a la de un bosque, etc. y, como se vio, influyen mucho las condiciones meteorológicas del aire.

En los observatorios y en las estaciones meteorológicas las medidas de evaporación corresponden a la evaporación potencial.

Los instrumentos empleados para medir el poder de evaporación del aire son los evaporímetros o atmidómetros; éstos se clasifican en medidores de evaporación potencial o del poder evaporante de la atmósfera. Se pueden nombrar los siguientes:

- tanques de evaporación,
- recipientes de vaporización,
- recipientes de porcelana porosa,
- evaporímetros de disco de papel.
- Evaporígrafos

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

2.1.4. Tipos de Evaporación

Se debe diferenciar entre la evaporación hidrológica y la evaporación meteorológica. La evaporación meteorológica o potencial se caracteriza por la evaporación de toda el agua que es capaz de absorber la atmósfera, ya que se le suministra toda el agua disponible para que eso ocurra. En cambio en la realidad se presenta la limitación del agua, produciéndose la evaporación que realmente ocurre que es la evaporación hidrológica o real.

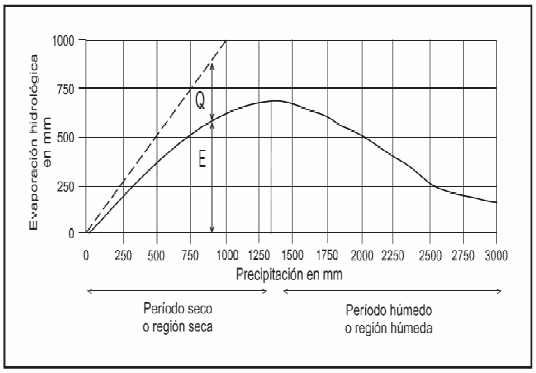
Obviamente los valores de la evaporación hidrológica son menores a los de la meteorológica. Coutagne (1954) propuso una relación entre estos conceptos, mediante dos leyes básicas de la evaporación hidrológica:

- *La evaporación hidrológica aumenta hasta cierto límite con la lluvia caída.*
- *La evaporación hidrológica, a partir de este límite, disminuye con la precipitación.*

Esto se debe a que cuando las precipitaciones son bajas se tiene poca agua disponible para evaporar. En ese caso la evaporación aumenta con la precipitación, pero hasta cierto límite que está dado por la disponibilidad de agua que la atmósfera puede absorber. Pasando ese límite la atmósfera estará en peores condiciones para evaporar si sigue cayendo agua y la evaporación disminuye con la precipitación.

En la Figura 2.1, se aprecia el comportamiento de la evaporación ante un evento de precipitación.

Figura 2.1. Leyes de *Coutagne*. Q, escurrimiento. E, evaporación. Fuente: Coutagne (1954)



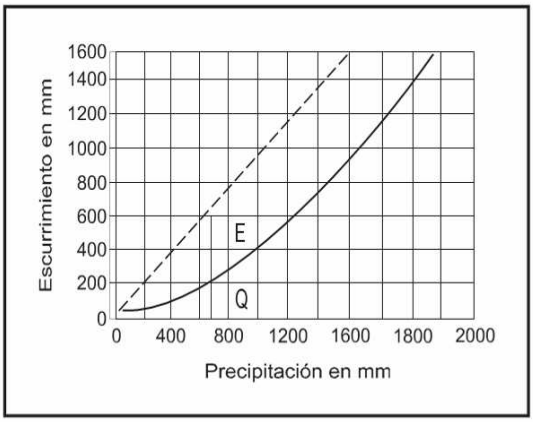
Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

En la curva se observa que un período es seco cuando un aumento de precipitación implica en un aumento de la evaporación. Por otro lado un período es húmedo cuando su punto representativo esté en la rama decreciente de la curva.

La distancia entre la curva y la bisectriz de los ejes es precisamente el escurrimiento total de la cuenca en el período considerado.

Las leyes de Coutagne, también pueden representarse gráficamente en otros ejes. En lugar de precipitación (P) y evaporación (E), se toman precipitación (P) y escurrimiento (Q), tal cual se observa en la Figura 2.2.

Figura 2.2. Leyes de *Coutagne.* E, evaporación. Q, escurrimiento. Fuente: Coutagne (1954)



Se trata de invertir el orden en que estaban los términos en la curva anterior; esto es a partir del eje evaporación (E) se toma el valor escurrimiento (Q) y hacia arriba el valor evaporación (E) limitado por la bisectriz. Gráficamente representadas las Leyes de Coutagne, se observa la casi constancia de E cuando aumenta P.

Las medidas de la evaporación hidrológica no se registran en aparatos, sólo se pueden obtener aplicando fórmulas que toman en cuenta los factores que influyen en la evaporación.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

2.1.5. Evaporación desde superficies líquidas

En la evaporación desde superficies líquidas tiene gran influencia la extensión y la profundidad. La extensión tiene gran importancia debido a los vientos que la recorren, puesto que cuando el viento sopla sobre una superficie muy extensa y llega de una región continental viene seco y al pasar sobre el mar o el lago produce bastante evaporación, pero según va avanzando en su recorrido por encima de la superficie líquida, va cargándose de humedad y cada vez tendrá menor poder evaporante. Por el contrario, si el viento es húmedo, producirá escasa evaporación en toda la superficie recorrida.

En cuanto a la profundidad es muy influyente, debido a que las masas de agua poco profundas se afectan rápidamente por las variaciones de la temperatura del aire. En cambio a mayor profundidad, la temperatura del agua va retrasada con respecto a la del aire, ya que cuando está aumentando la temperatura del aire, la del agua es menor que la de éste. Por tanto en los períodos cálidos la evaporación será menor en profundidades mayores, que en las aguas poco profundas que se ven afectadas por la variación de la temperatura.

La evaporación desde superficies líquidas libres es tan importante que en caso de querer construir un embalse, la evaporación lo puede hacer antieconómico. El siguiente ejemplo explica su importancia:

Si un embalse tiene pérdidas por evaporación, que se estiman aproximadamente a la décima parte de la aportación del río, en caso de que se construyeran diez embalses sobre ese río, todas las reservas del río se evaporarían. (Citado por H. Cifuentes, 2008)

Situación más grave ocurre, cuanto más extenso y menos profundo sean los embalses. Es de tan importancia la pérdida de agua por evaporación, que ha llevado a realizar muchos estudios con el fin de buscar una forma de reducir este fenómeno. Algunos resultados de estos estudios han propuesto extender sobre la superficie líquida otro líquido menos evaporable como algunos aceites. Sin embargo no se ha tenido éxito por dos razones, la primera porque no es fácil de obtener la continuidad en la superficie, y la segunda porque en caso de lograr la

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

continuidad, matan la vida en el agua, tanto animal como vegetal, causando el deterioro de ese cuerpo de agua.

2.1.6. Evaporación desde nieve y hielo

El paso del agua desde la nieve o hielo al estado gaseoso que sucede directamente desde el estado sólido, sin pasar por el estado líquido se denomina sublimación. Algunas características que se conocen de este fenómeno son:

- La sublimación aumenta al haber mayor parte líquida, lo cual sucede poco antes del deshielo, registrándose volatilizaciones muy fuertes.
- La compactación es muy influyente en la evaporación del hielo, ya que nieve reciente con poca compacidad se sublima mucho más, debido a su porosidad dado que mantiene en mayor contacto el aire con su superficie y su parte interna. Al contrario, la nieve que ha estado depositada por mayor tiempo se ha ido comprimiendo, adquiriendo mayor compacidad y por lo tanto menor superficie de contacto con el aire, por lo que el fenómeno se reduce.
- Otro factor que afecta bastante el proceso de sublimación de nieve, son los bosques, dado que la parte de nieve retenida en las ramas es más vulnerable al fenómeno y por el contrario, los árboles al impedir el paso del sol y frenar el viento, pueden también influir disminuyendo la sublimación.

2.1.7. Evaporación a través del suelo

En general las superficies líquidas, nieve y de hielo de las cuencas son relativamente pequeñas en comparación con su área total. Es por esta razón que la evaporación desde superficies líquidas dentro de las cuencas es pequeña. La mayor parte de la evaporación se realiza desde el suelo o a través de vegetales por el proceso de transpiración.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Por lo general la evaporación a partir del suelo se produce en la superficie externa, salvo en casos de terrenos muy porosos, en los cuales puede tener importancia la evaporación desde profundidades mayores.

El fenómeno ocurre debido a que la evaporación resta contenido de humedad en la parte superior del suelo y provoca el ascenso del agua desde capas más profundas, si es que el agua existe en ellas. Puede suceder que casi todo el contenido de humedad se evapore y entonces se llegue a un suelo totalmente seco, pero no necesariamente hay ausencia total de agua, sino que aproximadamente un 5% del volumen del suelo es agua, la cual está unida firmemente a él y que no se pierde por evaporación; es llamada higroscópica.

La diferencia de la tasa de evaporación a través del suelo se diferencia cuando esta ocurre a través de suelos húmedos y desde suelos secos. Se describe a continuación:

- **Evaporación a través de suelo húmedo**: Cuando la superficie del agua subterránea está cercana a la superficie del terreno, el suelo entre esas dos superficies estará suficientemente húmedo, quedando la evaporación del agua subterránea gobernada exclusivamente por las condiciones meteorológicas externas, independientemente de las propiedades físicas del suelo. Esto implica que la velocidad de suministro de agua al frente de evaporación es mayor que la velocidad de evaporación.

- **Evaporación desde suelo seco:** Caso contrario sucede cuando la superficie freática se encuentra suficientemente profunda, pues existirá una capa de suelo superficial bastante seco. En este caso, la velocidad a la cual el perfil de suelo no saturado puede transmitir humedad a la superficie es menor al potencial evaporativo atmosférico, siendo por lo tanto esa la condición limitante. En tal caso la tasa de evaporación del agua subterránea quedará determinada entonces exclusivamente por la capacidad de conducción de humedad del medio poroso no saturado.

Asumiendo que el proceso de evaporación se desarrolla en régimen permanente, el flujo máximo de humedad que el suelo puede transmitir al ambiente para ser evaporado, está determinado por

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

la ubicación del nivel freático del agua subterránea y por las propiedades hidráulicas de transmisión del medio poroso.

En general, los resultados de la evaporación a partir de un suelo natural se expresan en tanto por ciento de la evaporación que se tendría en una superficie líquida. Por ejemplo, en terrenos de arena fina saturados se produce una evaporación del orden del 100% y en suelos arcillosos alcanza valores del 75 al 85%. Si el terreno no está saturado, la evaporación no tiene relación con la naturaleza del suelo, depende exclusivamente de la precipitación. Para estos casos de terreno no saturado es muy difícil llegar a evaluaciones concretas; hay algunas fórmulas, pero son relativamente de poca garantía y poca utilidad. (Citado por H. Cifuentes, 2008)

2.1.8. Transpiración

Es el proceso por el cual, el agua cambia de estado líquido a gaseoso, a través de las plantas y vuelve a la atmósfera en forma de vapor. En el proceso a las hojas de la planta llega gran cantidad de agua absorbida por las raíces, de ésta, sólo una pequeña parte se utiliza en la fotosíntesis, el resto pasa al exterior en forma de vapor.

Cabe señalar que la superficie de evaporación es muy superior a la superficie aparente de la hoja, porque se produce no sólo desde la superficie, sino también desde el interior de las hojas, es decir, a través de los poros el aire alcanza la masa vegetal interior contribuyendo así a la evaporación.

La transpiración también depende del poder evaporante de la atmósfera, y de otros factores tales como: temperatura, humedad y velocidad del viento. La humedad del suelo es un factor influyente, y que en el caso de que el suelo no se encuentre totalmente seco, la planta no podrá absorber el agua por la raíz y posteriormente transmitirla al resto de la planta, es por esta razón que a baja humedad en el suelo, el proceso de transpiración concluye.

La medición de la transpiración se realiza con métodos similares a los de la evaporación es decir, desde el suelo. La diferencia es que en lugar de trabajar con un suelo desnudo, se trabaja

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

con un suelo en el que se han plantado distintas especies vegetales y se estudia la influencia de una u otra especie en la transpiración. También se comparan períodos distintos de la vida de la planta (fenología), para observar el comportamiento de la transpiración. De esta forma se puede conocer la transpiración que esa planta va a producir en las distintas fases de su proceso biológico y obtener una serie de datos con los cuales se puede preveer la necesidad de agua en un determinado cultivo vegetal.

La transpiración tiene una triple variación o ciclo: diurna, estacional e interanual.

La variación diurna sigue aproximadamente la misma curva que la evaporación, salvo en la noche. *La* evaporación tiene un máximo de día y un mínimo de noche, pero en las plantas el mínimo de transpiración puede registrar valores muy bajos, sin llegar a cero, porque la vida vegetal se amortigua notablemente en las horas nocturnas.

Lo mismo ocurre con las variaciones estacionales, la transpiración en los distintos meses del año sigue un ciclo análogo al de la evaporación, con la diferencia de que en plantas de hoja caduca el ciclo se interrumpe durante unos meses del año. En esta época de dormancia se lleva a cabo la transpiración a través de las lenticelas, aunque con valores muy bajos.

Con respecto a la variación interanual, se puede decir que sigue rigurosamente el ciclo de la evaporación. En años en que la evaporación es máxima, también lo es la transpiración.

2.2. Aguas Subterráneas y Acuíferos

Las aguas subterráneas forman grandes depósitos que en muchos lugares constituyen la única fuente de agua potable disponible. A veces, cuando circulan bajo tierra, forman grandes sistemas de cuevas y galerías. En algunos lugares regresan a la superficie, brotando de la tierra en forma de fuentes o manantiales. Otras, hay que ir a recogerlas a distintas profundidades excavando pozos.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Casi la totalidad del agua subterránea es agua meteórica proveniente de la precipitación. Además en algunos casos se puede encontrar agua de formación, la cual proviene del periodo de formación o depositación de las rocas y generalmente poseen un alto contenido salino. En menores cantidades también existe la llamada agua juvenil, la cual se forma químicamente dentro del subsuelo y traída a la superficie por rocas intrusivas. Tanto el agua de formación como el agua juvenil con frecuencia son la fuente de minerales indeseables en el agua subterránea, los cuales resultan perjudiciales en el caso de que sea consumida por humanos**.**

La diferencia entre la cantidad de precipitación y la cantidad de agua arrastrada se filtra bajo el suelo y conforma el agua subterránea. La filtración depende de las características físicas de las rocas. La porosidad no es sinónimo de permeabilidad, pues determinadas rocas como las arcillosas, aunque tienen una gran porosidad, son prácticamente impermeables ya que no disponen de conductos que se comuniquen.

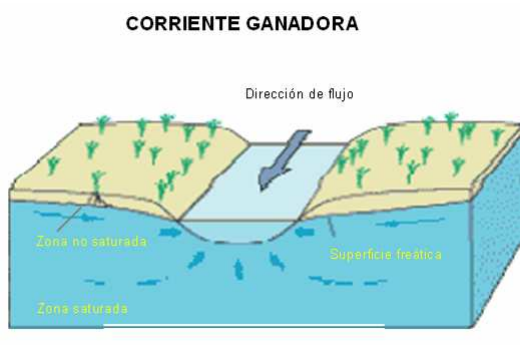
El agua lluvia es infiltrada y percolada sobre laderas, desde corrientes y lagos. La percolación directa es el proceso más efectivo en la recarga del agua subterránea, donde los suelos son altamente permeables o donde la capa freática está cerca de la superficie del terreno.

En sitios donde la precipitación anual es relativamente baja y la capa freática está a cientos de metros bajo la superficie, se puede esperar muy poca o nula recarga. En estas áreas, el agua de irrigación puede producir alguna recarga, pero la infiltración del agua de los ríos, a través de gravas permeables del lecho, será posiblemente la mayor fuente de recarga. Los ríos que contribuyen al agua subterránea se denominan *corrientes perdedoras,* y los que reciben aportes del agua subterránea *corrientes ganadoras*. Las corrientes perdedoras se secan con frecuencia durante sequías prolongadas, cuando la percolación absorbe todo el caudal disponible, comportándose así como corrientes intermitentes.

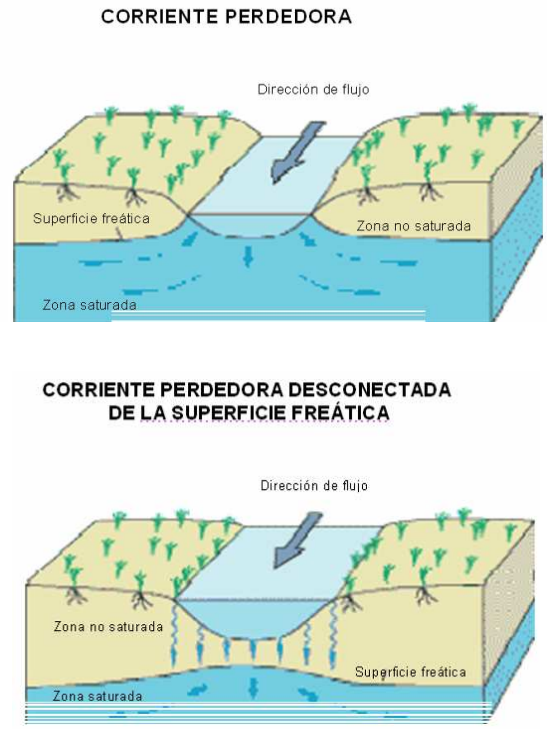
Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

La Figura 2.3 muestra algunas de las interacciones posibles entre un cauce superficial y el sistema de aguas subterráneas. Las mayores pérdidas por percolación ocurren en tramos cortos de alta permeabilidad, por ejemplo, lechos de grava procedentes de abanicos aluviales.

Figura 2.3. Interacción entre flujo superficial y sistema de aguas subterráneas



Fuente: Carlos Espinoza (2004)



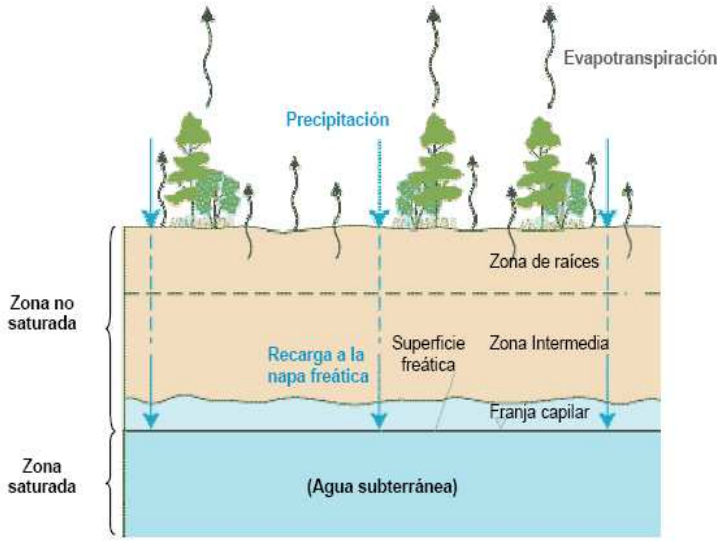
Fuente: Espinoza (2004)

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

2.2.1. Zona Saturada y Zona No Saturada

El agua subterránea se puede presentar en dos zonas: *zona saturada y zona no saturada*, tal como se observa en la figura 2.4.

Figura 2.4. Distribución del agua en la subsuperficie



Fuente: Carlos Espinoza (2004)

a) Zona no saturada

Se encuentra inmediatamente por debajo de la superficie terrestre y contiene en sus poros agua y aire en proporciones variables. Funciona como un gran reservorio, que descarga agua a la zona saturada cuando es recargado por algún evento, pudiendo durar dicha descarga un período relativamente largo después de haber cesado la entrada superficial. Generalmente se observan tres subzonas:

- *Zona de raíces:* En esta zona se observan raíces vivas, vacíos dejados por raíces muertas, vegetación pre-existente y/o cadáveres de animales y lombrices. Está sujeta a grandes fluctuaciones en contenido de humedad debido a la evaporación, transpiración vegetal y eventos de precipitación.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

- *Zona intermedia:* El agua en esta zona puede desplazarse verticalmente (percolación) hasta alcanzar la zona saturada, o bien puede quedar retenida debido a la tensión superficial, una vez que ha terminado el drenaje gravitacional.

- *Franja de ascenso capilar:* Corresponde a la parte más baja de la zona no saturada. Se extiende desde la superficie freática hasta el límite de ascenso capilar. El espesor de esta zona depende del tamaño de los poros del suelo. El agua en esta zona se encuentra bajo tensión, o presión hidráulica negativa.

b) Zona saturada

En esta zona todos los poros interconectados se encuentran llenos de agua y sujetos a presión hidrostática. La recarga de la zona saturada ocurre por infiltración y posterior percolación del agua desde la superficie terrestre, a través de la zona no saturada.

2.2.2. Formaciones geológicas y las aguas subterráneas

De acuerdo a la capacidad para almacenar y transmitir aguas subterráneas, las formaciones geológicas se clasifican en las siguientes cuatro categorías:

***Acuíferos*:** Son formaciones geológicas de gran porosidad y permeabilidad, capaces de almacenar y transmitir agua en forma apreciable. Como conductos de transmisión transportan el agua subterránea desde las áreas de recarga hacia lagos, cauces, pantanos, manantiales, pozos y otras estructuras de captación. Como depósitos de almacenamiento, los acuíferos actúan suministrando agua de sus reservas para ser utilizada cuando la extracción exceda a la recarga y, a la vez, almacenando agua durante los períodos en que la recarga resulta mayor que la extracción.

***Acuitardos*:** Son formaciones geológicas semipermeables que, conteniendo agua en gran cantidad, la trasmiten muy lentamente. Un claro ejemplo son las formaciones de arcillas limosas y arenosas las cuales se comportan como acuitardo. En determinados casos, la

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

presencia de un acuitardo puede proporcionar a un acuífero que esté en contacto con él, una recarga vertical que puede llegar a ser importante.

***Acuicludos o acuicierres*:** Son formaciones geológicas impermeables, las cuales contienen agua, pero que no la transmiten, haciendo de este modo imposible su explotación. En el caso de las arcillas, que a pesar de contener enormes cantidades de agua, no la drenan por gravedad ni succión, ni la dejan pasar.

***Acuífugos*:** Son aquellas formaciones geológicas impermeables que no contienen agua ni la pueden transmitir, tales como los macizos rocosos no alterados.

2.2.3. Tipos de Acuíferos

Las formaciones geológicas que constituyen acuíferos pueden incluirse en uno de los siguientes dos grupos:

Acuíferos formados por depósitos no consolidados: Los acuíferos formados por depósitos no consolidados están constituidos por materiales sueltos, fundamentalmente arenas, gravas o mezclas de ambas, de origen geológico muy diverso

Acuíferos formados por rocas consolidadas: Los acuíferos formados por rocas consolidadas pueden presentarse en:

- Calizas y dolomitas (fisuradas, fracturadas).
- Conglomerados o areniscas (disueltas y con algunas partes cementadas)
- Rocas volcánicas alteradas (escoriáceas)
- Algunas rocas cristalinas (granitos fracturados)

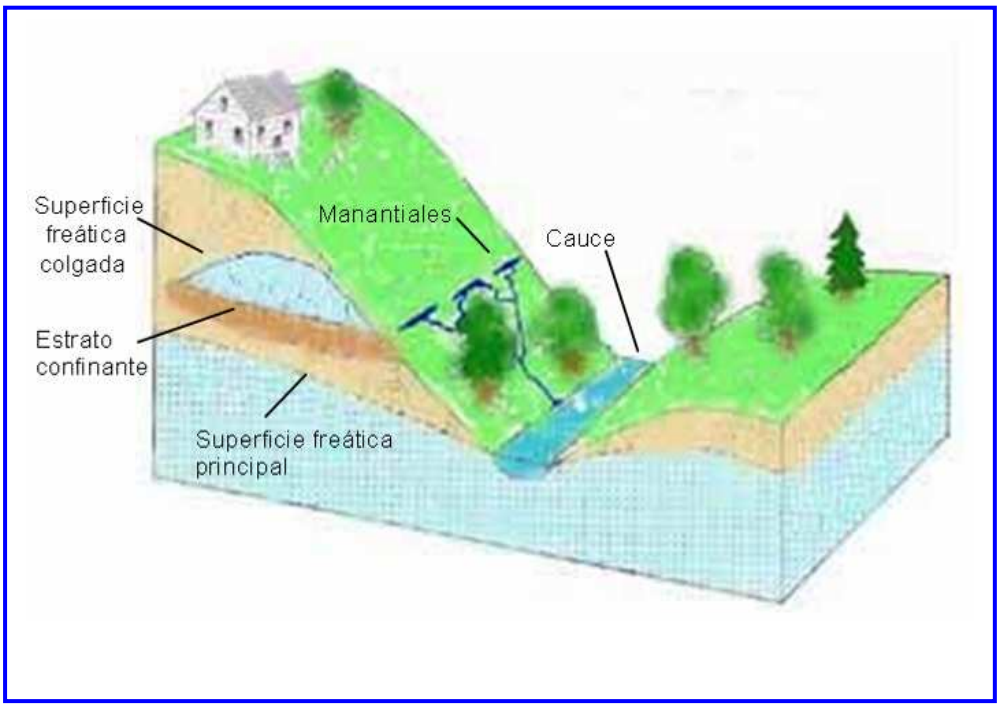
Según el grado de confinamiento de las aguas que contienen, los acuíferos pueden clasificarse en cuatro tipos:

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Acuíferos libres: Son aquellos en que el agua subterránea presenta una superficie libre, sujeta a presión atmosférica, como límite superior de la zona de saturación. Esta superficie libre se conoce como superficie freática y el nivel al cual se ubica, respecto a otro de referencia, es el nivel freático. Los acuíferos libres, en general están formados por un estrato permeable parcialmente saturado de agua, que yace sobre otro estrato impermeable. En la mayoría de los casos existe solamente un nivel freático, pero en algunos casos, a causa de la presencia de acuicierres o acuitardos de pequeñas dimensiones relativas, pueden existir acuíferos que se denominan acuíferos colgados, con niveles freáticos adicionales, tal como se muestra en la Figura 2.5.

En algunos acuíferos libres compuestos de partículas finas, el drenaje por gravedad de los poros con frecuencia puede que no sea instantáneo. En ese caso, el acuífero entrega el agua un cierto tiempo después de que el nivel freático baja en el mismo. A este tipo de acuífero se les denomina libres con entrega retardada.

Figura 2.5. Acuífero libre y Acuífero colgado

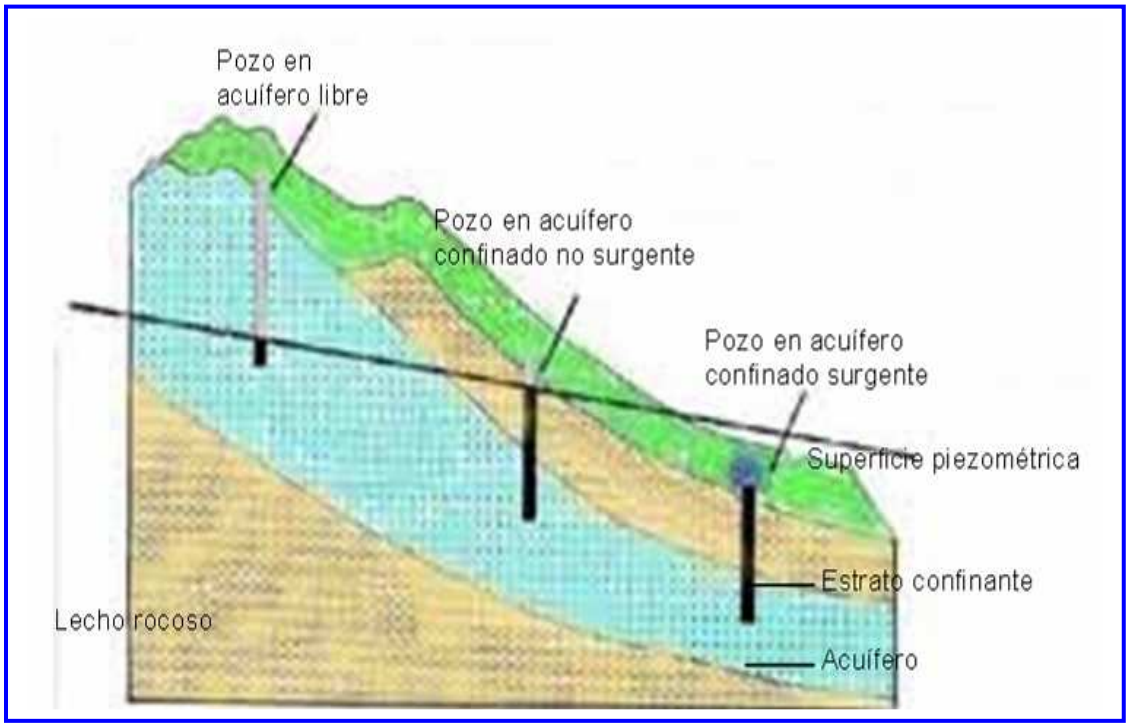


Fuente: Carlos Espinoza (2004)

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Acuíferos confinados o artesianos: Son formaciones geológicas permeables, completamente saturadas de agua, confinadas entre dos capas o estratos impermeables o prácticamente impermeables, tal como se representa en la Figura 2.6. En estos acuíferos, el agua está sometida, en general, a una presión mayor que la atmosférica, y al perforar un pozo en ellos, el agua se eleva por encima de la parte superior del acuífero, hasta un nivel que se denomina nivel piezométrico. La superficie imaginaria que representa la carga piezométrica en los distintos puntos del acuífero se conoce como superficie piezométrica. En algunos casos, la superficie piezométrica puede estar por encima del nivel del terreno natural, por lo que un pozo perforado en el lugar fluirá solo, como si fuera un manantial (pozo en acuífero confinado surgente o pozo artesiano).

Figura 2.6. Pozos en acuífero libre y acuífero confinado



Fuente: Carlos Espinoza (2004)

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Acuíferos semiconfinados: Son acuíferos completamente saturados, sometidos a presión, que están limitados en su parte superior por una capa semipermeable (acuitardo) y en su parte inferior por una capa impermeable (acuicierre o acuífugo). En este tipo de acuífero, la disminución de la carga piezométrica originada por el bombeo, por ejemplo, inducirá un flujo vertical del agua contenida en el acuitardo, que actuará como recarga del acuífero. Las características del acuitardo confinante en un acuífero semiconfinado son tales que puede ignorarse la componente horizontal del flujo en el acuitardo.

Acuíferos semilibres: Representan una situación intermedia entre un acuífero libre y uno semiconfinado. En este caso, la capa confinante superior es un estrato semipermeable o acuitardo, de características tales que la componente horizontal del flujo no puede ignorarse. El comportamiento de este tipo de acuífero es similar al que se presenta en un acuífero libre con entrega retardada o drenaje diferido.

2.2.4. Propiedades Hidráulicas de los suelos

Porosidad (P): La porosidad de un medio poroso o fracturado se define como la razón entre el volumen de vacíos y el volumen total del medio. En materiales granulares, depende del tipo de arreglo de empaque, de la forma de los granos y de la distribución de tamaño de los granos. La porosidad de una roca es igual a la suma del rendimiento específico (S_y) y la retención específica (S_r).

$$P = \frac{V_v}{V_T} = \frac{V_v}{V_v + V_s}$$

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Porosidad efectiva (P_e): Corresponde a la porosidad disponible para la circulación de un fluido en un determinado medio. La porosidad efectiva de un determinado tipo de suelo es igual a la razón entre el volumen de poros interconectados que sean suficientemente grandes para contener moléculas de agua y el volumen total de suelo o roca. En la práctica, la porosidad efectiva de arenas y gravas puede ser considerada equivalente al valor del rendimiento específico S_y, o bien equivalente a la diferencia entre la porosidad total θ y la retención específica S_r.

Rendimiento específico (S_y): Corresponde a la razón entre el agua que drena gravitacionalmente desde una roca o suelo saturado y el volumen total.

Retención específica (S_r): Se define como la razón entre la cantidad de agua que un volumen de suelo es capaz de retener en contra de la gravedad y el volumen total de suelo.

2.2.5. Ley de Darcy

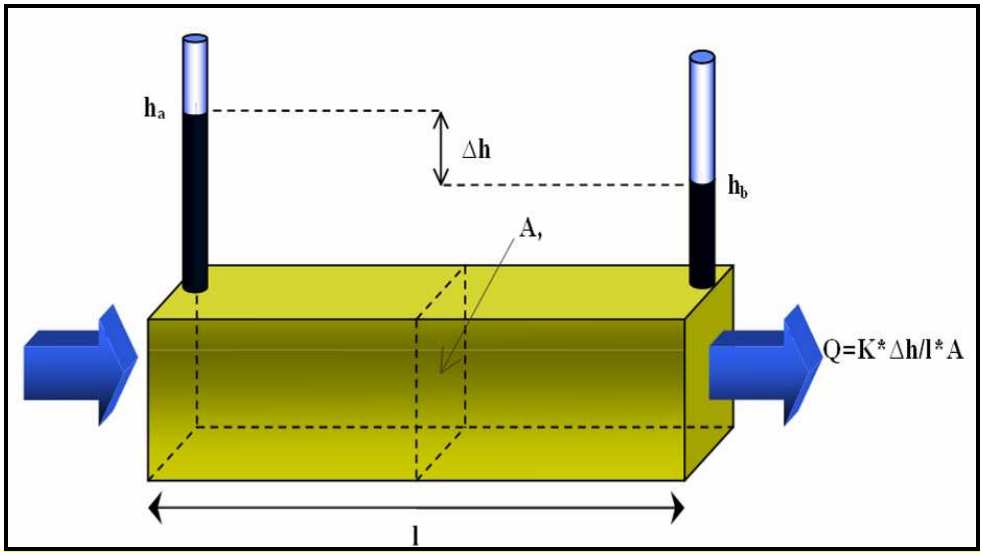
Henry Darcy, ingeniero hidráulico francés, observó en 1856 que el caudal de flujo laminar de un fluido (de densidad y temperatura constantes) entre dos puntos en un medio poroso es proporcional al gradiente hidráulico (dh/dl) entre los dos puntos (Custodio, 1996). La ecuación que describe la tasa de flujo a través de un medio poroso es conocida como Ley de Darcy y está dada por la siguiente ecuación:

$$Q = -K * A * \frac{dh}{dl}$$

En la Figura 2.7 se describe la situación.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Figura 2.7. Ley de Darcy para un medio homogéneo



Conductividad hidráulica (K): También llamada permeabilidad hidráulica. Corresponde a la constante de proporcionalidad en la ecuación que describe la Ley de Darcy y representa la mayor o menor facilidad con que el medio deja pasar el agua a través de él por unidad de área transversal a la dirección del flujo. Tiene dimensiones de velocidad [L T^{-1}].

K es función de las propiedades tanto del medio poroso como del fluido que circula a través de él. Como lo indica la siguiente ecuación

$$K = \frac{k * \rho * g}{\mu}$$

La permeabilidad intrínseca de un medio k es una función de la forma o diámetro y distribución de tamaño de los poros. Distintos autores han propuesto relaciones empíricas que la describen; Fair and Hatch, (citados por Custodio y Llamas, 1996), utilizan para representarla factores de empaque, factores de forma y el promedio geométrico del tamaño de granos; Krumbein (citado por Custodio y Llamas, 1996), la aproxima utilizando el cuadrado del diámetro promedio de los granos. Los valores de ρ y de μ se ven influidos por la temperatura del fluido. Además, ρ depende de la cantidad de sólidos disueltos totales.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

2.2.6. Transmisibilidad (T)

Es una medida de la cantidad de fluido que puede ser transmitida horizontalmente a través de una sección de acuífero de ancho unitario, que involucre todo el espesor saturado, bajo un gradiente hidráulico igual a la unidad. Se obtiene haciendo el producto entre el espesor saturado del acuífero, b, y su conductividad hidráulica, K, tiene las dimensiones [$L^2 T^{-1}$], y se indica en la siguiente ecuación.

$$T = K * b$$

2.2.7. Coeficiente de Almacenamiento (S)

Se define como el volumen de agua que puede ser liberado por un prisma vertical de acuífero, de sección unitaria y de altura igual a su espesor saturado, cuando se produce un descenso unitario de la carga hidráulica (del nivel piezométrico o del nivel freático). S es un coeficiente adimensional. Al nivel de la superficie freática, en el caso de un acuífero libre, el agua es liberada del almacenamiento por drenaje gravitacional. Bajo la superficie freática, o dentro del acuífero mismo en el caso de un acuífero confinado, el agua es expelida debido a la compresión del esqueleto sólido del suelo y a la expansión del agua en los poros, ambas producidas por el descenso de la carga hidráulica sobre el acuífero. Debido a lo anterior, el coeficiente de almacenamiento S tiene distintas expresiones dependiendo del tipo de acuífero descrito. Para este informe se considera caso de acuífero libre.

Coeficiente de almacenamiento en un acuífero libre: Dentro de un acuífero libre, el nivel de saturación varía a medida que el agua es añadida o removida del acuífero. Cuando el nivel freático desciende, el agua es liberada tanto por el drenaje gravitacional como por la compactación del esqueleto y la expansión del agua en los poros. Por lo tanto, el coeficiente de almacenamiento de un acuífero libre está dado por la suma del rendimiento específico (Sy) y el volumen de agua liberado debido al almacenamiento específico (Ss):

$$S = S_Y + h * S_s$$

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

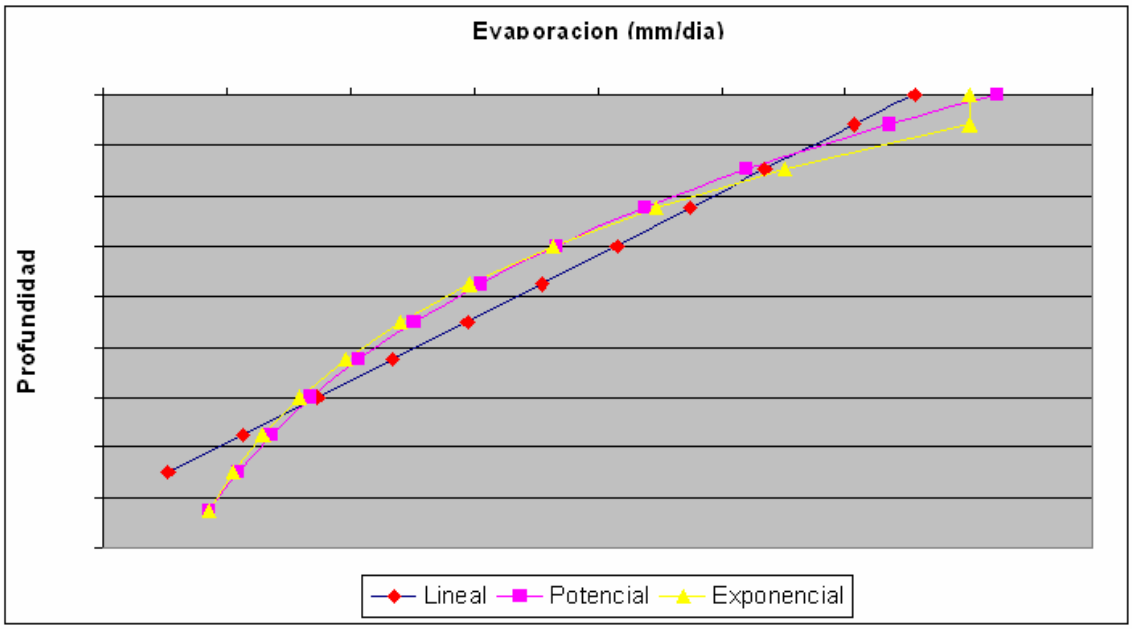
2.2.8. Curva de evaporación

La curva de evaporación describe el comportamiento de la tasa de evaporación a medida que la profundidad del nivel freático aumenta positivamente hacia abajo.

De esta forma es posible calcular de tasa de evaporación para distintas profundidades del nivel freático, la cual puede adoptar variadas formas, dependiendo de la textura del suelo y de la compactación a la que se encuentre.

A los puntos de tasa de evaporación, se ajustan modelos matemáticos conocidos, donde las ecuaciones mas comunes son el modelo lineal, potencial y exponencial, las cuales se observan en la figura 2.9.

Figura 2.9. Comportamiento típico de una curva de evaporación.



En la figura 2.8 se observa el típico comportamiento de tasa de evaporación a medida que la profundidad aumenta, en donde la evaporación decrece adoptando diferentes manera, en este caso lineal, potencial y exponencial.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

2.2.8. Relación Humedad – Succión en el suelo

De acuerdo a la Ley de Darcy, para casos de suelos no saturados, se puede establecer lo siguiente:

- La permeabilidad en un suelo no saturado, disminuye a medida que se reduce el contenido de humedad (θ).

$$v = - K(\theta) \text{ grad } \psi$$

Donde el gradiente de potencial (grad ψ), es el gradiente de la carga hidráulica total (grad H) y H la carga hidráulica que puede expresarse como la diferencia:

$$H = h(\theta) - Z$$

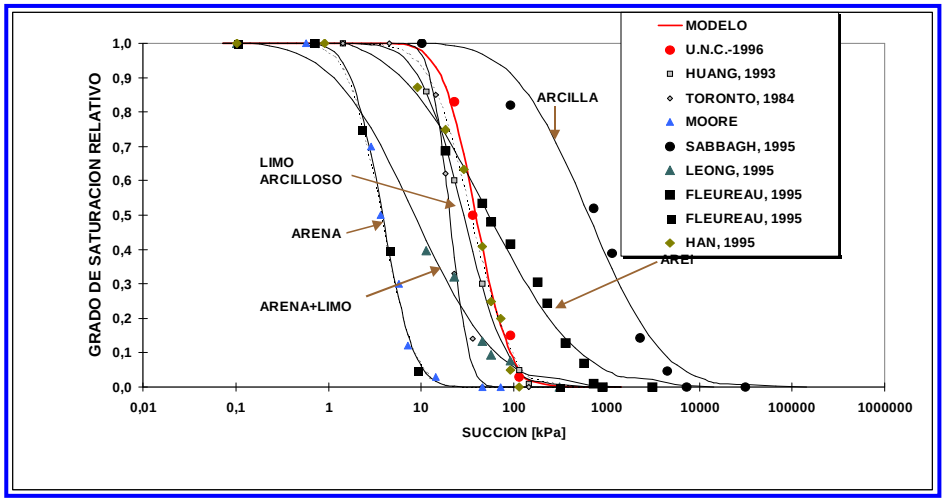
donde $h(\theta)$ representa la variación que experimenta la succión del agua en función del contenido de humedad y Z representa la profundidad respecto a un sistema de referencia ubicado en la superficie del suelo y orientado hacia abajo.

Las curvas $h(\theta)$ y $K(\theta)$, pueden obtenerse directamente en terreno o en laboratorio a partir de una muestra no perturbada. La curva de succión $h(\theta)$ puede obtenerse efectuando medidas de la presión h en distintos horizontes del perfil del suelo, y simultáneamente medidas del contenido de humedad θ.

La relación entre h y θ, establecida para una evolución continua del contenido de humedad, entrega directamente la curva de succión, cuya forma se indica en la Fig. 2.9, que muestra ejemplos de curvas de succión para suelos de diferente textura.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Figura 2.9. Curvas de humedad – succión (Fredlund, et al. 1990)



2.2.9. Factores que afectan la permeabilidad de los suelos

La permeabilidad de un suelo depende de la textura, grado de compactación, estructura, la disposición por capas y cantidad de poros. El tamaño de los poros y número de poros del suelo reviste gran importancia con respecto a la tasa de filtración y percolación, como también guardan estrecha relación con la textura y la estructura del suelo. A continuación se detallan los factores más importantes que afectan en la permeabilidad de un suelo.

Grado de compactación: La permeabilidad de un suelo compactado, como sus otras propiedades mecánicas, dependen de su relación de vacíos, de su estructura y de su grado de saturación, las cuales están directamente relacionado con la compactación.

El factor que más afecta la permeabilidad de un suelo compactado es la estructuración, debido a que a mayor distorsión entre partículas de suelo producida por la compactación, se obtiene menor permeabilidad y las diferencias por este efecto son muy importantes. La permeabilidad de un suelo compactado, independiente cual sea, puede variar mucho con las condiciones de compactación, sobre todo con las que influyan en la estructuración del suelo, que es con demasía el factor más influyente.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Textura y estructura del suelo: Como se muestra en la tabla 2.1, mientras más fina sea la textura del suelo, más lenta será la permeabilidad.

Tabla 2.1. Permeabilidad de los suelos según la textura. Fuente(ftp://ftp.fao.org/FI/Cdrom)

Suelo	Textura	Permeabilidad
Suelos Arcillosos	Fina	De muy lenta a muy rápida
Suelos Orgánicos	Moderadamente Fina	
Suelos Limosos	Moderadamente Fina	
	Moderadamente Gruesa	
Suelos arenosos	Gruesa	

La estructura del suelo puede modificar considerablemente las tasas de permeabilidad, tal como se muestra en la tabla 2.2.

Tabla 2.2. Permeabilidad de suelos según estructura. Fuente(ftp://ftp.fao.org/FI/Cdrom)

Tipo de estructura		Permeabilidad
Laminar	Gran traslapo	De muy lenta a muy rápida
	Ligero traslapo	
Prismática		
Granular		

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

3. METODOLOGÍA

A continuación se detalla la metodología utilizada para lograr el objetivo propuesto en esta investigación. Primero se realizaron ensayos a los suelos utilizados en las columnas, tanto en su estado suelto como compactado. Posteriormente se efectuaron ensayos de calibración, el cual consta en representar el comportamiento de acuíferos para distintos suelos finos. Estos tienen variadas profundidades de nivel freático, las cuales están representadas en las diferentes alturas de las columnas de suelo.

Una vez determinadas los descensos de niveles de agua en el interior de las columnas de suelos, calcula la tasa de descensos para las siete columnas. De este modo, con los valores de tasa de evaporación obtenidos se ajustan a los modelos matemáticos de evaporación, los cuales son estudiados en el presente capítulo. Para finalizar se describe el proceso y el montaje de validación los ensayos realizados.

De esta manera, en este capítulo se describe la metodología, el proceso, procedimientos, equipos, materiales y la validación llevada a cabo para cumplir con los objetivos propuestos al principio de este estudio.

3.1 Caracterización de suelos utilizados

Paralelamente a las mediciones realizadas a los descensos de agua, se efectuaron ensayos a los suelos utilizados en la experimentación, en su estado compactado y no compactado según sea el requerimiento.

Primero se realizó una clasificación de suelos a través de método U.S.C.S. y AASHTO. Para el método U.S.C.S. se realizaron los límites de Atterberg, en los tres suelos en estudio, obteniendo los límites líquido (siguiendo el procedimiento de la Nch 1517-1), límite plástico (a través de la Nch 1517-2) y el índice de plasticidad, para después ingresar al grafico de plasticidad y clasificar el suelo. En cuanto al método AASHTO se realizaron granulometrías y con el límite liquido e índice de plasticidad se efectúo la clasificación de los tres suelos.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Teniendo en cuenta que la máxima compacidad de un suelo, para una energía fija de compactación, depende del contenido de humedad presente en el suelo en el momento de la compactación, se realizo un Proctor modificado a los tres suelos, siguiendo el procedimiento de la Nch 1534. De esta manera se obtiene la humedad óptima para la cual se produce la máxima compactación.

Los resultados obtenidos de densidad compactada y humedad proporcionan un valor referencial. De modo que en la experimentación las columnas que contengan suelos compactados tienen una densidad y humedad muy parecida a los valores obtenidos o en un rango cercano.

En cuanto a los tres suelos en estado suelto se realizó el ensayo de densidad aparente suelta y se calculó la humedad en estado natural. Estos valores obtenidos se asemejan al suelo en estado suelto en el interior de las columnas de suelo, puesto que el suelo se agregó en los tubos sin ninguna compactación; solo se acomodó el suelo con la mano el cual se encontraba con una humedad natural.

El ensayo de permeabilidad se efectúo con un permeámetro marca SOILTEST de carga constante disponible en el laboratorio de suelos. Así, se midió la permeabilidad para los tres suelos en estado compactado y no compactado, en donde los valores obtenidos sirven para comparar la permeabilidad entre los cinco suelos y determinar cual es su capacidad de transmitir agua.

3.2 Ensayos de calibración

El proceso que se lleva a cabo tiene como objetivo determinar la tasa de evaporación de los cinco suelos en estudio. Esta tasa puede depender de factores externos que puedan alterar los resultados, como por ejemplo, fluctuaciones de flujos de calor. En este caso es despreciable, ya que los ensayos se realizan en la misma época del año, con temperaturas que no se excede de un rango aceptable. Otro factor externo es el viento, pero en este caso también es descartado, debido a que los ensayos se realizan en un medio cerrado sin presencia de viento.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

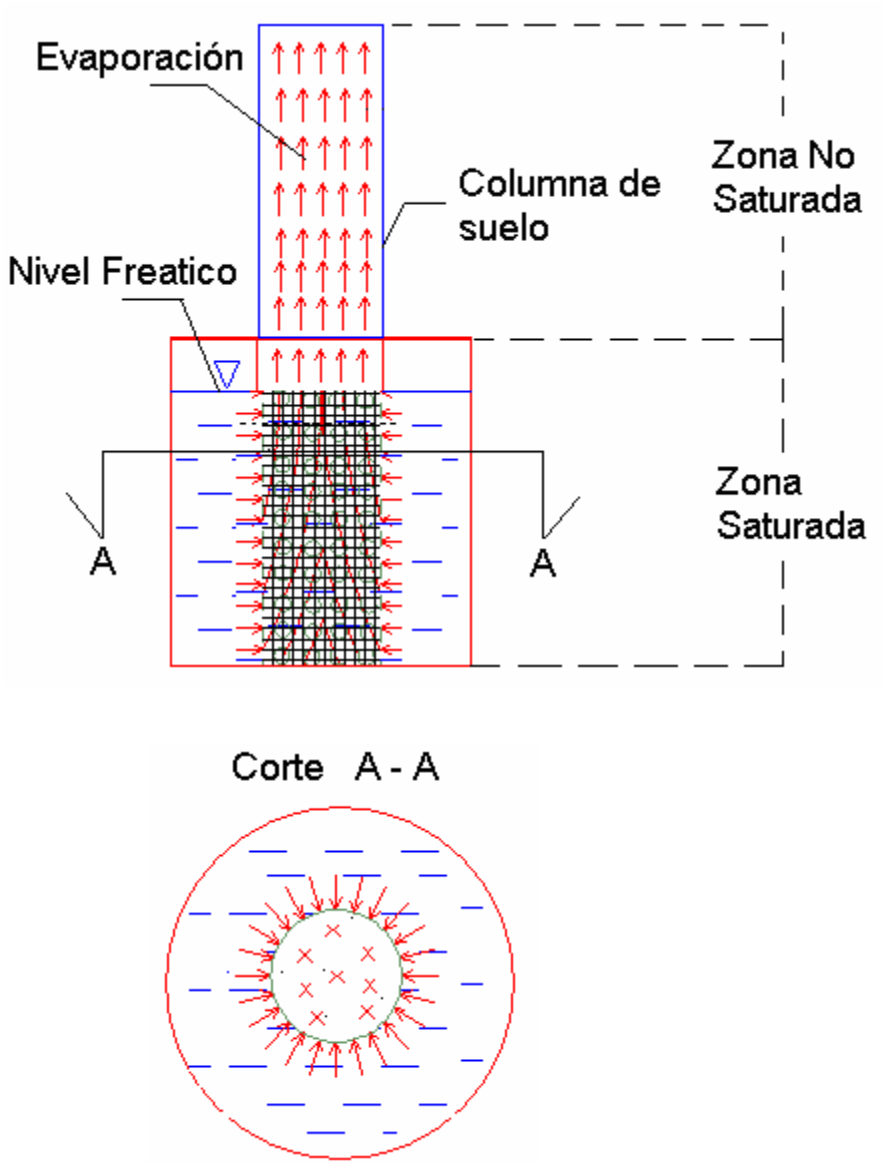
Es por esta razón que la tasa evaporante depende directamente de la profundidad de la napa freática, de las propiedades de conductividad hidráulica de los suelos no saturados y de la capacidad evaporante del ambiente. De esta manera se analiza comparativamente los modelos de evaporación.

De esta forma se realiza una simulación de un acuífero teniendo el nivel freático a diferentes profundidades, en donde se produce evaporación en cada uno de las profundidades freáticas. Esto se realiza montando un equipo que cuenta con varios tubos de PVC, los cuales tienen en su interior una porción de suelo, en su parte inferior tiene un balde con agua, la cual fluye solamente por el interior de la columna de suelo y se evapora hacia el exterior. Esto se realiza ranurando la porción de PVC que está sumergida en el agua para provocar la circulación de agua hacia el interior. Para evitar que el suelo en el interior del tubo escape al exterior de él, se envuelve el perímetro de PVC en contacto con el agua. En la parte superior del sistema se coloca una fuente de energía con el fin de inducir la evaporación, esta se ubica a 25 cm sobre la parte superior de las siete columnas de suelo.

Una vez montado el sistema se espera alcanzar el equilibrio de los niveles de agua en el interior de las siete columnas, para después comenzar a medir el descenso de los niveles de agua en los recipientes. Las mediciones tardarán una semana por cada suelo, además éstas se realizan diariamente, aplicando la fuente de energía día y noche. De esta forma tomando en cuenta que son cinco suelos los ensayos demoran un mes y una semana en realizarse.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Figura 3.1. Proceso de evaporación del sistema propuesto.



Fuente: Elaboración propia

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

El estudio se realiza para siete profundidades de napa subterránea que representan las alturas a las que se encuentra el nivel freático. Estas tienen alturas de 0; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0; 1,25 y 1,5 metros, siendo la evaporación a la profundidad de cero metros la que ocurre con el nivel freático en la superficie.

Las mediciones se realizan de lunes a viernes en las mañanas y tardes, en las cuales se mide el descenso en milímetros y la temperatura que registra la columna de suelo a través de su altura cada 15 cm.

Cabe señalar que el descenso en el interior de la columna de suelo se calcula midiendo el descenso en el recipiente de agua, el cual se multiplica por el área de éste. Al valor obtenido se divide por el área de la columna de suelo y de esta manera se obtiene el descenso en el interior de la columna de suelo.

Una vez terminado el proceso es posible conocer el comportamiento real de la tasa de evaporación, a través de la sustracción entre el descenso de un día y el siguiente a la misma hora. Después, mediante un ajuste de mínimos cuadrados realizados a los datos de tasa de evaporación, se obtienen las tres curvas, las cuales facilitan la obtención de las constantes que ayudarán a identificar a cada modelo de evaporización.

Posteriormente la tasa real es tomada como patrón para comparar los tres modelos de evaporización antes descritos, e identificar cual de ellos representa mejor el comportamiento real de la evaporación para los cinco casos de suelos.

3.2.1 Equipos utilizados de calibración

Con el fin de inducir la evaporación en la parte superior de las siete columnas de suelo, se aplica una fuente de energía, donde llega la radiación uniforme en toda la superficie sobre el suelo.

Para generar calor se utiliza como fuente de energía ampolletas infrarrojas, marca Phillips de 250 W, las cuales están ubicadas en las siete alturas de nivel freático a una altura constante de 25 cm sobre la parte superior de cada columna.

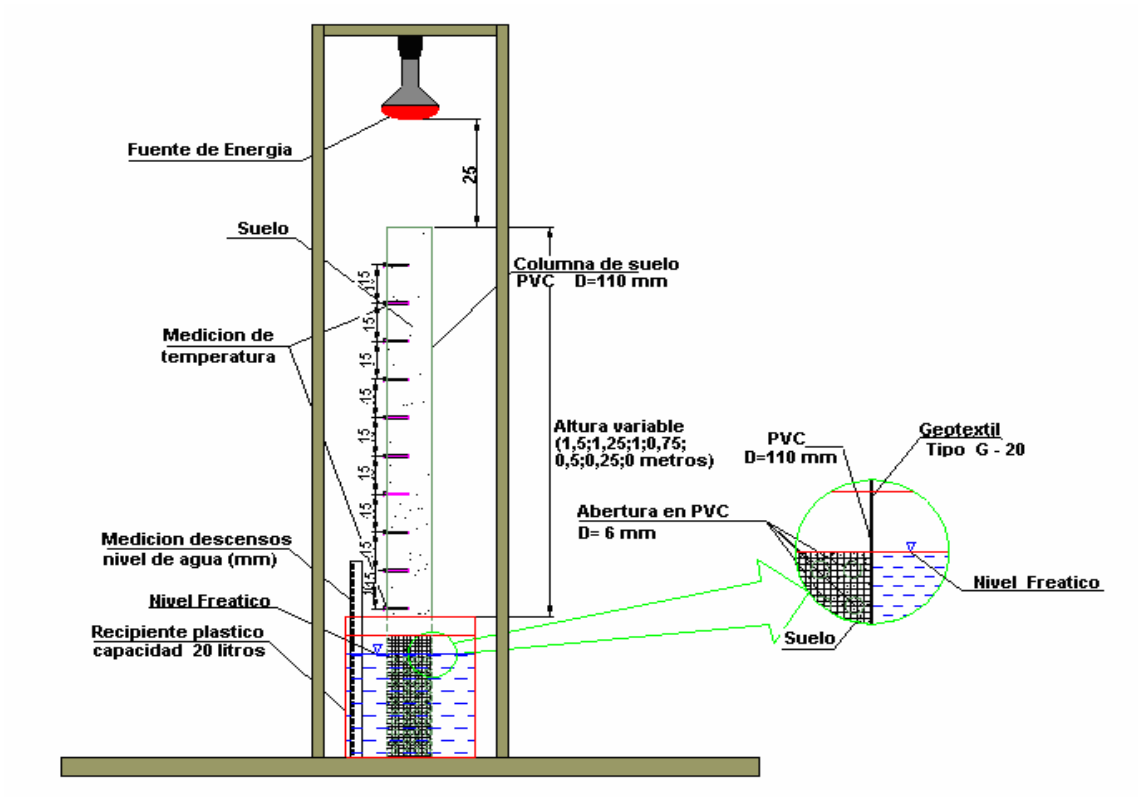
Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

De modo que el agua evacue solamente por la parte superior de las columnas, estas están herméticamente selladas con silicona por los contornos, realizándose el mismo procedimiento con las tapas de los cubetas.

De este modo se mide la tasa de evaporación, para un limo compactado y no compactado, arcillas compactado y no compactado y suelo orgánico. Esto es para las siete profundidades de napa freáticas.

Para realizar en ensayo descrito, se monta el equipo mostrado en la figura 3.2.

Figura 3.2. Esquema sistema utilizado



Fuente: Elaboración propia

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Los materiales utilizados en el montaje del sistema son los siguientes:

- Tinetas con capacidad de 20 litros, para almacenar agua
- 7 tubos de PVC de 1,87; 1,62; 1,37; 1,12; 0,87; 0,62; 0,37 metros
- ampolletas infrarrojas Philips de 250 W
- Un termómetro digital
- Geotextil G 20
- Huincha para medir
- Limo, arcilla y suelo orgánico

3.2.2 Montaje de las columnas

El primer paso es preparar el mueble que tiene como objetivo soportar todo el sistema eléctrico y entregarle rigidez al conjunto en general. Paralelamente se cortan las columnas, las cuales estas formadas por tubos de PVC de 110 mm de diámetro, según las medidas ya indicadas y se ranura en el perímetro que estará en contacto con el agua.

Para evitar que se escape el suelo fino fuera de las columnas, se coloca un geotextil por toda la superficie en contacto con el agua y se enrolla con huincha adhesiva para dar firmeza. De esta forma se asegura que el flujo escape solamente por el interior de la columna. Una vez colocada las columnas sobre las tinetas, se procede a colocar el suelo fino sobre cada una de ellas, donde los ensayos a realizar son cinco, en la siguiente secuencia: suelo limoso y arcilloso, con y sin compactar y suelo orgánico sin compactar.

Para compactar el limo y arcilla se realiza un sistema Proctor, en el cual mediante un pisón se compacta el suelo en capas, tratando de alcanzar la máxima densidad compactada con un valor cercano a la humedad óptima. De esta forma se obtiene un reacomodo de las partículas de suelo fino y se disminuyen las cavidades .En los suelos sin compactar se vacía el suelo a las columnas

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

y se acomoda con el peso de la mano aplicando la misma energía, considerando siempre que el grado de compactación ideal debe ser uniforme para todas las columnas. De este modo los suelos sin compactar se experimentan con una densidad cercana a la aparente y con una humedad natural.

Finalizado el rellenado de las columnas se llenan los recipientes hasta alcanzar la profundidad del nivel freático correspondiente y se sellan todos los bordes por donde pueda escapar el agua que no sea sobre la columna, lo que puede alterar los resultados. Posteriormente se dejan reposar las columnas durante unas horas, con el objetivo de lograr el equilibrio en los niveles de agua en el interior de estas, debido a la capilaridad y absorción.

Después de alcanzada la estabilización se da inicio a la experimentación, la que consiste en la aplicación de una fuente de calor durante día y noche, sobre las columnas .Se toma registro de los descensos de agua dos veces al día (mañana y tarde), la que cuantificará la cantidad de volumen evaporado producto de la fuente de energía.

Además se tomará registro de temperatura en el interior de las columnas, cada 15 cm, durante las mediciones, con el fin de conocer los gradientes térmicos. Esto se realiza con un termómetro digital RTD thermometer 407907, el cual se observa en la figura 3.3.

Figura 3.3. Termómetro digital utilizado en la medición

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

En la figura 3.4. Se observa el montaje para realizar el ensayo.

Figura 3.4. Columnas de suelo ubicadas por debajo de la fuente de calor.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

3.3 Ajuste de modelos de evaporación

Para establecer la posibilidad de incorporar curvas no lineales de evaporación para aguas subterráneas, en los cinco tipos de suelos propuestos en este estudio, se debe determinar un modelo de ecuación que se ajusta de mejor forma a las tasas de evaporación reales medidas.

Por esta razón se comparan tres curvas de evaporación para describir la tasa de evaporación, las cuales dependen de la profundidad del nivel freático y de constantes que dependen de las características del suelo.

Una vez ajustados los puntos observados de tasa de evaporación a los tres modelos de evaporación, mediante el coeficiente de ajuste R^2, el modelo que presente un coeficiente más cercano a uno, es el escogido para representar mejor la evaporización de aguas subterráneas de distintas profundidades de napa freática.

A continuación se describen los modelos propuestos: modelo lineal, modelo potencial y modelo exponencial.

3.3.1 Modelo Lineal

En este modelo se considera que la tasa de evaporación desde la napa es proporcional a su profundidad. La tasa decrece linealmente a medida que aumenta la profundidad desde la superficie. De esta forma la tasa de evaporación decrece positivamente hasta llegar a un cierto nivel donde la evaporación deja de ocurrir.

Se considera que la máxima evaporación ocurre en la superficie, de forma similar a la evaporación máxima que ocurre directamente desde la superficie de agua en contacto con el ambiente.

De esta manera la ecuación que caracteriza el modelo se muestra a continuación:

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

$$\mathbf{ET=}\begin{cases} ETm & z<0 \\ ET_m * \left(\dfrac{d-z}{d}\right) & 0 \le z < d \\ 0 & z>d \end{cases}$$

Donde:

ET_m = Tasa de evaporación máxima en la superficie.

d = Profundidad de extinción.

Z = Profundidad medida desde la superficie

3.3.2 Modelo Potencial

En este modelo la tasa decreciente de evaporación que ocurre desde el suelo es potencial a medida que la profundidad aumenta con respecto a la superficie del suelo. Esto ocurre hasta una profundidad de extinción donde la evaporación es nula.

Este modelo considera que hay una evapotranspiración máxima la cual ocurre a nivel de superficie, ya que tiene como restricción la capacidad de evaporación del ambiente.

Esta curva considera como factor potencial una constante que debe ser mayor a 1, la cual depende directamente de las características de permeabilidad del suelo en estudio.

La ecuación característica del modelo es la siguiente:

$$\mathrm{ET=}\begin{cases} ET_m * \left(\dfrac{d-z}{d}\right)^m & 0 \le z < d \\ 0 & z>d \end{cases}$$

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Donde:

ET_m = Tasa de evaporación máxima en la superficie.

d = Profundidad de extinción.

Z = Profundidad medida desde la superficie

m = Constante (m > 1)

3.3.3 Modelo Exponencial

Este modelo establece una tasa de evaporación exponencial a medida que la profundidad aumenta y considera la profundidad a la que se encuentra la napa freática.

La diferencia principal entre este modelo y los anteriores es que propone una profundidad límite donde la tasa de evaporación deja de depender de la capacidad de absorción la atmosfera y queda controlada por las propiedades de transmisibilidad del suelo.

La ecuación del modelo exponencial es la siguiente:

$$ET = \begin{cases} ET_m & 0 < z < z0 \\ ET_m * e^{-a*(z-z_0)} & z0 < z \end{cases}$$

Donde:

ET_m = Tasa máxima de evaporación en la superficie.

Z = Profundidad medida desde la superficie

Z_0 = Profundidad limite ($z_o > 0$)

a = Constante (a > 0)

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

3.4 Ensayos de validación

De acuerdo lo establecido en los objetivos de este informe, se propone determinar las curvas de evaporación de la napa desde diferentes tipos de suelos finos, para lo cual se dispone de un sistema compuesto de siete profundidades de napa freática, en donde se mide el descenso de agua diario y luego calcular la tasa de descenso de la napa en el interior de la columna de suelo.

La validación de la metodología de ensayo se basa en medir nuevamente los descensos de agua para el mismo suelo limoso que fue medido anteriormente, bajo las mismas condiciones, para una misma altura. Esto es, para dos columnas de suelo de igual profundidad de la napa, medir el descenso de agua, en dos alturas diferentes, es decir, con cuatro columnas de suelo tener dos profundidades diferentes.

Con esto se busca validar que los datos y resultados obtenidos son consecuentes al tipo de suelo y sus propiedades hidráulicas , como también, reafirmar que las mediciones hechas anteriormente fueron bien realizadas y dar fe que en el futuro se obtendrán resultados parecidos a los obtenidos si se efectúa el mismo experimento.

3.4.1 Montaje de columnas para la validación

En primer lugar se preparan las columnas ocupando los mismos tubos antes utilizados, cortado de acuerdo a las medidas requeridas. Se utilizan cuatro tubos de PVC, en donde dos tubos son de un metro y los otros dos tubos son de 0,25 metros de profundidad de la napa freática.

Se realiza el mismo procedimiento antes mencionado, vaciando el limo sin compactar en el interior de los tubos y sellando las tinetas. Posteriormente se da inicio a la experimentación la cual tiene una duración de cuatro días. Se realizan mediciones de temperatura cada 15 cm en cada medición, con el objetivo de comparar los gradientes térmicos con la experimentación pasada.

De esta forma se realiza el montaje de las cuatro columnas de limo sin compactar, la cual tiene como objetivo proponer y validar una metodología de ensayo para la determinación de curvas de evaporación.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

En la figura 3.5 se observa el dispositivo utilizado una vez finalizado el montaje.

Figura 3.5. Cuatro columnas montadas, para la validación

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

A continuación se dan a conocer los resultados obtenidos experimentalmente de los ensayos realizados con el fin de cumplir con el objetivo propuesto.

Para esto se muestra la evolución de los niveles con respecto al tiempo (en días) en el interior de la columna de suelo y con esto se obtiene la tasa de evaporación de cada una de las columnas, que es la diferencia entre la altura final e inicial del agua de cada una. Los resultados obtenidos son necesarios para la determinación de los parámetros que definen los tres modelos de evaporación en estudio.

Además se muestran los resultados de los ensayos a los suelos que se utilizaron en la experimentación, como también los resultados obtenidos del descenso de nivel y la tasa de variación de evaporación para las cuatro columnas utilizadas en la etapa de validación.

4.1 Características de los suelos utilizados

Los ensayos realizados a los suelos que se experimentaron son los siguientes: clasificación mediante el método USCS y AASHTO, permeabilidad, proctor modificado, densidad aparente suelta y la humedad natural. En la tabla 4.1 se muestra la clasificación de los cinco tipos de suelos y la permeabilidad obtenida. En la tabla 4.2 se muestra un resumen de los resultados obtenidos del ensayo Proctor modificado, densidad aparente y humedad natural. El detalle de los ensayos realizados a los suelos se adjuntan en el anexo 2.

Tabla 4.1. Resumen de la clasificación de los suelos y permeabilidad

	Clasificación		
SUELO	**USCS**	**AASHTO**	**Permeabilidad (cm/s)**
LIMO NO COMPACTADO	ML	A - 4 (0)	0,0385
LIMO COMPACTADO	ML	A - 4 (0)	0,0112
ARCILLA NO COMPACTADA	CL	A - 7 - 6 (3)	0,0080
ARCILLA COMPACTADA	CL	A - 7 - 6 (3)	0,0046
ORGANICO	OL	A - 8 (1)	0,0208

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Tabla 4.2. Resumen de ensayos proctor modificado, densidad aparente y humedad natural

	Estado Compactado		Estado Suelto	
SUELO	DCS (g/cm^3)	Hum. Optima	Dens. Aparente(g/cm^3)	Hum. Natural
LIMO NO COMPACTADO	-	-	1,00	23,10%
LIMO COMPACTADO	1,86	17%	-	-
ARCILLA NO COMPACTADA	-	-	0,90	26,80%
ARCILLA COMPACTADA	1,74	18,5%	-	-
ORGANICO	-	-	0,88	28,25%

4.2 Calibración de curvas de evaporación

Se realizaron cinco ensayos utilizando el mismo equipo, donde los suelos son limo con y sin compactación, arcillas con y sin compactación y suelo orgánico sin compactar.

Para las cinco experiencias se alcanza el equilibrio del nivel freático aproximadamente en 24 horas, para posteriormente comenzar la toma de registros de niveles de agua en las tinetas y de temperatura en el interior de la columna. Los ensayos se realizaron en el interior de un galpón, donde la temperatura ambiental fluctuaba entre los 19 º C en la mañana y 24 º C en la tarde. Los registros de temperatura se adjuntan en el anexo 1.

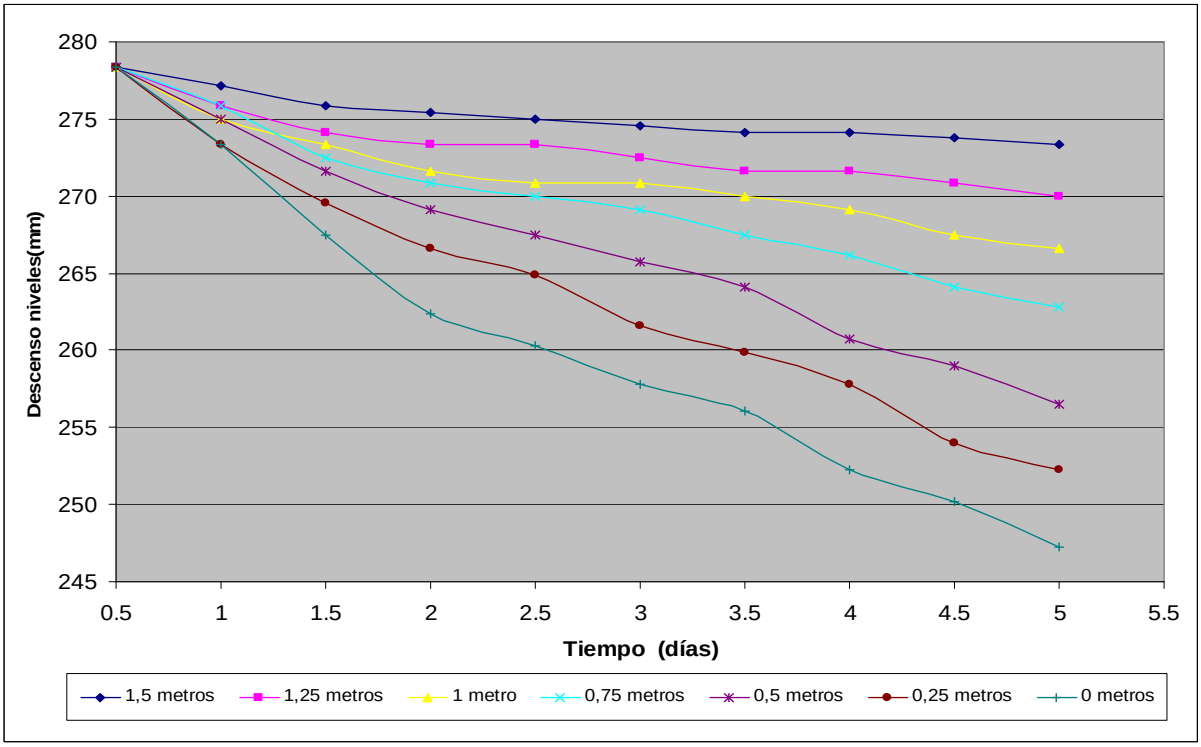
A continuación se muestran los resultados obtenidos de los cinco ensayos realizados, esto es limo compactado y no compactado, arcilla compactada, arcilla no compactada y suelo orgánico.

4.2.1 Limo sin compactar

En la figura 4.1 se observa la evolución del nivel de agua en el interior de las cubetas con respecto al tiempo para las siete profundidades de nivel freático. Posteriormente se calcula la tasa de descenso de agua en (mm/día) en cada columna de suelo.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Figura 4.1. Evolución de niveles con respecto al tiempo de limo sin compactar.



Del gráfico 4.1 se observa un brusco descenso de los niveles de las aguas en las primeras cuatro mediciones. Sin embargo después de esto, se logra estabilizar el descenso estableciendo así un descenso el cual presenta pequeñas ondulaciones, pero con una tasa de descenso estable. Esto se debe al reacomodo de las partículas de suelo y a la acumulación de caudal en el interior de las columnas de suelo, presentando debido a esto descensos bruscos en las columnas. En donde después de reacomodarse y evaporarse el caudal acumulado, la tasa de descenso desciende y presenta un comportamiento constante.

Cabe señalar que la toma de datos de descensos realizadas a las tinetas con agua, tienen una precisión en la medición de 1 mm, es decir la huincha utilizada en las mediciones tiene como escala de mediciones el milímetro.

Las tasas de descenso para cada columna son mostradas en el anexo 1. Esta es obtenida mediante el promedio de agua evaporada desde cada una de las columnas en mm/día. Además, en la

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

grafica se ajustan las tres líneas de tendencia, para ver de forma aproximada cual de estas es la que mejor se ajusta a los resultados experimentales obtenidos.

Una vez con los resultados de descensos obtenidos y calculando las tasas de descensos, se utilizan estos datos para utilizarlos como valores de la función objetivo, para los tres modelos de evaporación en estudio, para después realizar el ajuste de mínimos cuadrados con el fin de minimizar el error entre la curva y los puntos observados. De esta forma se obtienen las constantes que definen el modelo lineal, potencial y exponencial, y son expuestas en el anexo 1.

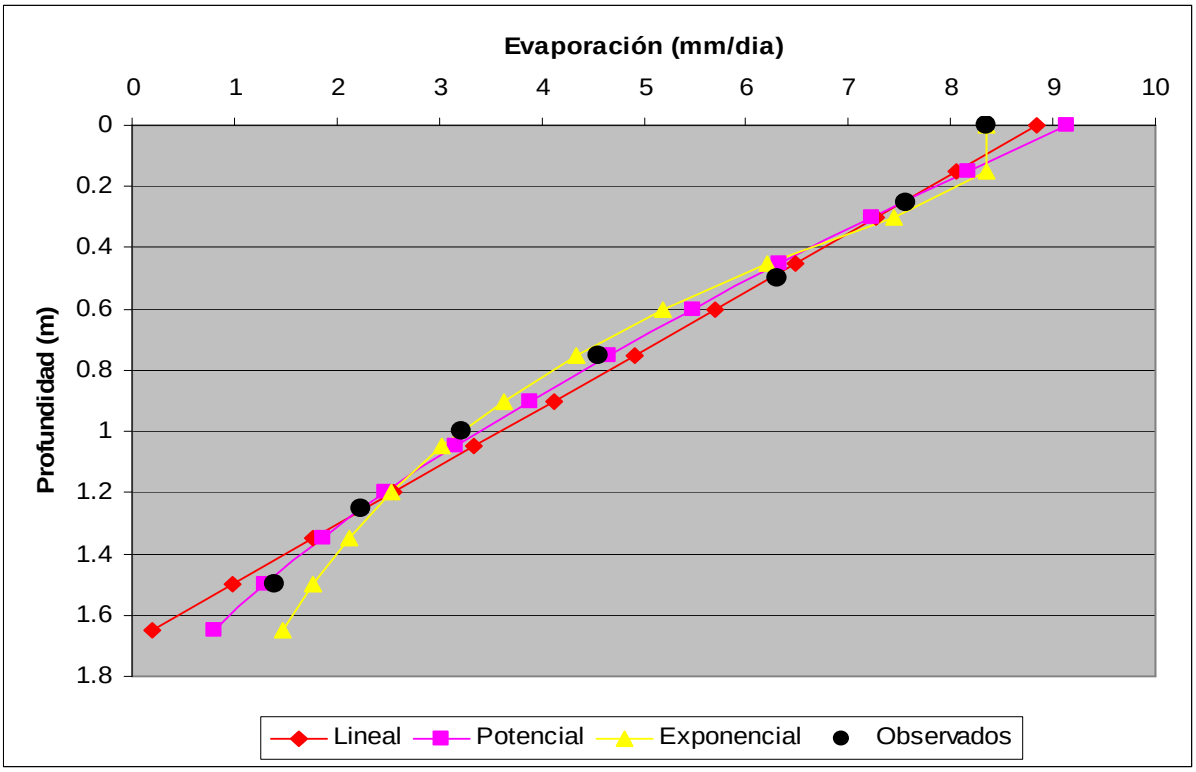
Una vez obtenidas las constantes mediante el coeficiente de ajuste R^2, se formulan las ecuaciones que caracterizan los tres modelos de evaporización, las que se muestran en la tabla 4.3.

Tabla 4.3. Ecuaciones modelos de evaporación limo sin compactar.

Modelo	Ecuación Calibrada	R^2
Lineal	$ET = 8{,}883 * \left(\frac{1{,}686 - Z}{1{,}686} \right)$	0,9945
Potencial	$ET = 9{,}137 * \left(\frac{2{,}048 - Z}{2{,}048} \right)^{1{,}478}$	0,9941
Exponencial	$ET = 8{,}339 * e^{-1{,}197*(Z-0{,}204)}$	0,9942

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Figura 4.2. Curvas de evaporación Limo sin compactar



En la figura 4.2 se muestra el comportamiento de los tres modelos de evaporación, en donde se observa que presenta una variación bastante semejante hasta la profundidad de 1,5 metros, lo cual es razonable ya que la profundidad máxima analizada en este estudio es de 1,5 metros.

Tomando en cuenta el ajuste por medio del cuadrado del coeficiente de correlación R^2, el modelo de evaporización que se ajusta mejor a los valores experimentales es el Lineal con un R^2 de 0,9945, no obstante todos los modelos tienen un buen ajuste.

Paralelamente a las mediciones de descenso de aguas en las tinetas, se midió la temperatura en el interior de las columnas cada 0,15 metros. Las temperaturas registradas se comportan de tal modo que descienden a medida que la profundidad avanza y aumenta a medida que el tiempo transcurre.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

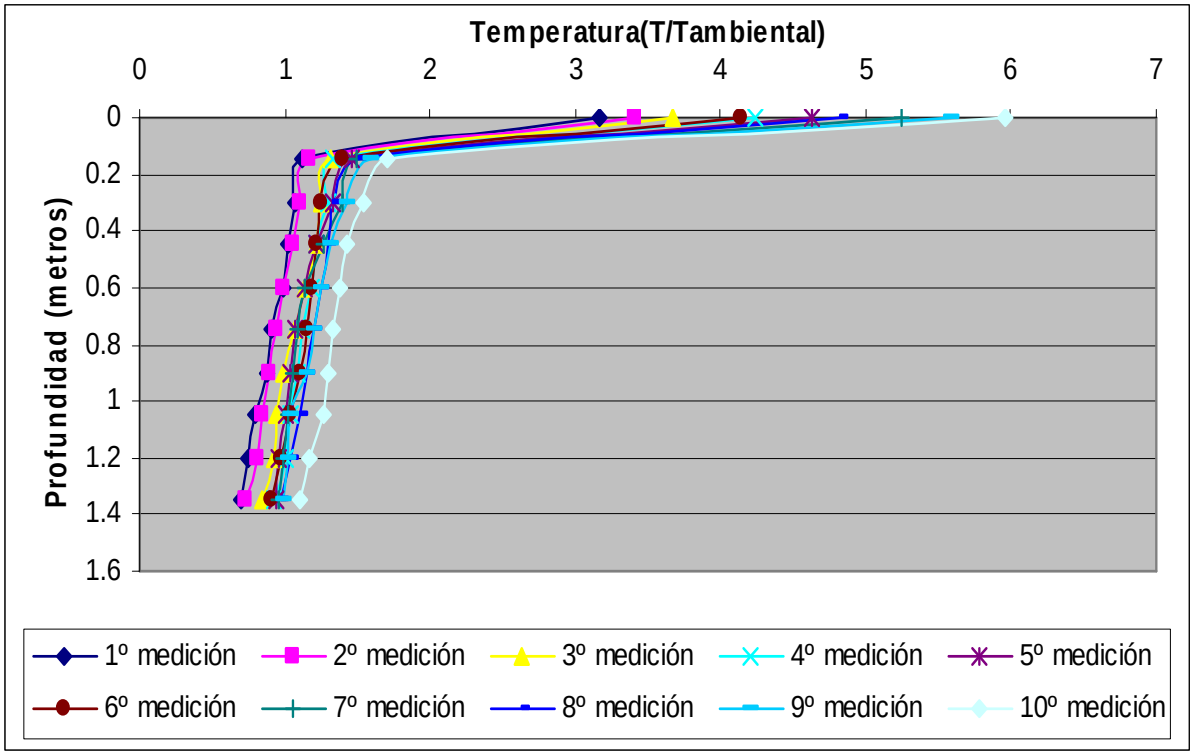
Registra un aumento importante de temperatura en las tarde donde la temperatura ambiental llega a los 25ºC y desciende en las mañanas donde la temperatura promedia 18ºC, pero siempre presenta tendencia a incrementar la temperatura a medida que las mediciones van avanzando.

Para independizar la tasa de evaporación de las condiciones externas de aumento y descenso de la temperatura, las temperaturas registradas en el interior de las columnas se dividen por la temperatura ambiente. De este modo se obtiene la temperatura que realmente está afectando a la columna producto de la fuente de energía, independiente de la temperatura externa ambiental.

En las figura 4.3 y 4.4 se observa el comportamiento de la temperatura en el interior de la columna de 1,5 metros y 1,25 metros, en donde se observa que la temperatura decrece a medida que la profundidad aumenta y a la vez aumenta a medida que el tiempo avanza.

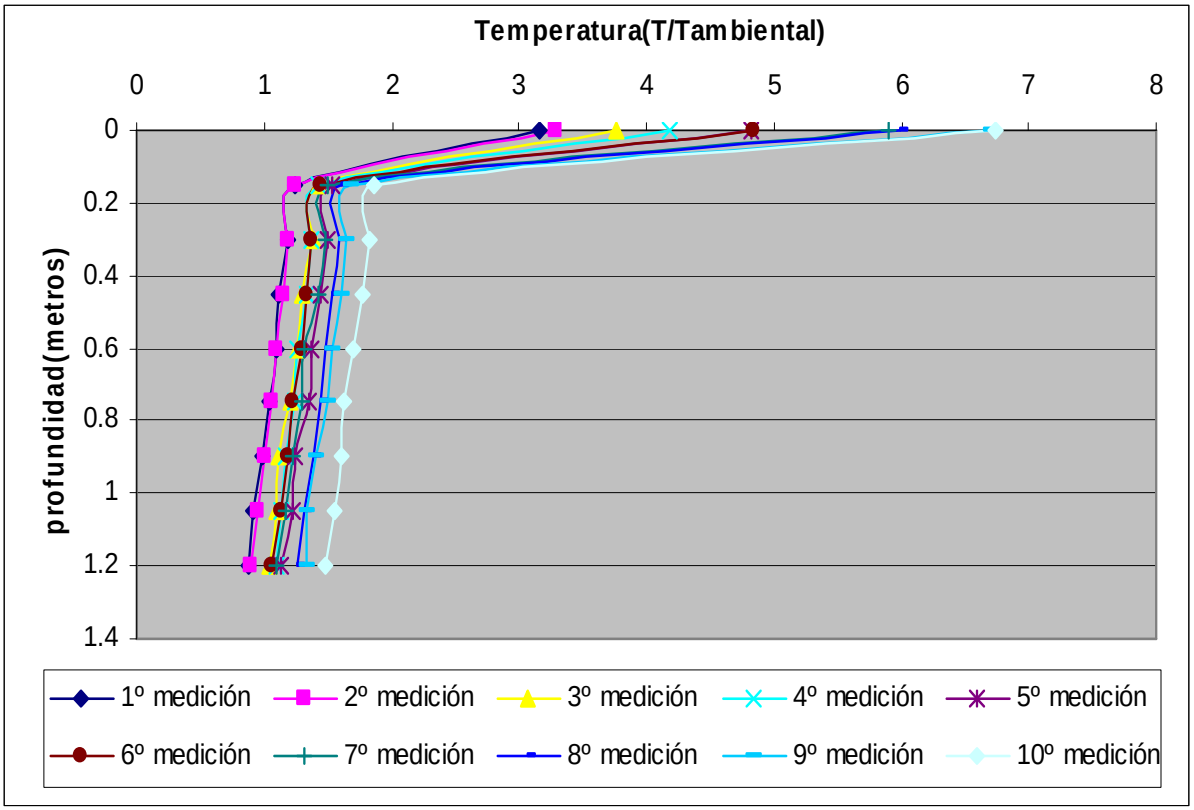
Además, se calcula el coeficiente de difusión térmica de modo de estimar como afecta la temperatura a cada suelo, lo cual repercute en la evaporación.

Figura 4.3. Comportamiento de la temperatura con respecto a la profundidad, para columna de 1,5 metros.



Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Figura 4.4. Comportamiento de la temperatura con respecto a la profundidad, para columna de 1,25 metros.



El coeficiente de difusión térmica se calcula con la pendiente de la grafica. De esta forma se calcularon los coeficientes de difusión térmica de todos los puntos de la columna y de cada columna. Posteriormente se calcula un promedio para cada columna de suelo y el promedio final de todas las columnas es el coeficiente de difusión térmica final.

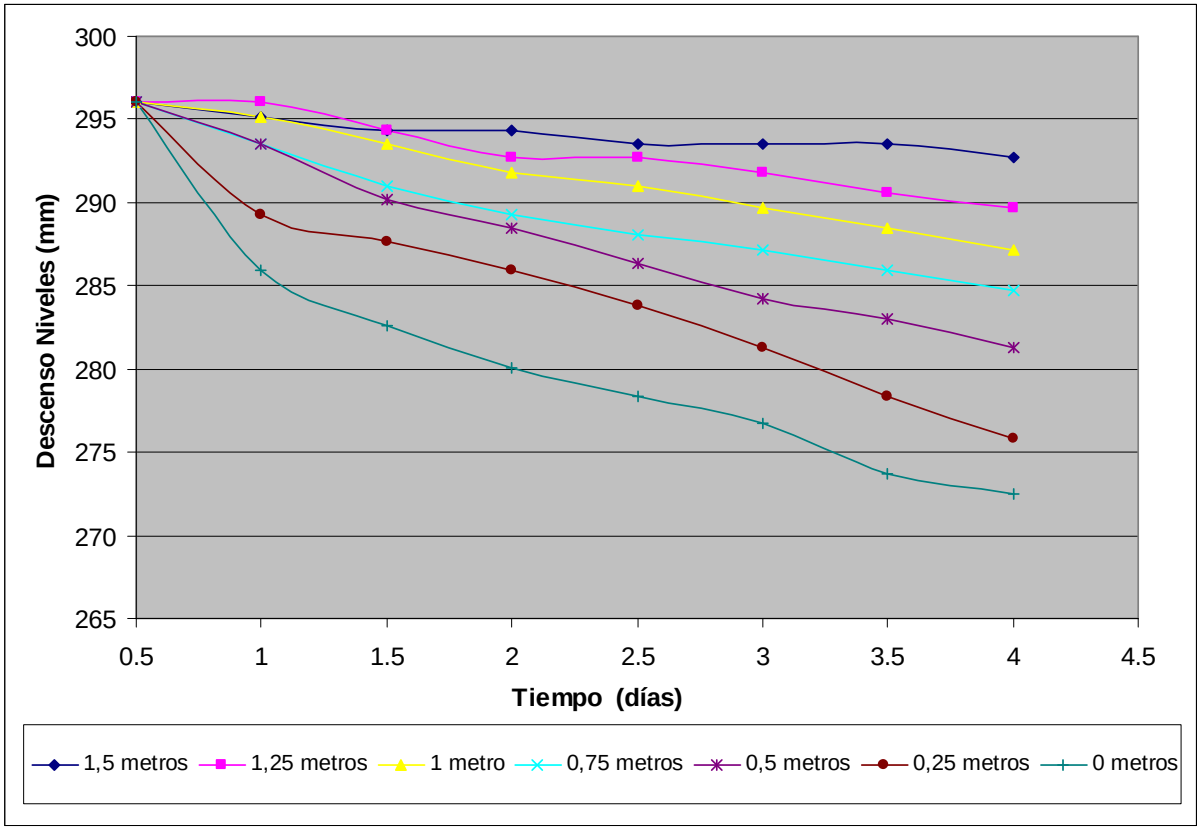
Para el caso de limo suelto el coeficiente que se obtuvo para la columna de 1,5 metros es de 0,41ºC/metro y de 0,39ºC/metro para la columna de 1,25 metros.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

4.2.2 Limo compactado

Utilizando el mismo criterio que se utilizo en el limo suelto, se mide el descenso en el interior de la columna de suelo, el cual se observa en la figura 4.5.

Figura 4.5. Evolución de niveles con respecto al tiempo de Limo compactado.



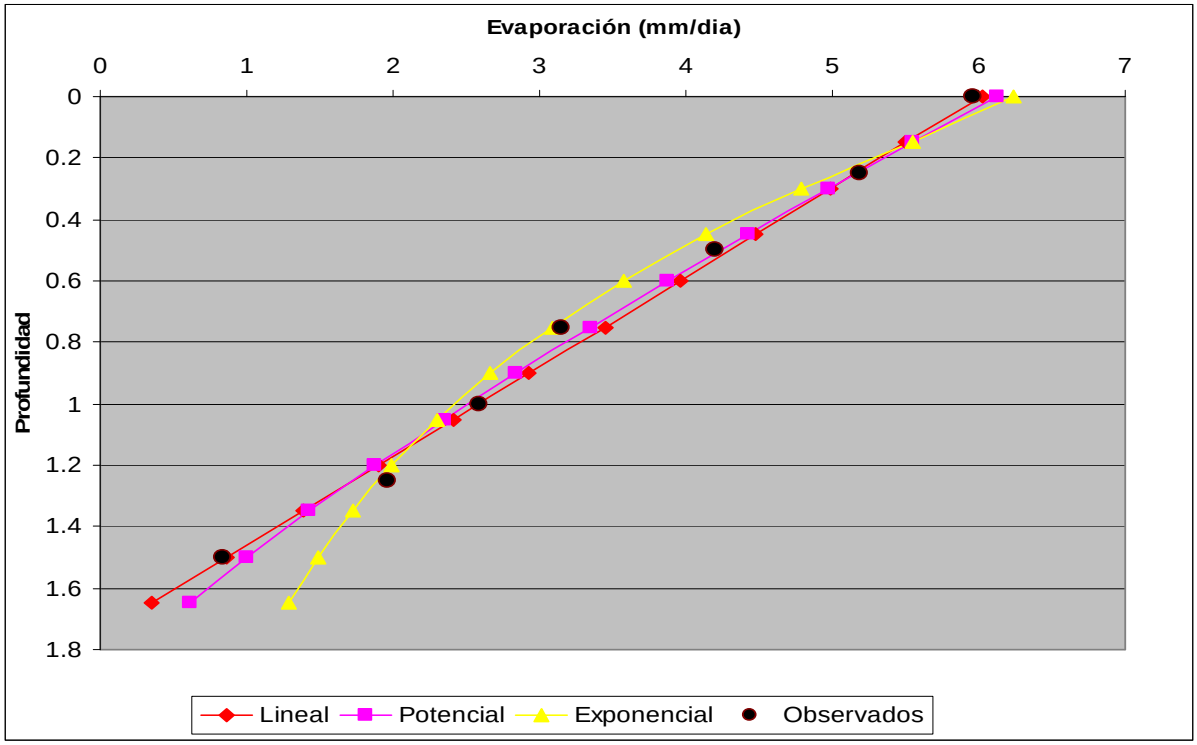
Posteriormente se calculan las tasas se evaporación para las siete columnas de limo compactado, las cuales se muestran en el anexo 1. Se realiza el mismo procedimiento de ajuste de curva por medio del coeficiente R^2, donde las constantes y valores obtenidos para los tres modelos estudiados están en el anexo 1.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Tabla 4.4. Ecuaciones modelos de evaporización de limo compactado.

Modelo	Ecuación Calibrada	R^2
Lineal	$ET = 6{,}019 * \left(\frac{1{,}753 - Z}{1{,}753} \right)$	0,9966
Potencial	$ET = 6{,}129 * \left(\frac{1{,}958 - Z}{1{,}958} \right)^{1{,}25}$	0,9964
Exponencial	$ET = 6{,}235 * e^{-0{,}975*(Z-0{,}03)}$	0,9845

Figura 4.6 Curvas de evaporización de limo compactado.



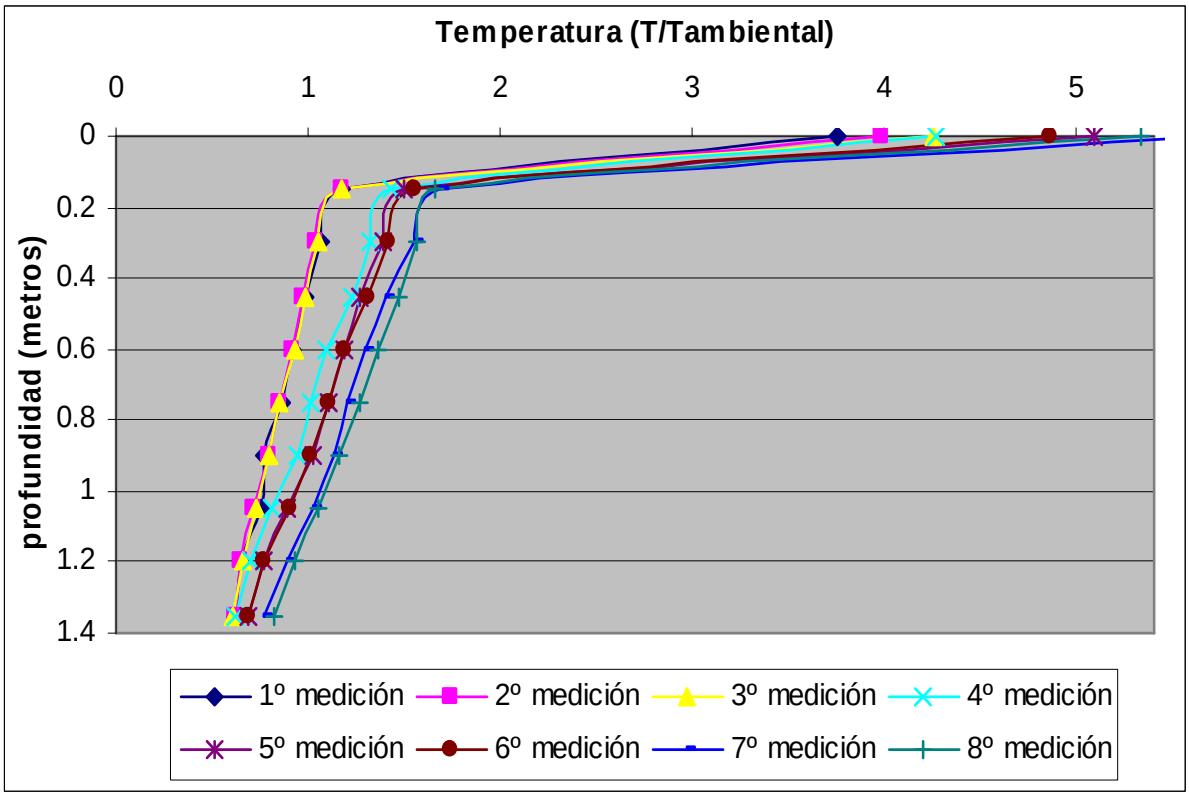
Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Al igual que el limo en estado suelto, los modelos que mejor se ajustan a los puntos reales de tasa de evaporación son el lineal y el potencial, presentando un coeficiente de ajuste más cercano a uno el modelo lineal.

Si se compara esta curva con la del limo suelto, se observa que el limo compactado presenta menor tasa de evaporación. Esto es bastante razonable, puesto que debido a la compactación del limo va a presentar mayor obstáculo para la circulación de agua, lo que implica menor tasa de evaporación.

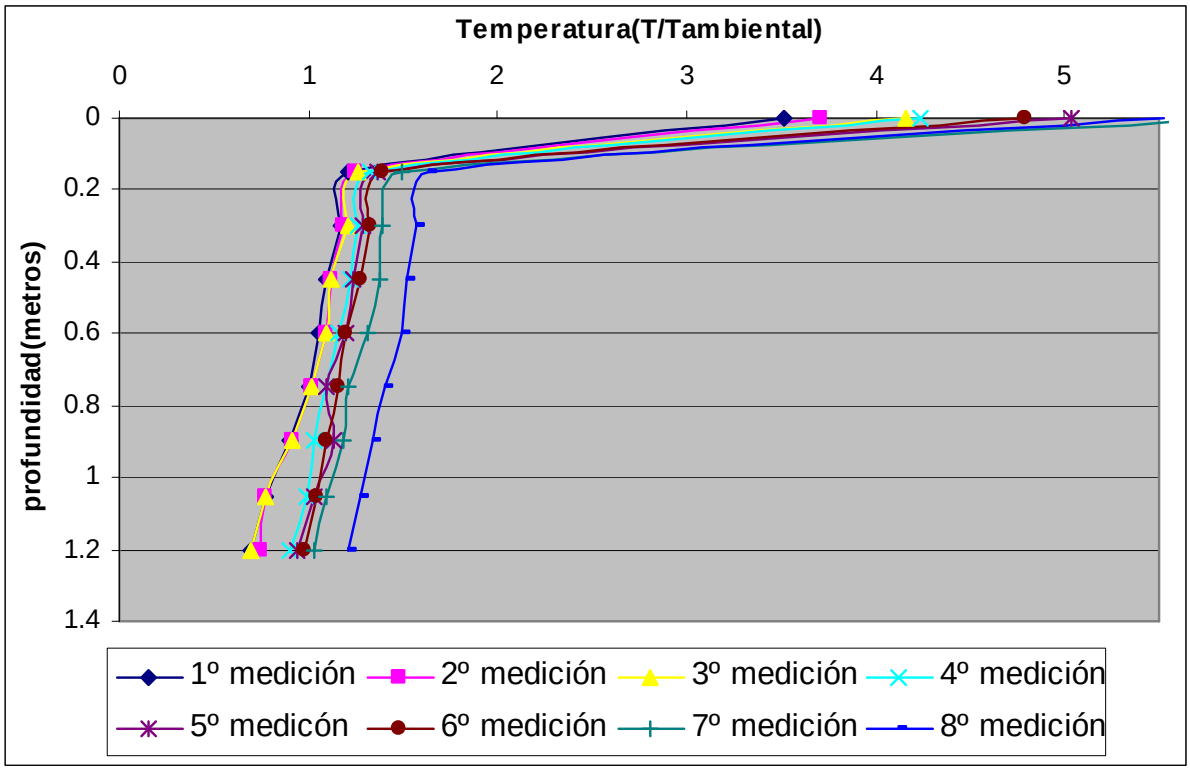
En las figuras 4.7 y 4.8 se muestran las curvas de Temperatura con respecto a la profundidad, donde el comportamiento es el mismo descrito para el limo suelto.

Figura 4.7. Comportamiento de la temperatura con respecto a la profundidad, para columna de 1,5 metros.



Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Figura 4.8. Comportamiento de la temperatura con respecto a la profundidad, para columna de 1,25 metros.



Al calcular el coeficiente de difusión térmica para el limo compactado, aplicando el mismo criterio realizado para el limo sin compactar, arroja un valor de 0,42ºC/metro y 0,39ºC/metro para la columna de 1,5 metros y 1,25 metros respectivamente, valores muy cercanos a los obtenidos para el limo suelto.

Esto es bastante razonable debido a que en teoría el coeficiente de difusión térmica del limo suelto debe ser muy parecido al coeficiente del limo compactado, ya que la conductividad térmica no depende del grado de compactación.

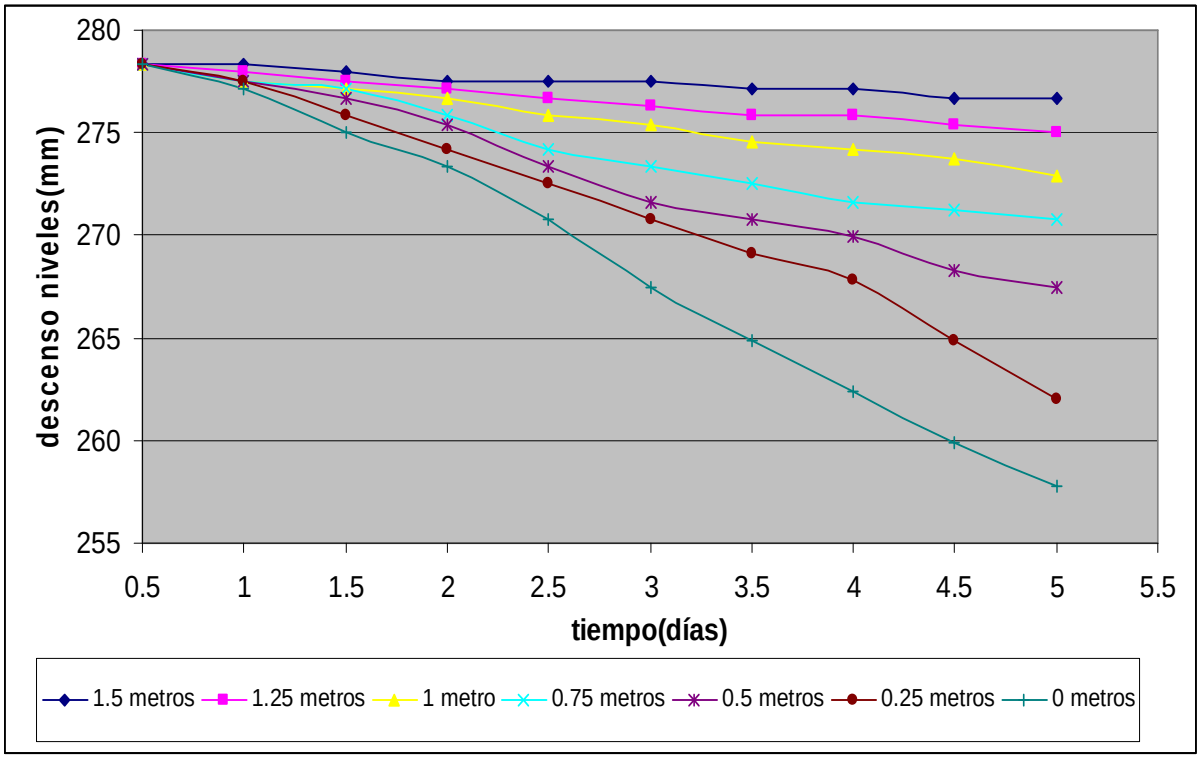
Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

4.2.3 Arcilla sin compactar

Teniendo en cuenta que la arcilla es un suelo mucho más plástico e impermeable que el limo, se mide el descenso en las cubetas para después calcular el descenso en el interior de las columnas.

Siguiendo el mismo procedimiento utilizado anteriormente se calculan las tasas de evaporación y mediante el coeficiente de ajuste R^2 se justan las tres curvas estudiadas a los puntos reales obtenidos de tasa de evaporación.

Figura 4.9. Evolución de niveles con respeto al tiempo de arcilla sin compactar.

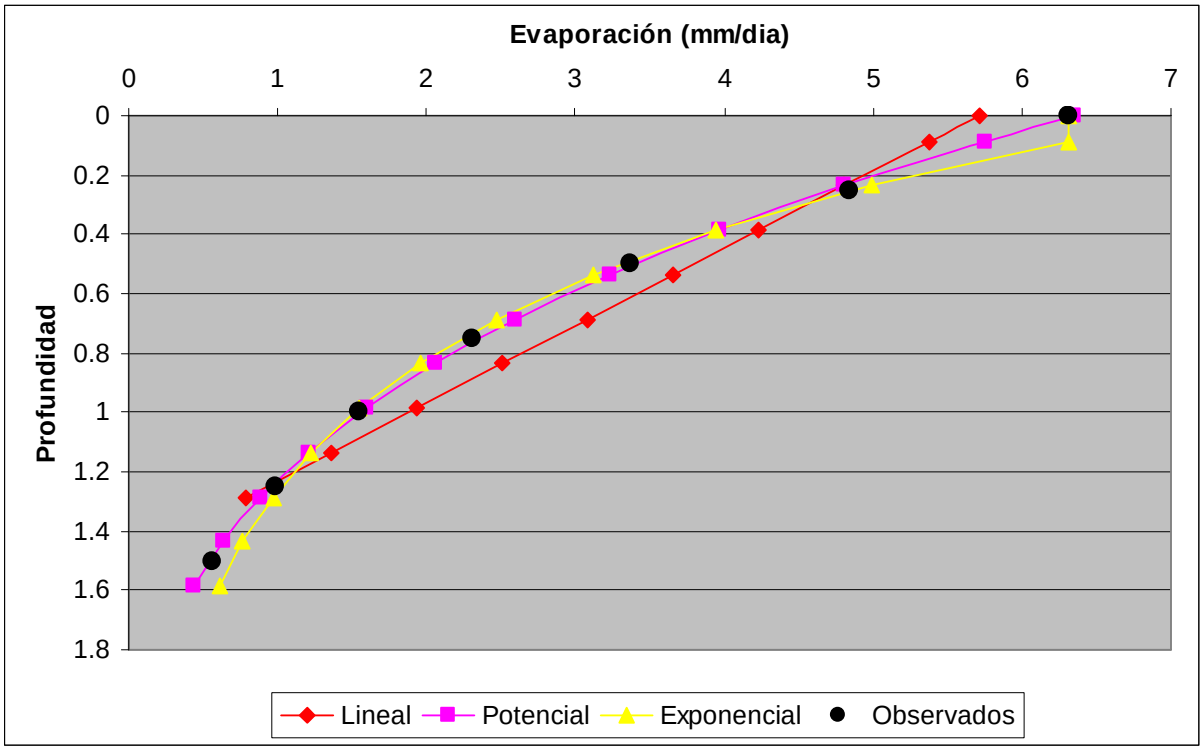


Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Tabla 4.5. Ecuaciones modelos de evaporación de arcilla sin compactar.

Modelo	Ecuación Calibrada	R^2
Lineal	$ET = 5{,}712 * \left(\frac{1{,}493 - Z}{1{,}493} \right)$	0,9755
Potencial	$ET = 6{,}354 * \left(\frac{2{,}723 - Z}{2{,}723} \right)^{3{,}076}$	0,9996
Exponencial	$ET = 6{,}307 * e^{-1{,}562*(Z-0{,}087)}$	0,9994

Figura 4.10. Curvas de evaporación de arcilla sin compactar.

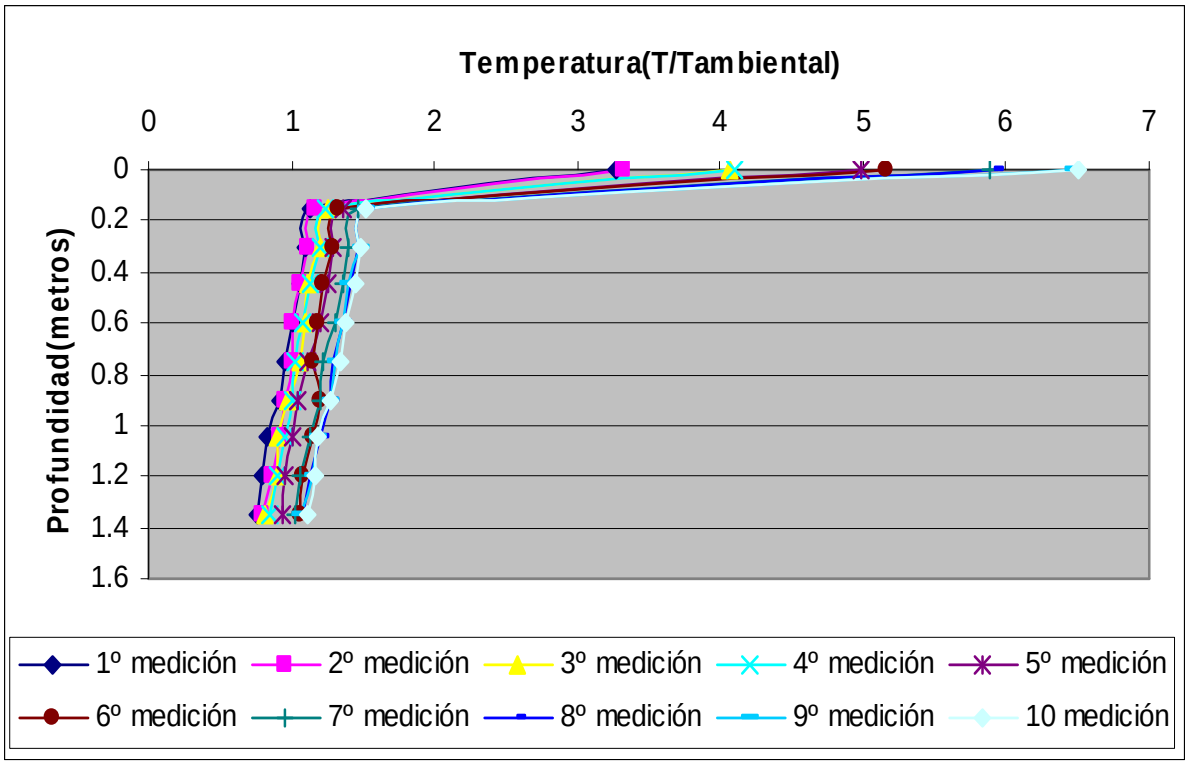


Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

De la figura 4.10 se observa que el comportamiento real de evaporación para una arcilla suelta, ya no es lineal, sino que presenta una curva al final de la profundidad. En este caso los modelos que mejor se acomodan a los puntos reales son el potencial y el exponencial, siendo el modelo potencial el más cercano a uno, descartando en este caso el modelo lineal.

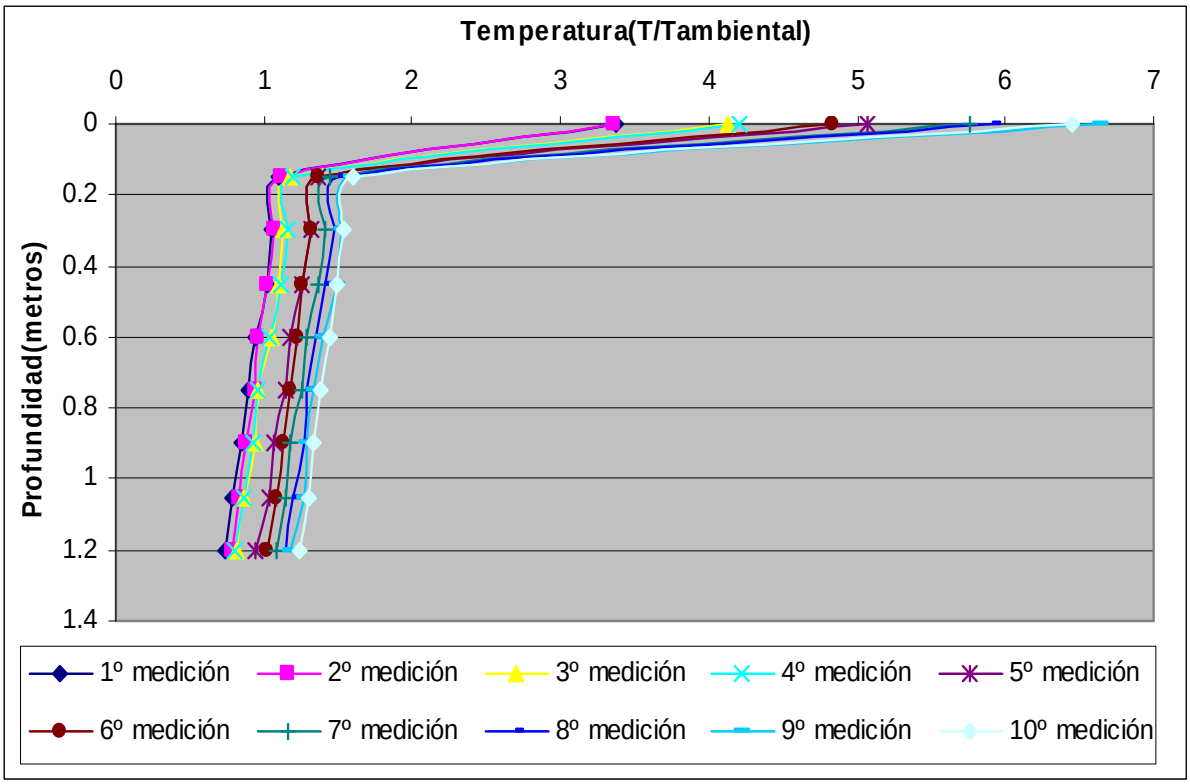
Siguiendo el mismo criterio anterior se obtienen las curvas de temperatura las cuales se observan en la figura 4.11 y 4.12.

Figura 4.11. Comportamiento de la temperatura con respecto a la profundidad, para columna de 1,5 metros.



Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Figura 4.12. Comportamiento de la temperatura con respecto a la profundidad, para columna de 1,25 metros.



El coeficiente de difusión térmica calculado, empleando el mismo mecanismo antes descrito, es de 0,33ºC/metro y 0,35ºC/metro para la columna de 1,5 metros y de 1,25 metros respectivamente, siendo valores de menor magnitud que los obtenidos para el limo.

4.2.4 Arcilla compactada

Siguiendo los mismos procedimientos y criterios que los suelos anteriores, se mide el descenso de agua en el interior de las columnas y se calcula la tasa de evaporación producto de la fuente de calor en la parte superior de la columna.

En la figura 4.13 se observa el descenso de agua y en la tabla 4.6 las curvas calibradas luego de realizar el ajuste de curva.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Figura 4.13.Evolución de niveles con respecto al tiempo de la arcilla compactada.

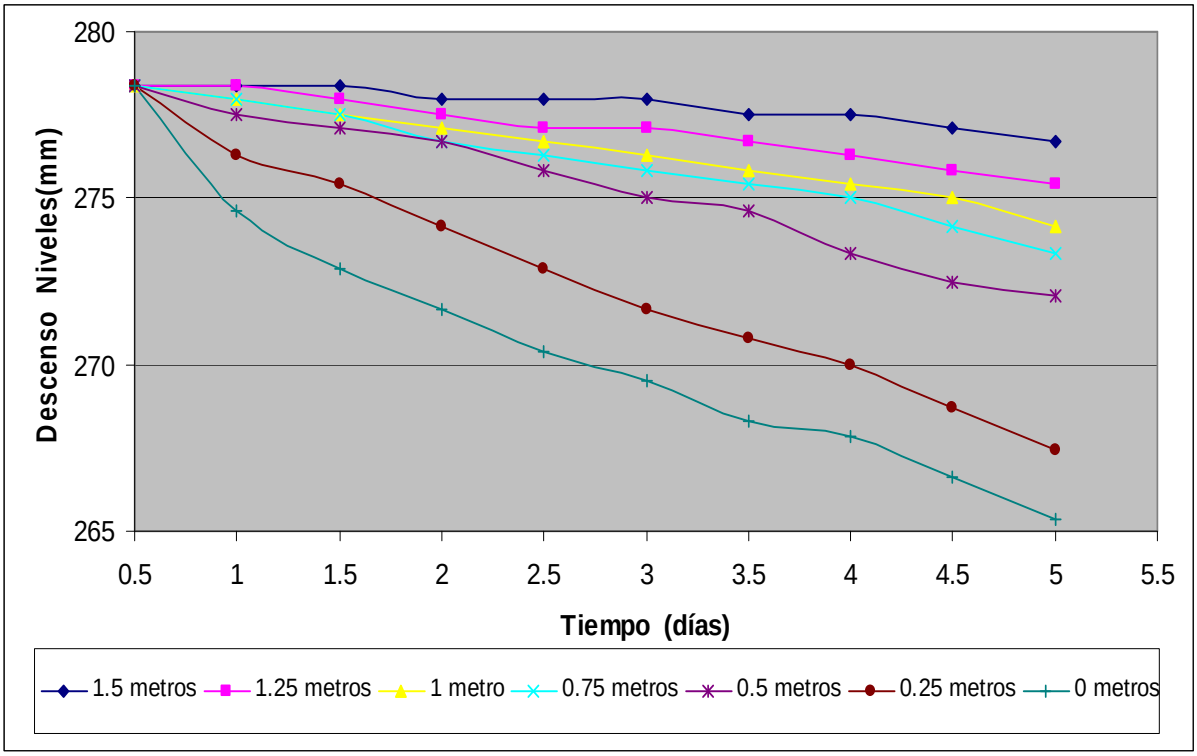
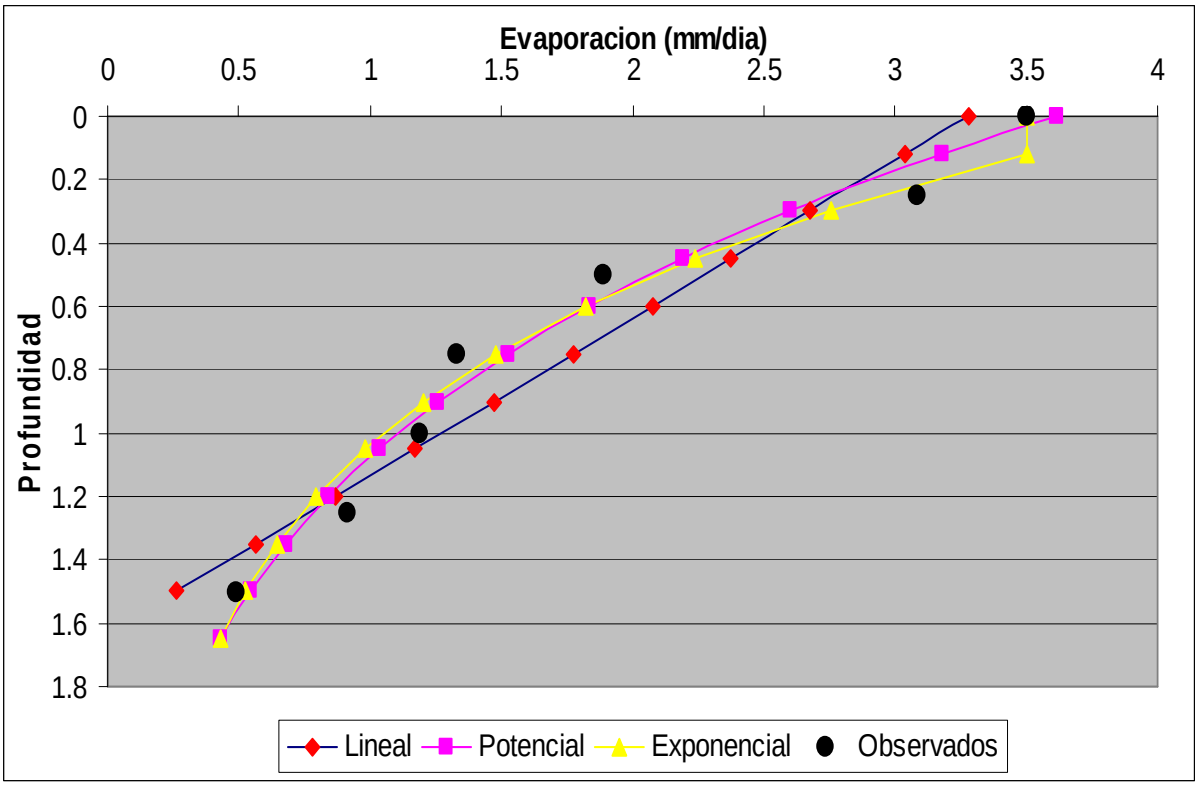


Tabla 4.6. Ecuaciones modelos de evaporización de arcilla compactada.

Modelo	Ecuación Calibrada	R^2
Lineal	$ET = 3{,}281 * \left(\frac{1{,}631 - Z}{1{,}631} \right)$	0,9625
Potencial	$ET = 3{,}619 * \left(\frac{5{,}062 - Z}{5{,}062} \right)^{5.,39}$	0,9858
Exponencial	$ET = 3{,}504 * e^{-1{,}381*(Z-0{,}127)}$	0,9916

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Figura 4.14. Curvas de evaporación de arcilla compactada.



De la figura 4.14 se observa que las curvas que mejor se acomodan a los datos reales de evaporación son el potencial y exponencial, descartando el lineal. Siendo la curva que tiene un coeficiente de ajuste más cercano a uno es la exponencial.

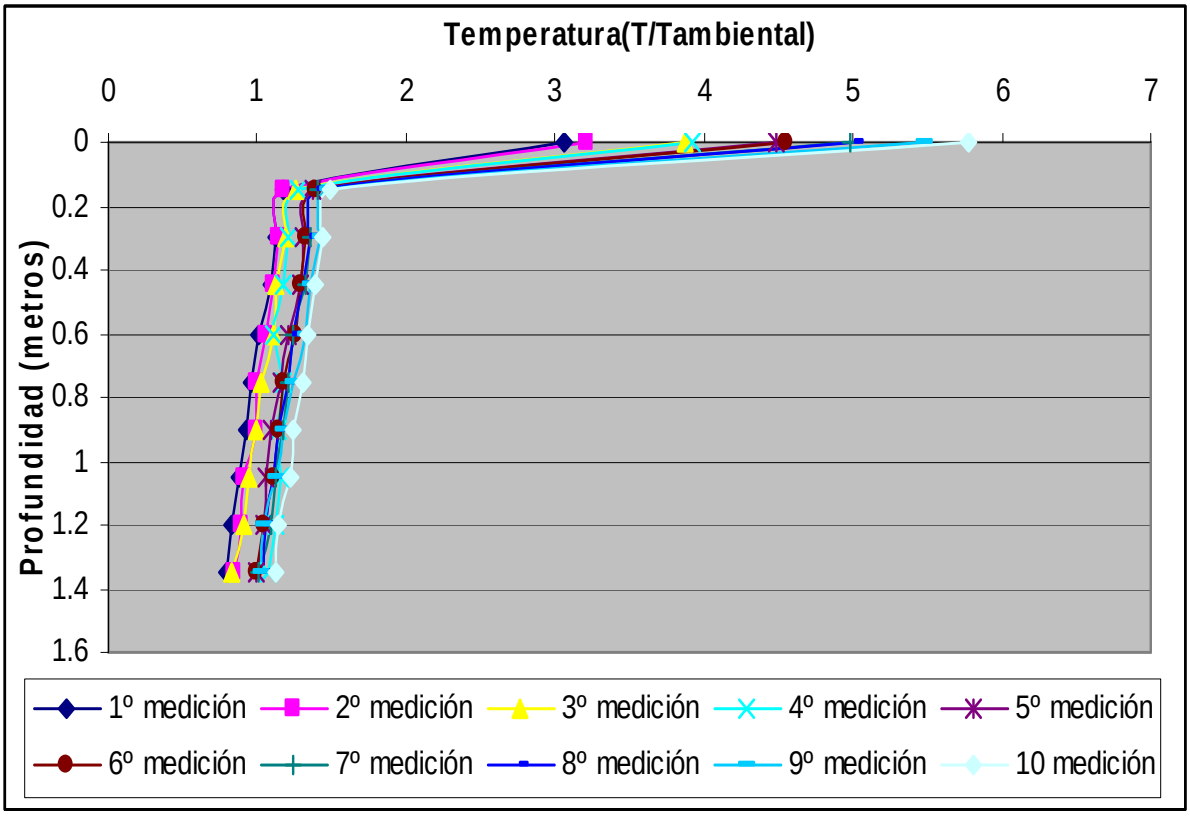
Si se compara esta curva de arcilla compactada con la curva de arcilla suelta, se observa que la magnitud de la tasa de evaporación de arcilla suelta, es superior a la curva de la misma arcilla pero compactada. Lo cual es bastante razonable, puesto que la textura fina de la arcilla provoca una mejor cohesión entre particular, impidiendo la libre circulación de agua a través de la arcilla.

Al comparar el suelo limoso con la arcilla, se observa que la arcilla tiene una menor tasa de evaporación que el limo, ya sea suelto o compactado. Esto se debe a que el limo tiene partículas mas grande que la arcilla, por lo tanto una mayor facilidad para el transito de agua.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

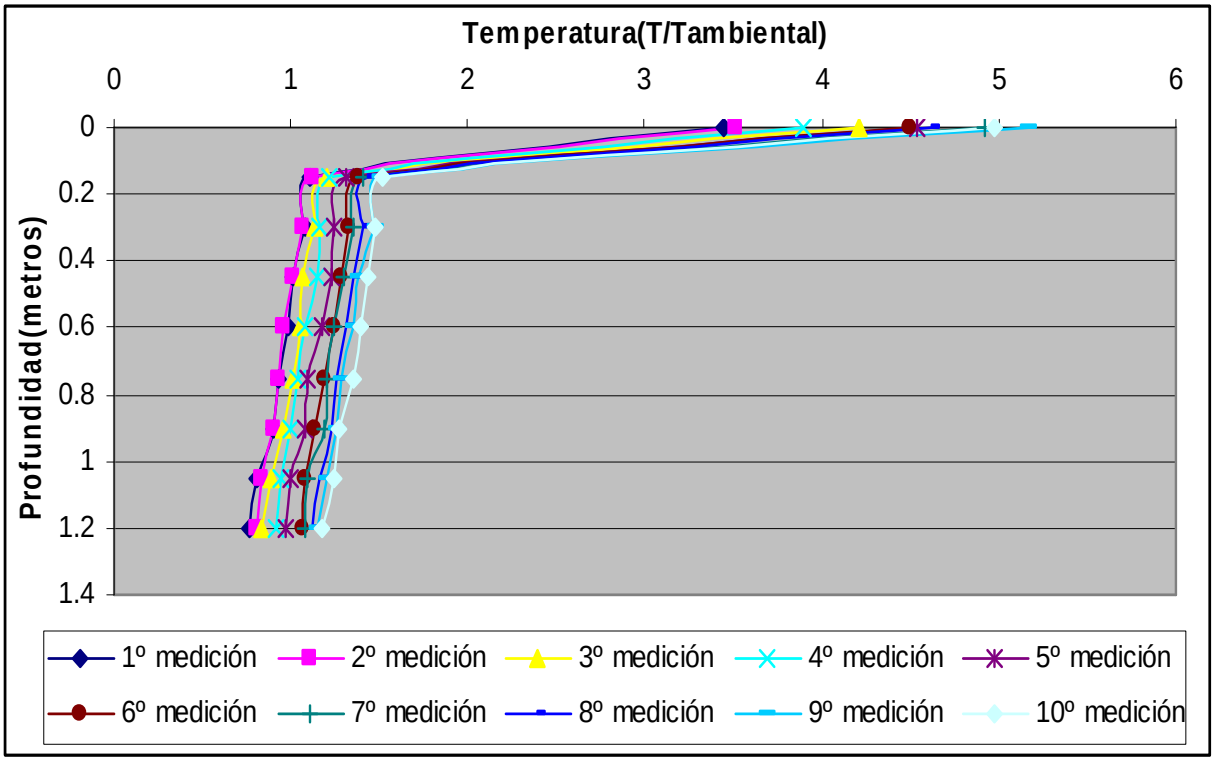
En la figura 4.15 y 4.16 se muestran las curvas de temperatura con respecto a la profundidad, teniendo e cuenta que se calculo aplicando los mismos procedimientos y criterios, descritos anteriormente para el limo y la arcilla suelta.

Figura 4.15. Comportamiento de la temperatura con respecto a la profundidad, para columna de 1,5 metros.



Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Figura 4.16. Comportamiento de la temperatura con respecto a la profundidad, para columna de 1,25 metros.



Los coeficiente de difusión térmica obtenidos para el limo compactado, son de 0,3ºC/metro y 0,31ºC/metro para la columna de 1,5 metros y 1,25 metros respectivamente. Estos valores son muy parecidos en magnitud a los coeficientes de la misma arcilla en estado suelto, lo cual era predecible.

4.2.5 Suelo orgánico

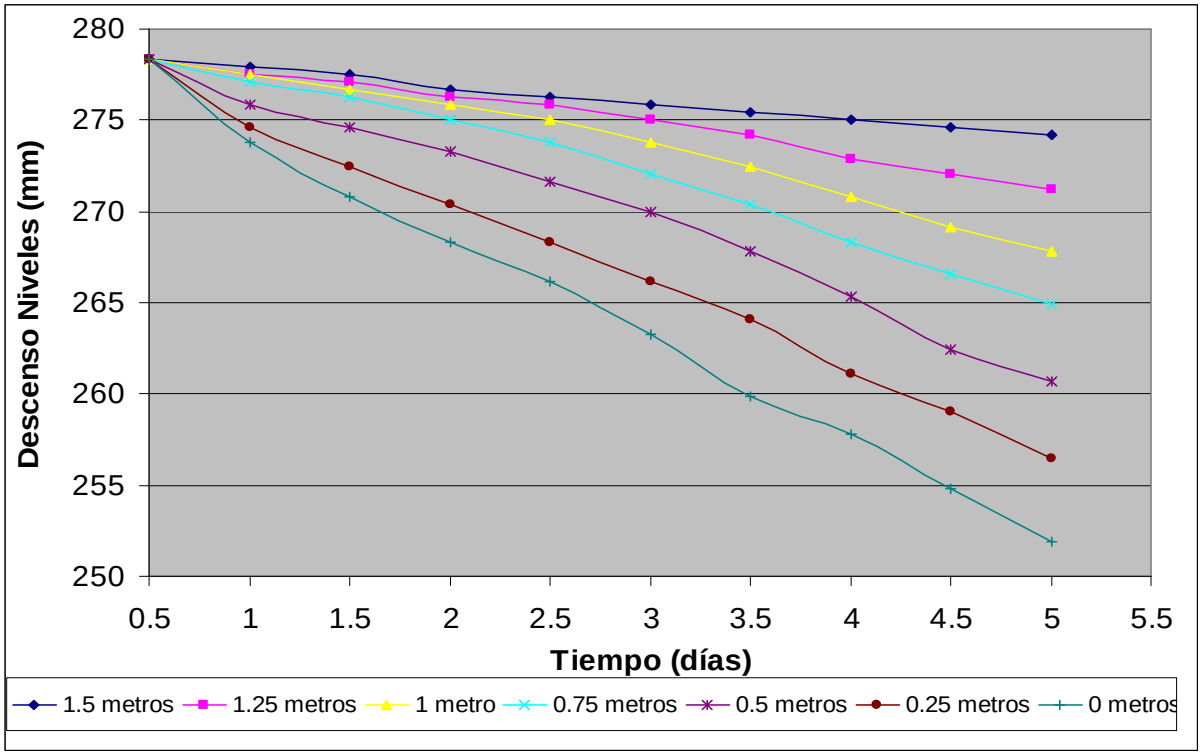
El último suelo experimentado fue un orgánico, al cual se realizo el mismo procedimiento y criterios de medición que los anteriores, de este modo están los cinco suelos bajo las mismas condiciones.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

De este manera en la figura 4.17 se observa el descenso de agua, en la tabla 4.7 las curvas calibradas después de realizado el ajuste de curvas y en la figura 4.18 las tres curvas de evaporación obtenidas luego del ajuste.

Cabe señalar que el ensayo realizado al suelo orgánico fue efectuado en diciembre, por lo cual hay que considerar un incremento importante de la temperatura, lo cual afecta directamente la evaporación en las columnas.

Figura 4.17. Evolución de niveles con respecto al tiempo del suelo orgánico.

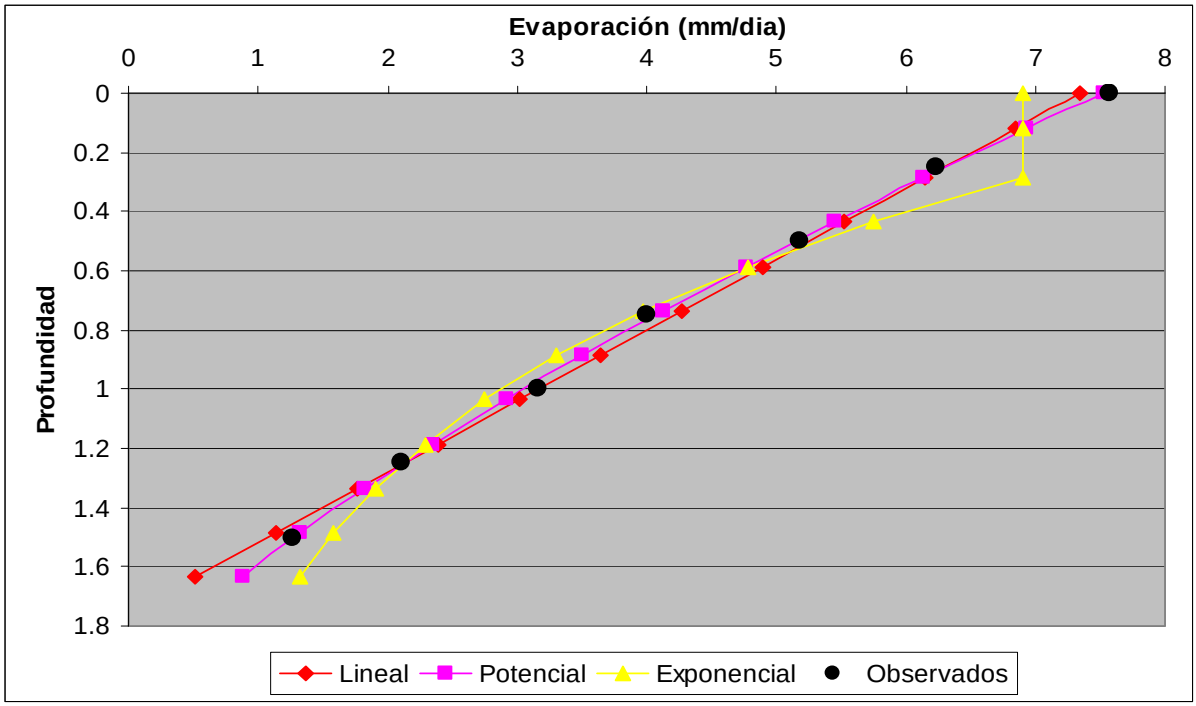


Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Tabla 4.7. Ecuaciones modelos de evaporización del suelo orgánico.

Modelo	Ecuación Calibrada	R^2
Lineal	$ET = 7.346 * \left(\frac{1.76 - Z}{1.76} \right)$	0.9977
Potencial	$ET = 7.525 * \left(\frac{2.064 - Z}{2.064} \right)^{1.363}$	0.9995
Exponencial	$ET = 6.903 * e^{-1.225*(Z-0.286)}$	0.9823

Figura 4.18. Curvas de evaporización del suelo orgánico.



Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Se observa de la figura 4.18 que las curvas que mejor se ajustan a los puntos observados de evaporación son el lineal y potencial, descartando en este caso el exponencial. Matemáticamente la curva que mejor se ajusta es la tipo potencial con un R^2 0.9995.

Al comparar las tasas de evaporación de suelo orgánico con el limo y la arcilla, se observa de las gráficas que el limo tiene mayor evaporación y a la vez la arcilla menor poder evaporante que el suelo orgánico. Además, tanto para el limo y orgánico las curvas que mejor se ajustan son la lineal y potencial. Esto es muy razonable, ya que el suelo orgánico tiene propiedades hidráulicas muy parecidas al limo, presentando una permeabilidad un poco menor que el limo, lo cual es verificado en los ensayos de permeabilidad realizados a los suelos.

Una vez obtenidas las curvas de evaporación de los cinco suelos y compararlas, se observa que la curva que tiene una tasa de evaporación mayor es el limo en estado suelto, seguido por el limo compactado, después el suelo orgánico, arcilla suelta y el que tiene menor evaporación es la arcilla compactada. Los resultados son razonables y esperados, puesto que según el ensayo de permeabilidad realizado, la permeabilidad ordenada de forma decreciente concuerda con el orden decreciente de tasa de evaporación recientemente nombrada.

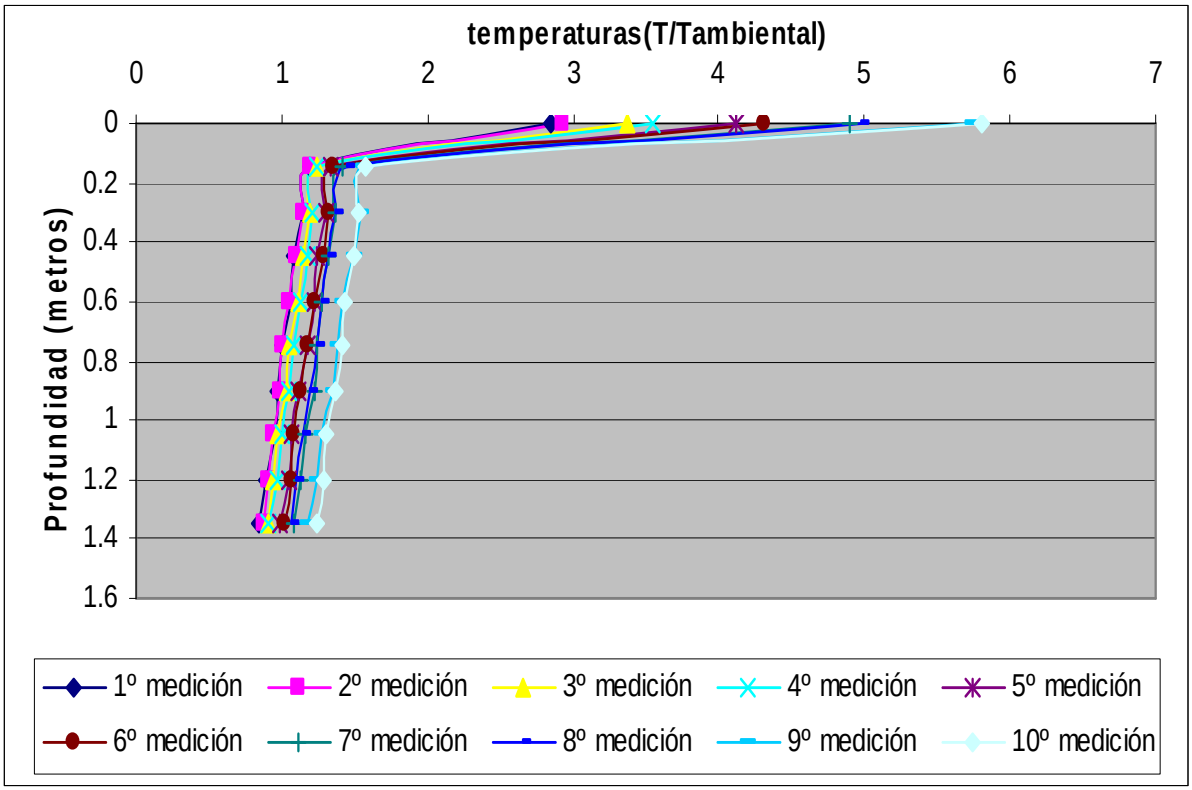
Además, tomando en cuenta el comportamiento de la curva de humedad v/s succión expuesto en la sección 2.2.8 para distintos tipos de suelos y comparando dicha curva con los resultados obtenidos en el suelo limoso, se puede observar que para un rango de humedad por saturación entre 0.1 % y 0.9 % la succión no sufre variaciones mayores a 100 KPa. Ello permite reafirmar que el comportamiento lineal de la evaporación para los limos y suelos orgánicos, va directamente relacionado con la humedad y la succión. Esto se debe a que los limos poseen poca adherencia entre partículas, lo que conlleva escasa magnitud de succión y consecuentemente mayor poder evaporante, por lo cual perfectamente la evaporación puede variar linealmente a medida que la profundidad aumenta. Caso contrario ocurre con las arcillas puras, pues para los mismos valores de humedad por saturación, la succión varía del orden de 1000 KPa a los 80000 KPa. Esto se debe a que las arcillas que tienen una textura muy fina, con gran cohesión entre sus partículas, por lo cual la magnitud de la presión hidráulica negativa (succión) es muy alta. Es por esta razón que la tasa de evaporación real no necesariamente se comporta linealmente,

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

debido a la dificultad de movimiento de las partículas de agua dentro de una arcilla, por lo cual la evaporación puede presentar otras formas de curvatura.

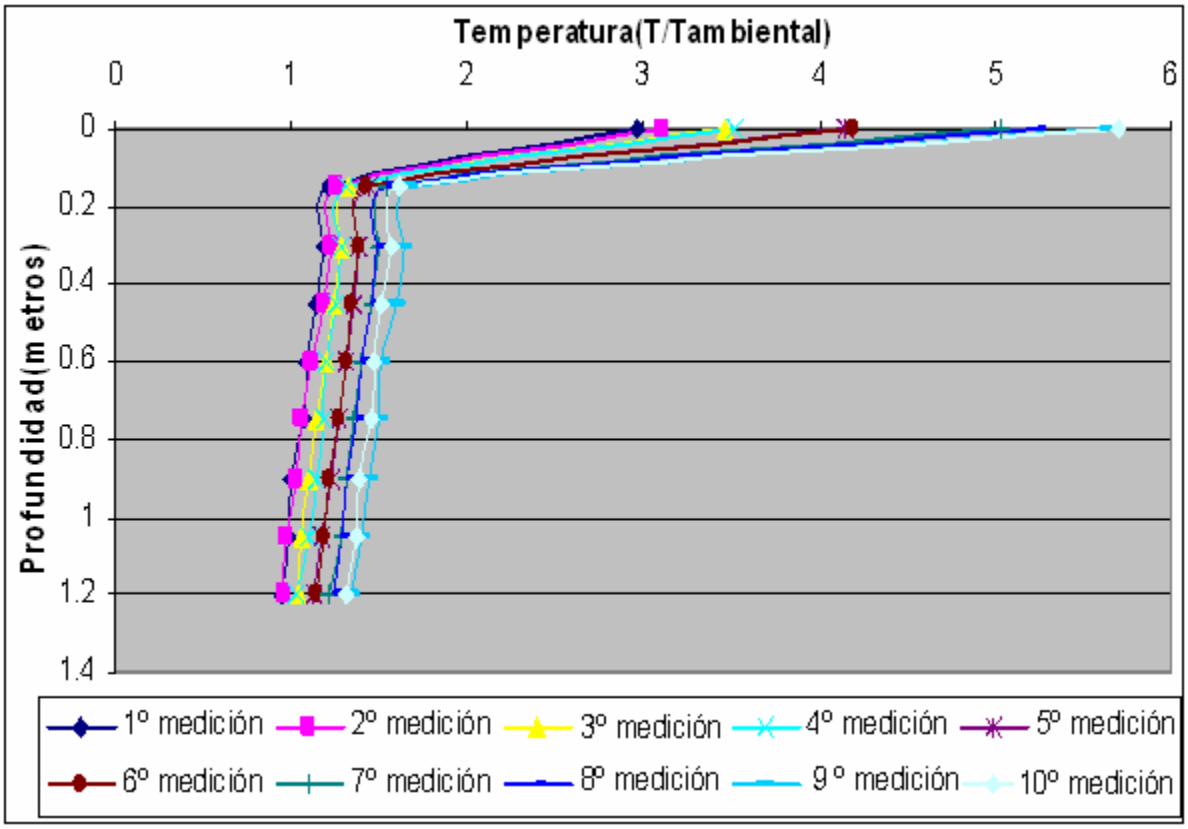
En cuanto a la temperatura en el interior de las columnas, a continuación se muestran las figuras 4.19 y 4.20, donde se exponen el comportamiento de la temperatura a medida que la profundidad aumenta.

Figura 4.19. Comportamiento de la temperatura con respecto a la profundidad, para columna de 1,5 metros.



Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Figura 4.20. Comportamiento de la temperatura con respecto a la profundidad, para columna de 1,25 metros.



Al igual que los suelos anteriores, el comportamiento de la temperatura a medida que la profundidad aumenta, es similar tanto para la columna de 1,5 metros y 1,25 metros. Ambos presentan la misma curvatura con pendientes bastante parecidas, por lo cual es predecible que presente un coeficiente de difusión térmica similar para ambas columnas.

Esto se ratifica al calcular los coeficientes, pues presenta un coeficiente de difusión térmica de 0,28ºC/metro para ambas columnas, lo cual es muy razonable pues se trata del mismo suelo, en donde sin no es alterado por algún factor externo que altere los resultados, debe entregar el mismo resultado, lo que ocurrió en este caso.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

4.3 Validación

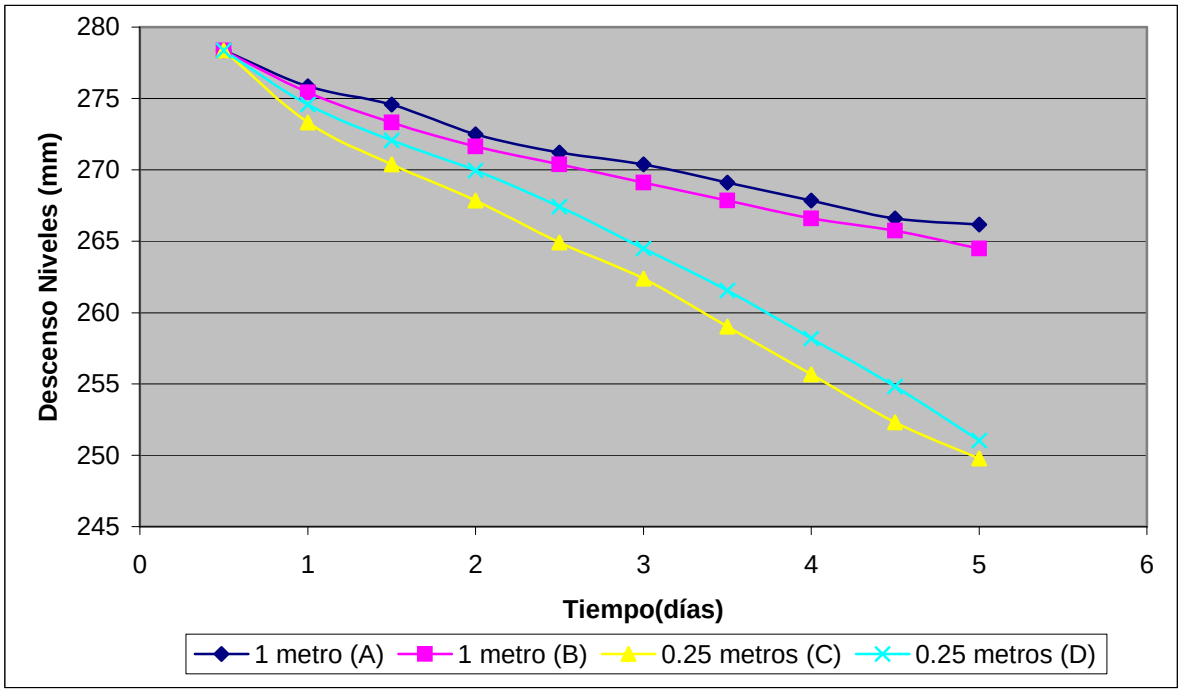
Se realizó un ensayo para el limo en estado suelto utilizando el mismo equipo, solamente se adecuó el sistema para trabajar con 4 columnas. Una vez montado el equipo estos no fueron intervenidos, por lo cual las condiciones del sistema son las mismas que lo ensayos anteriores.

El equilibrio del sistema se alcanzó después de 24 horas, por lo cual la experimentación comenzó al día siguiente, durando 4 días.

La validación se realizó en el mismo galpón que se ejecutaron las experiencias anteriores, con una temperatura alrededor de los 26ºC. Los datos observados en la etapa de validación están adjuntados en el anexo 1.

En la figura 4.21 se observa la evolución de los niveles al interior de la columna con respecto al tiempo y luego en la figura 4.22 se muestra el descenso en mm/día que sufrió cada columna y la tasa de evaporación calculada en la primera medición para el limo suelto en la misma altura, de manera de comparar las cuatro tasas de evaporación.

Figura 4.21. Evolución de niveles en ensayos de validación



Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Figura 4.22. Descensos en mm/día de cuatro columnas para validación.

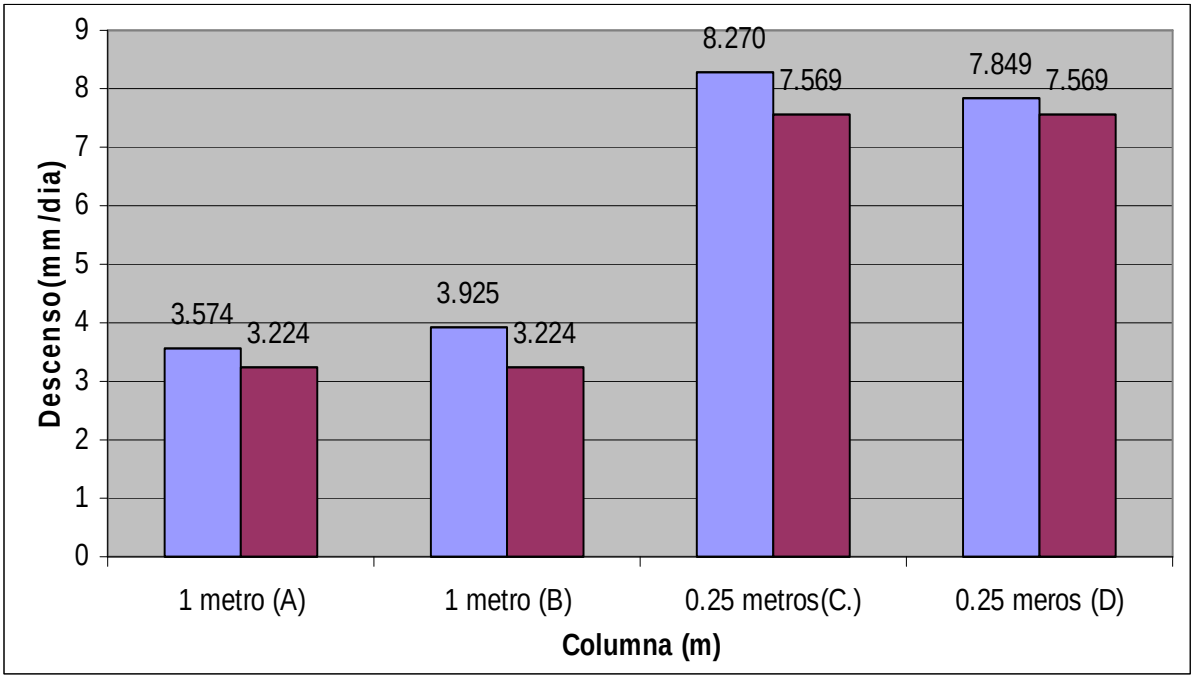
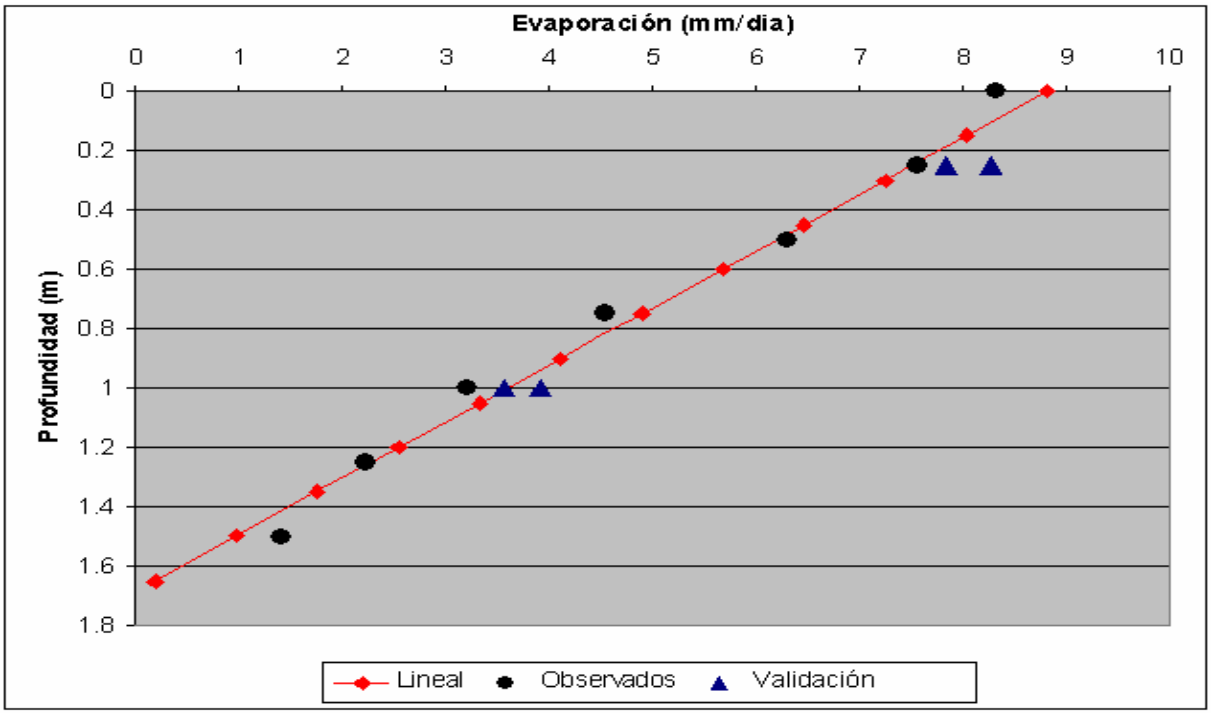


Figura 4.23 .Curva de evaporación de limo sin compactar y cuatro puntos de validación.



Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

En la figura 4.23 se muestran los puntos reales observados de evaporación del limo sin compactar para las siete profundidades de napa freática y la curva que mejor se ajusta a esos puntos, que es la lineal. En este grafico se observan los 4 puntos de la validación para las profundidades de 0,25 metros y 1 metro, en donde al comparar la evaporación de las cuatro columnas con las obtenidas anteriormente para el mismo suelo y las mismas profundidades, se observa que hubo un aumento en la tasa de evaporación en todas las columnas, incrementando en forma pareja para todas las alturas.

Esto de produce debido al aumento de las temperaturas en el periodo de validación, ya que cuando se realizaron las primeras mediciones (principio de octubre) las temperaturas promediaban los 18ºC. En cambio en el periodo de validación (mitad de diciembre) las temperaturas promediaban los 25ºC, lo cual afecta directamente la evaporación en el interior de las columnas.

4.4 Comparación de curvas de distintos suelos

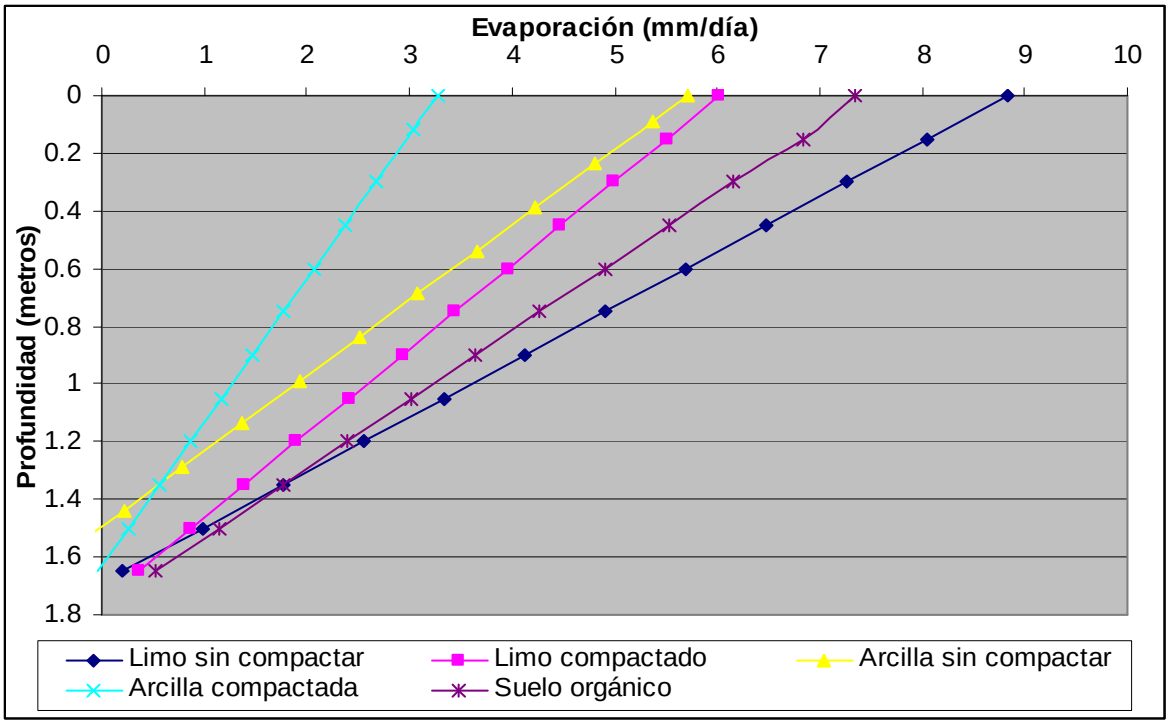
Con el objetivo de tener un parámetro de comparación entre las distintas curvas de los cinco suelos del estudio, se comparan en el mismo gráfico las curvas lineales de los suelos: limo suelto, limo compactado, arcilla suelta, arcilla compactada y suelo orgánico.

Cabe señalar que la curva lineal representa bien el comportamiento real de evaporación de cada suelo, puesto que todos los suelos tienen un buen coeficiente de ajuste para la recta. Por lo tanto el modelo lineal es buen parámetro para comparar cada suelo. De esta manera se comparan las magnitudes de tasas de evaporación, pendientes de rectas y profundidades de extinción, para posteriormente analizar los comportamientos y obtener conclusiones.

En la figura 4.24 se observan las cinco rectas de cada suelo, donde al ordenar las curvas en sentido decreciente de acuerdo a la magnitud, el limo sin compactar es la que tiene mayor tasa de evaporación, seguido por el suelo orgánico suelto, después el limo compactado, arcilla suelta y el suelo que tiene menor evaporación es la arcilla compactada. Estos resultados son muy razonables, puesto que los resultados de permeabilidad obtenidos de los ensayos a los suelos entregan permeabilidades en el mismo orden decreciente de tasa de evaporación entregado por las rectas.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Figura 4.24.comparación de rectas para diferentes suelos.



En la figura 4.24 se visualiza que el limo suelto y compactado y suelo orgánico tienen una profundidad de extinción alrededor de 1,7 metros, no obstante la arcilla compactada y suelta tienen profundidades de extinción de 1,6 metros y 1,5 metros respectivamente. Las profundidades de extinción son muy razonables, ya que la textura de la arcilla impide el paso fácil del agua lo que implica menor profundidad de extinción.

En cuanto a las pendientes de rectas, el limo compactado y suelto, la arcilla suelta y suelo orgánico presentan pendientes semejantes, sin embargo la arcilla compactada presenta una pendiente menos inclinada

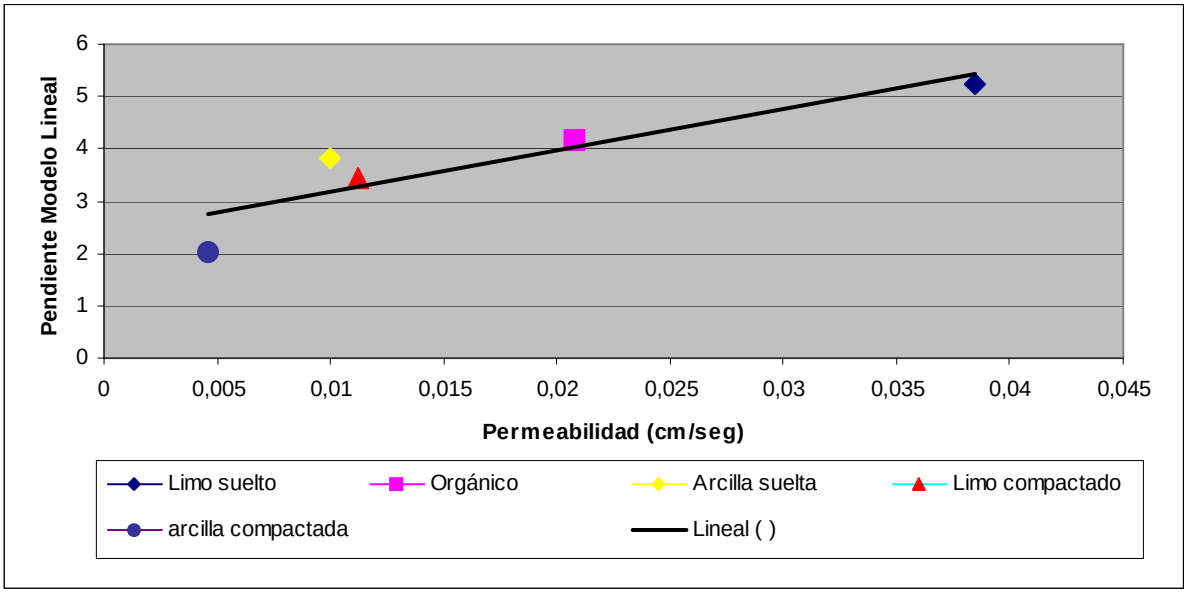
Al comparar los suelos sin compactar con los compactados, se observa que para el mismo suelo, presenta mayor magnitud de tasa de evaporación en el estado suelto que en estado compactado, como también se visualiza que presenta una pendiente menos inclinada en los estados compactados que en estado suelto.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

4.5 Relación entre pendientes de modelos lineales y permeabilidad

Otro análisis que se obtiene de los resultados anteriores es la relación entre la pendiente de la recta de los cinco suelos y su respectiva permeabilidad, donde se observa un comportamiento lineal el cual se visualiza en la figura 4.25.

Figura 4.25. Pendientes de modelos lineales v/s Permeabilidad



En el grafico se visualiza las pendientes de los modelos lineales para el limo suelta y compactada, orgánico, arcilla suelta y compactado con sus respectivas permeabilidades. A estos puntos se ajusta una recta a los puntos obtenidos y se visualiza que todos los puntos se acomodan bien a la recta, excepto la arcilla suelta donde su permeabilidad no se ajusta muy bien. Una causa de este error, puede ser a errores experimentales en el momento de efectuar los ensayos de permeabilidad los cuales son muy sensibles.

De esta forma se puede decir que la tasa de evaporación, la cual esta relacionada con la pendiente de cada suelo estudiado, depende de la permeabilidad del suelo. Es decir conociendo la permeabilidad de suelo se puede predecir el comportamiento y estimar la magnitud que tendrá la tasa de evaporación en ese suelo.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

5. CONCLUSIONES

Las conclusiones que se establecen, como resultado del estudio realizado son las siguientes:

a) El comportamiento real de la evaporación a través de un suelo limoso, tanto en estado compactado como suelto, compuesto por partículas finas, es de tipo lineal. Esta tendencia se manifiesta, puesto que a medida que aumenta la profundidad del nivel freático, la tasa de evaporación disminuye linealmente hasta llegar a una profundidad donde la evaporación deja de ocurrir. El estudio tiene validez hasta un nivel freático ubicado a 1,5 metros. Esto se debe a que de los modelos utilizados, el que mejor se ajusta al comportamiento de la evaporación en las columnas de suelo experimentales, es el modelo lineal.

b) El comportamiento real de evaporación en un suelo orgánico, como el que se utilizó en este estudio, es de tipo potencial. Debido a que a medida que aumenta la profundidad de la napa freática la tasa de evaporación disminuye proporcionalmente. El estudio tiene validez hasta un nivel freático menor o igual a 1,5 metros.

c) El comportamiento real de evaporación a través de un suelo arcilloso, en su estado suelto, como el que se utilizó en este estudio es de tipo potencial, puesto que, de los modelos utilizados, el que mejor se ajusta al comportamiento de la evaporación en las columnas de suelo, es el modelo potencial.

d) El comportamiento real de evaporación a través de un suelo arcilloso, en su estado compactado, es de tipo exponencial, puesto que, de los modelos utilizados, el que mejor se ajusta al comportamiento de la evaporación en las columnas de suelo, es el modelo exponencial.

e) La diferencia de la tasa de evaporación obtenida para un mismo suelo, pero distinto grado de compactación, es muy notoria. La menor evaporación producida desde suelos compactados se debe al menor índice de huecos en las columnas de suelo, producida por el buen reacomodo de las partículas luego de la compactación. Esto implica menor facilidad de circulación de agua y menor permeabilidad, lo que después repercute en una menor tasa de evaporación.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

f) Si bien cada suelo presenta una curva en particular que se acomoda mejor a los puntos reales de tasa de evaporación, de acuerdo al coeficiente de ajuste que presente un R^2 mas cercano a uno, el modelo lineal es un muy buen modelo de evaporización, ya que se acomoda muy bien a todos los puntos y presenta en todos los suelos un buen coeficiente de ajuste. De este modo el modelo lineal se puede utilizar perfectamente para representar la evaporación desde un acuífero que contenga cualquiera de los tres suelos estudiados.

g) Al analizar las pendientes de los modelos lineales de los cinco ensayos realizados y compararlas con sus respectivas permeabilidades, se observa que a medida que la pendiente aumenta las pendientes de los modelos lineal también incrementan. De esta forma se puede predecir el futuro comportamiento de evaporación de un acuífero que tiene una permeabilidad y compactación determinada.

hy

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

BIBLIOGRAFÍA

Cifuentes, Hernán. 2008. Análisis comparativo de la inclusión de curvas de evaporación no lineales en modelos de aguas subterráneas. Proyecto de título, Ingeniería Civil, Universidad del Bío-Bío.

Custodio, E y Llamas, M.1996 Hidrología Subterránea. Vol. Nº1 y Vol. Nº 2. Ed. Omega

Chin, David A. 2008. Phenomenological models of hydrologic processes in south Florida. Journal of Hydrology 349: 230-243.

Espinoza, C. 2005. Curso de Hidráulica de Aguas Subterráneas. Apuntes de Clases. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile.

Maderey, Laura. Principios de hidrología y estudio del ciclo hidrológico.

Ven Te Chow .1994. Hidrología Aplicada. Ed. Mc Graw Hill

Pagina con información referente a permeabilidad de suelos según textura. [En línea]. <ftp://ftp.fao.org/FI/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s09.htm> [consulta: 10 Disciembre 2008]

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

ANEXO 1

RESULTADOS FASE EXPERIMENTAL

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

ANEXO 2

RESULTADOS ENSAYOS A SUELOS

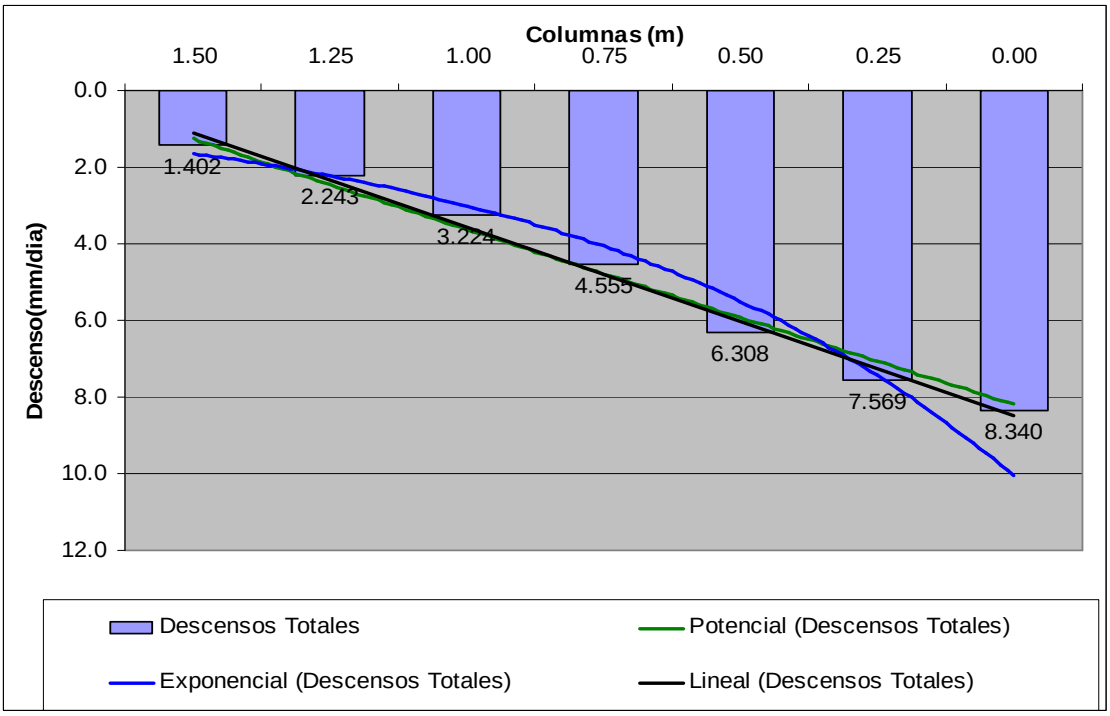
Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

1º EXPERIMENTO -LIMO NO COMPACTADO

Tabla 1. Registro de descensos de niveles de agua (mm)

medición	1.5	1.25	1	0.75	0.5	0.25	0
1	278.37	278.37	278.37	278.37	278.37	278.37	278.37
2	277.11	275.85	275.01	275.85	275.01	273.33	273.33
3	275.85	274.17	273.33	272.48	271.64	269.54	267.44
4	275.43	273.33	271.64	270.80	269.12	266.60	262.39
5	275.01	273.33	270.80	269.96	267.44	264.92	260.29
6	274.59	272.48	270.80	269.12	265.76	261.55	257.77
7	274.17	271.64	269.96	267.44	264.07	259.87	256.08
8	274.17	271.64	269.12	266.18	260.71	257.77	253.98
9	273.75	270.80	267.44	264.07	259.03	253.98	251.46
10	273.33	269.96	266.60	262.81	256.51	252.30	250.20

Figura 1. Tasas se evaporación de columnas en mm/día



Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Tabla 2. Registro de temperatura
Columna de 1,5 metros

medición	0	0.15	0.3	0.45	0.6	0.75	0.9	1.05	1.2	1.35	Tº ambiente
1	60.2	21.4	20.5	19.4	18.8	17.3	16.6	15	14.2	13.3	*19*
2	70.1	24	22.6	21.8	20.5	19.3	18.4	17.4	16.8	15	20.6
3	62.9	22.6	21.5	20.8	19.4	18.3	17	16.2	15.8	14.4	17.1
4	84.5	26.6	25.7	24.1	23.7	22.2	21.8	20.6	19.9	18.4	19.9
5	81.9	25.9	23.7	21.6	20.1	19.1	18.5	17.9	17.1	16.6	17.7
6	86	28.9	26.1	25.4	24.6	24	22.9	21.6	20.2	18.8	20.8
7	91.4	26.1	24.3	22	19.7	18.9	18.4	17.9	17.1	16.7	17.4
8	96.6	30.1	26.5	25.9	25.1	23.9	23.2	22	20.9	19.6	20
9	100	28.4	25.5	23.6	22.5	21.6	20.5	18.5	18.4	17.7	17.9
10	110	31.5	28.4	26.5	25.5	24.6	24	23.4	21.7	20.5	18.5

Tabla 3 .Registro de temperatura
Columna de 1,25 metros

medición	0	0.15	0.3	0.45	0.6	0.75	0.9	1.05	1.2	Tº ambiente
1	60	24.7	22.6	21.3	20.7	19.7	18.8	17.4	16.7	*19*
2	68	26.6	24.4	23.6	22.5	21.8	20.7	19.4	17.7	20.6
3	64	24.3	23.7	22.2	21.7	20.5	19	18.8	17.1	17.1
4	83	29.5	27.4	26.6	25	24.8	23.1	22.6	21	19.9
5	85	27	26.4	25.7	24.3	23.9	22.1	21.8	20.2	17.7
6	101	30.1	28.6	27.6	26.8	25.6	24.8	23.7	22.1	20.8
7	103	26.1	25.8	24.9	23	22.7	21.4	20.3	19.2	17.4
8	120	33.5	31.7	30.5	28.5	27.3	26.5	25.3	24.3	24.2
9	120	31.5	30.5	29.5	28.7	27	26.5	25.7	24	17.3
10	125	36.9	34.5	32.2	30.7	29.5	28.4	27.1	26.1	18.5

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Tabla 4 .Registro de temperatura
Columna de 1 metro

medición	0	0.15	0.3	0.45	0.6	0.75	0.9	Tº ambiente
1	52	23	22.6	21.8	20.1	19.7	18.7	*19*
2	59	26.7	25.4	24.3	23.8	22	21.4	20.6
3	63	25.6	24.7	23.1	22.8	21.9	20.6	17.1
4	70	29.9	28.9	27.8	26.9	25.9	24.8	19.9
5	77	27.1	26.2	25.1	24.2	23.2	22.1	17.7
6	94	31.1	30.2	29.2	28.1	27.4	26.4	20.8
7	97	29.6	28	27.4	26.3	25.9	24.3	17.4
8	114	34	33.1	32.2	31.3	30.2	29.2	20
9	120	31.9	30.5	29.5	28.5	27.4	26.4	17.9
10	129	35.6	34.8	33.6	32.9	31.2	30	18.5

Tabla 5 .Registro de temperatura
Columna de 0,75 metros

medición	0	0.15	0.3	0.45	0.6	Tº ambiente
1	45	25.2	24.7	23.1	21.8	*19*
2	51	27.5	26.4	25.1	24.8	20.6
3	54	26.3	25	24.3	23.7	17.1
4	66	30.8	29.9	28.8	27.9	19.9
5	74	28	27.5	26.4	25.8	17.7
6	88	33.2	32.5	31.6	30.5	20.8
7	77	30.6	29.6	28.8	27	17.4
8	94	33.6	32.6	31.7	30	20
9	99	31.5	30.5	29.5	28.4	17.9
10	114	35.4	34.9	33.7	32.8	18.5

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Tabla 6 .Registro de temperatura Columna de 0,5 metros

medición	0	0.15	0.3	0.45	Tº ambiente
1	52	25.9	24.7	23.8	*19*
2	56	28.8	27.4	26.4	20.6
3	60	27.4	26.4	25.9	17.1
4	65	30.7	29.5	28.2	19.9
5	71	29.6	28.5	27.5	17.7
6	73	32.5	31.6	30.5	20.8
7	81	31.1	30	29.9	17.4
8	91	33.2	32.7	31.9	20
9	101	32.7	31.8	30.6	17.9
10	116	35.3	34.5	33.8	18.5

Tabla 7 .Registro de temperatura Columna de 0,25 metros

medición	0	0.15	Tº ambiente
1	51	20	*19*
2	56	29.9	20.6
3	59	31.3	17.1
4	66	32.8	19.9
5	79	29.8	17.7
6	81	33.5	20.8
7	87	30.3	17.4
8	95	34.1	20
9	108	32.8	17.9
10	120	36.7	18.5

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Tabla 8 .Registro de temperatura
Columna de 0 metros

medición	0	Tº ambiente
1	51	*19*
2	54	20.6
3	59	17.1
4	63	19.9
5	65	17.7
6	67	20.8
7	70	17.4
8	71	20
9	74	17.9
10	77	18.5

2º EXPERIMENTO -LIMO SIN COMPACTAR

Tabla 9. Registro de descensos de niveles de agua (mm)

medición	1.5	1.25	1	0.75	0.5	0.25	0
1	296.03	296.03	296.03	296.03	296.03	296.03	296.03
2	295.19	296.03	295.19	293.51	293.51	289.30	285.94
3	294.35	294.35	293.51	290.99	290.15	287.62	282.58
4	294.35	292.67	291.83	289.30	288.46	285.94	280.05
5	293.51	292.67	290.99	288.04	286.36	283.84	278.37
6	293.51	291.83	289.72	287.20	284.26	281.31	276.69
7	293.51	290.57	288.46	285.94	283.00	278.37	273.75
8	292.67	289.72	287.20	284.68	281.31	275.85	272.48

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Figura 2. Tasas se evaporación de columnas en mm/día

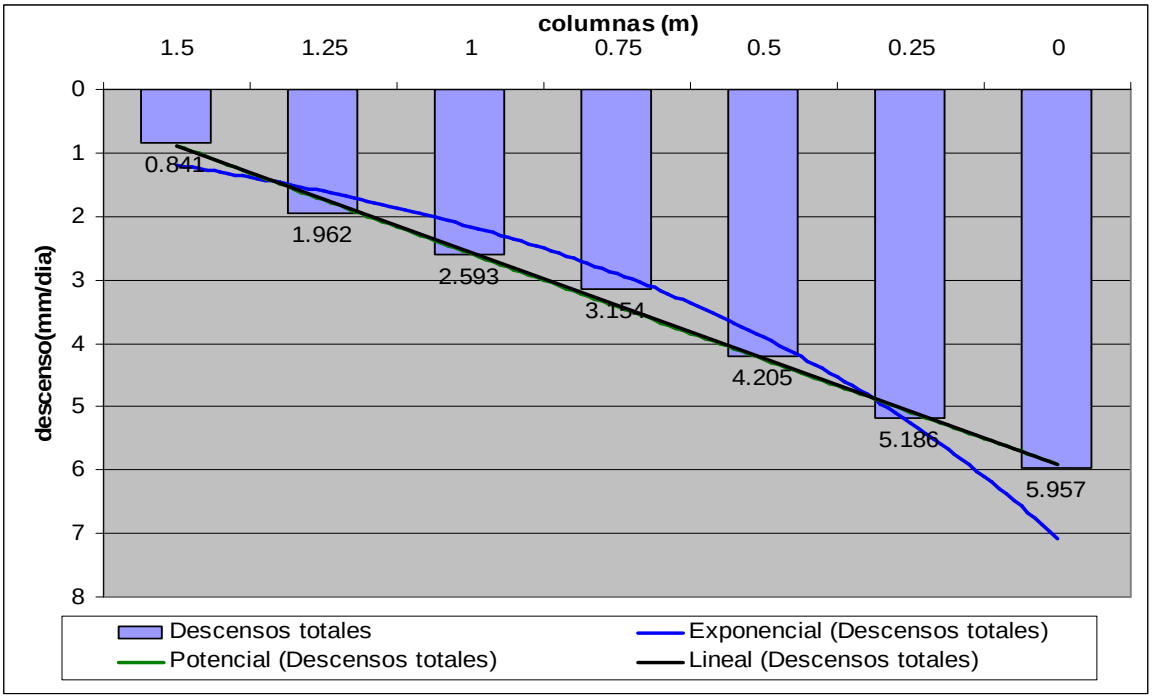


Tabla 10. Registro de temperatura
Columna de 1,5 metros

medición	0	0.15	0.3	0.45	0.6	0.75	0.9	1.05	1.2	1.35	Tº ambiente
1	59.2	18.5	16.9	15.6	14.4	13.7	12.1	11.9	10.3	9.8	15.8
2	68.5	20.3	17.9	17.4	16.3	15.9	14	13.7	12.5	11.6	17.2
3	70.5	19.5	18.5	17.4	16.4	15	14.3	13.8	12.8	11.6	16.6
4	76	25.5	24.7	23.9	22.1	21.7	20.6	19.7	18.4	17	17.8
5	79.8	23.5	22.6	21.6	20	19.6	18.5	17.3	16.8	15	15.7
6	90.4	28.8	27.5	26.6	25.3	24	22.9	21.9	20.6	19.3	18.6
7	90.3	26.7	25.6	24.9	23.8	22.9	21.9	20.4	19.9	18	15.8
8	110	31.1	30.5	29.5	28.4	27.3	26.4	25	24.1	22	18.7

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Tabla 11. Registro de temperatura
Columna de 1,25 metros

medición	0	0.15	0.3	0.45	0.6	0.75	0.9	1.05	1.2	Tº ambiente
1	55.5	19.2	18.5	17.3	16.6	15.9	14.3	12.3	10.9	15.8
2	63.8	21.5	20.4	19.2	18.8	17.5	15.8	13.2	12.8	17.2
3	69	21	20.1	18.6	18.2	16.8	15.1	12.8	11.5	16.6
4	75.5	23.6	22.5	21.8	20.6	19.5	18.3	17.7	16.1	17.8
5	79.1	21.5	20.2	19.4	18.8	17.2	17.8	16.2	14.8	15.7
6	95.6	25.8	24.6	23.6	22.2	21.5	20.3	19.5	18.2	18.6
7	96.6	23.7	22	21.8	20.8	19.2	18.7	17.3	16.3	15.8
8	118	30.5	29.5	28.4	27.9	26.3	25.1	23.9	22.6	18.7

Tabla 12. Registro de temperatura
Columna de 1 metro

medición	0	0.15	0.3	0.45	0.6	0.75	0.9	Tº ambiente
1	58.6	19.8	17.6	17	16.2	15.5	14.8	15.8
2	68.1	21.5	20.6	19.5	18.4	17.4	16.8	17.2
3	71.3	20.5	19.5	18.3	17	16.2	15.6	16.6
4	78.2	23.6	22.5	21.8	20.6	19.9	18	17.8
5	80.1	22.4	21.5	20.7	19.4	18.8	17	15.7
6	96.6	26.5	25.3	24.9	23.6	22.9	21.1	18.6
7	89.9	25.3	24.6	23.8	22.2	21.4	20	15.8
8	108	30.4	29.5	28.2	26.9	25.4	24.9	18.7

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Tabla 13. Registro de temperatura
Columna de 0,75 metros

medición	0	0.15	0.3	0.45	0.6	Tº ambiente
1	55.3	19.3	18.7	18.2	17	15.8
2	63	22.4	21.7	20.6	19.4	17.2
3	72.3	21.7	20.4	19.3	18	16.6
4	79.5	24.8	23.1	22.2	21.8	17.8
5	83.5	23.8	22.9	21.2	20.8	15.7
6	85.3	28.5	26.9	25.5	24.8	18.6
7	87.7	26.7	25.9	24.3	23	15.8
8	111	31.8	30.8	29.5	28.8	18.7

Tabla 14. Registro de temperatura
Columna de 0,5 metros

medición	0	0.15	0.3	0.45	Tº ambiente
1	57.4	20.5	19.6	18.4	15.8
2	65.6	24.6	23.6	22.1	17.2
3	76.1	22.2	21.7	20.6	16.6
4	81.2	28.6	26.7	24.7	17.8
5	86.3	27.7	26.3	25.3	15.7
6	88.6	29.5	28.6	27.5	18.6
7	90.5	28.5	27.4	26.4	15.8
8	95.6	31.8	30.6	29.5	18.7

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Tabla 15. Registro de temperatura
Columna de 0,25 metros

medición	0	0.15	Tº ambiente
1	59.6	20	15.8
2	69.1	23.7	17.2
3	72.6	22.5	16.6
4	79.4	25.8	17.8
5	86.5	23.9	15.7
6	86.9	28.5	18.6
7	88.1	27.6	15.8
8	92.3	31.4	18.7

Tabla 16. Registro de temperatura
Columna de 0 metros

medición	0	Tº ambiente
1	43.1	15.8
2	46.4	17.2
3	45.8	16.6
4	46.8	17.8
5	46.1	15.7
6	47.8	18.6
7	46.6	15.8
8	49.1	18.7

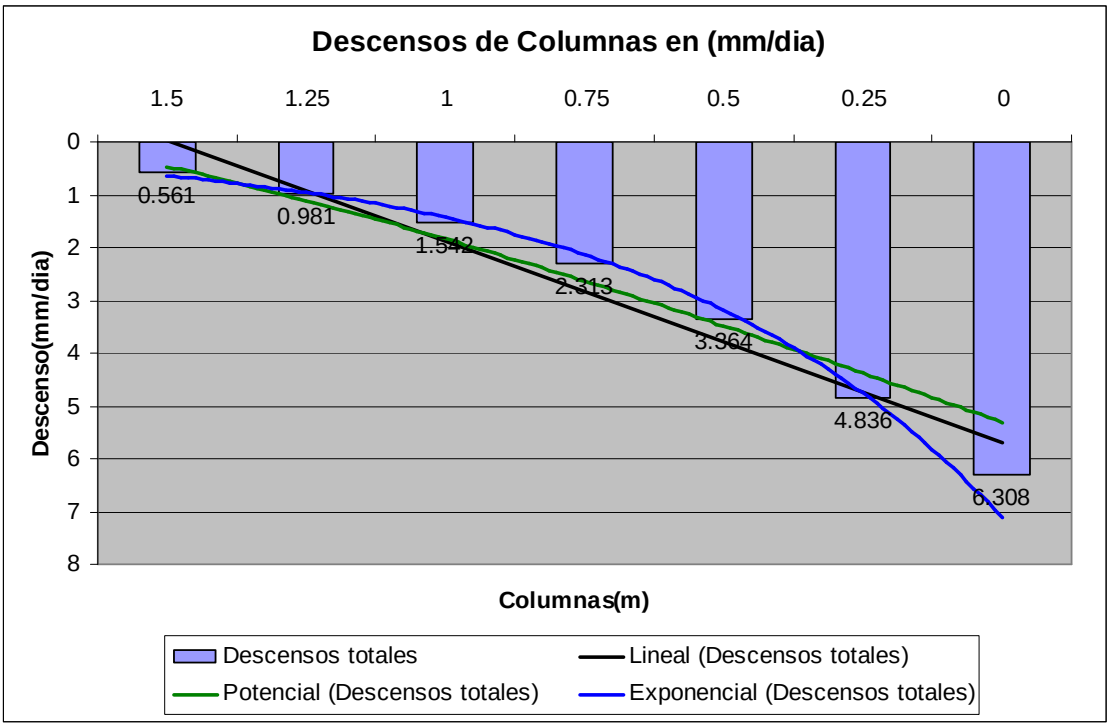
Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

3º EXPERIMENTO –ARCILLA SIN COMPACTAR

Tabla 17. Registro de descensos de niveles de agua (mm)

medición	1.5	1.25	1	0.75	0.5	0.25	0
1	278.37	278.37	278.37	278.37	278.37	278.37	278.37
2	278.37	277.95	277.53	277.53	277.53	277.53	277.11
3	277.95	277.53	277.11	277.11	276.69	275.85	275.01
4	277.53	277.11	276.69	275.85	275.43	274.17	273.33
5	277.53	276.69	275.85	274.17	273.33	272.48	270.80
6	277.53	276.27	275.43	273.33	271.64	270.80	267.44
7	277.11	275.85	274.59	272.48	270.80	269.12	264.92
8	277.11	275.85	274.17	271.64	269.96	267.86	262.39
9	276.69	275.43	273.75	271.22	268.28	264.92	259.87
10	276.69	275.01	272.90	270.80	267.44	261.97	257.77

Figura 3. Tasas se evaporación de columnas en mm/día



Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Tabla 18. Registro de temperatura
Columna de 1,5 metros

medición	0	0.15	0.3	0.45	0.6	0.75	0.9	1.05	1.2	1.35	Tº ambiente
1	63.3	22	21.4	20.6	19.4	18.4	17.7	16	15.6	14.7	*19.4*
2	72.6	25.5	24.2	23.3	22	21.8	20.8	19.9	18.8	17.2	21.8
3	76.6	23.5	22.5	21.1	20.7	19.9	18.3	17.1	16.9	15.3	18.8
4	87.9	26.4	25.8	24.1	23.2	22	21.6	20.5	19.2	18	21.4
5	90.1	24.5	23.3	22.7	21.8	20.1	19	18.1	17.2	16.9	18.1
6	106.5	27.3	26.5	25.1	24.4	23.8	24.6	23.6	22.2	21.8	20.6
7	107	26.6	25.4	24.8	23.7	22.2	21.8	20.5	19.2	18.8	18.2
8	115.6	29.5	28.5	27.7	26.5	25.1	24.8	23.6	22.2	21	19.5
9	116.4	27.4	26.8	25.1	24.6	23.6	22.9	21.3	20.6	19	18
10	133.9	31.4	30.7	29.9	28.5	27.7	26.3	24.3	23.9	22.8	20.6

Tabla 19. Registro de temperatura
Columna de 1,25 metros

medición	0	0.15	0.3	0.45	0.6	0.75	0.9	1.05	1.2	Tº ambiente
1	65.4	21.3	20.3	19.9	18.4	17.4	16.3	15.2	14.3	*19.4*
2	73.3	24.2	23.1	22.3	21	20.4	19.3	18.1	17.2	21.8
3	77.7	22.2	21.3	20.7	19.9	18	17.7	16.2	15.4	18.8
4	89.9	25.6	24.7	23.9	22.1	20.6	19.7	18.4	17.2	21.4
5	91.8	24.7	23.8	22.6	21.3	20.7	19.4	18.8	17	18.1
6	99.7	28.2	27.1	26	25.3	24.1	23.2	22.2	21	20.6
7	104.8	26.4	25.8	24.9	23.3	22.8	21.3	20.8	19.7	18.2
8	115.3	29.5	28.8	27.4	26.3	25.1	24.8	23.3	22.4	19.5
9	119.5	28.5	27.4	26.9	25.1	24	23.1	22.8	21.3	18
10	132.8	32.9	31.8	30.8	29.9	28.5	27.4	26.7	25.6	20.6

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Tabla 20. Registro de temperatura
Columna de 1 metro

medición	0	0.15	0.3	0.45	0.6	0.75	0.9	Tº ambiente
1	60.9	21.1	20	19.8	18.5	17.4	16	*19.4*
2	70.6	24.6	23.9	22.5	21.7	20.3	19.5	21.8
3	73.1	23.6	22.7	21.9	20.4	19.3	18.8	18.8
4	85.1	27.4	26.9	25.3	24.2	23.1	22.5	21.4
5	86.3	26.4	25.3	24.9	23.3	22.2	21.7	18.1
6	99.2	29.9	28.4	27.4	26.8	25.3	24.4	20.6
7	103.3	27.4	26.4	25.9	24.3	23.2	22.5	18.2
8	116.9	31.5	30	29.8	28.5	27.4	26	19.5
9	119.6	30.5	29.5	28.1	27.3	26.4	25.5	18
10	139.9	34.3	33.6	32.7	31.8	30.7	29.5	20.6

Tabla 21. Registro de temperatura
Columna de 0,75 metros

medición	0	0.15	0.3	0.45	0.6	Tº ambiente
1	62.9	22.5	21.5	20.7	19.5	*19.4*
2	74.1	25.6	24.3	23.3	22.1	21.8
3	75.8	24.4	23.8	22.3	21.7	18.8
4	87.4	27.6	26.5	25.4	24	21.4
5	93.5	26.6	25	24.3	23.8	18.1
6	107.4	29.8	28.5	27.4	26.5	20.6
7	111.4	27.5	26.9	25.3	24	18.2
8	118.6	31.3	30.6	29.6	28.4	19.5
9	120.5	30.1	29.5	28.6	28.1	18
10	139.7	34.9	33.9	32.9	32	20.6

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Tabla 22. Registro de temperatura
Columna de 0,5 metros

medición	0	0.15	0.3	0.45	Tº ambiente
1	49.7	20.1	19.8	18.9	*19.4*
2	57.9	25.4	24.3	23.9	21.8
3	69.9	23.5	22.2	21.9	18.8
4	76.5	28.4	27.3	26.6	21.4
5	80.4	27.4	26	25.3	18.1
6	87.8	29.4	28.5	27.9	20.6
7	91	28.5	27.5	26.1	18.2
8	95.8	32,8	30	29.6	19.5
9	99.9	30.5	29.5	28.4	18
10	105.8	34.5	33.6	32.9	20.6

Tabla 23. Registro de temperatura
Columna de 0,25 metros

medición	0	0.15	Tº ambiente
1	49.5	21.6	*19*
2	55.6	24.8	21.8
3	90.2	23.2	18.8
4	65.9	26.7	21.4
5	78.5	25.8	18.1
6	80.5	28.4	20.6
7	96.3	27.4	18.2
8	100	31.8	19.5
9	103.2	29.5	18
10	109.7	34.9	20.6

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Tabla 24. Registro de temperatura
Columna de 0 metros

medición	0	Tº ambiente
1	46.8	*19.4*
2	57.9	21.8
3	45.3	18.8
4	64.8	21.4
5	55.6	18.1
6	57.8	20.6
7	53.4	18.2
8	58.6	19.5
9	65.4	18
10	70	20.6

4º EXPERIMENTO –ARCILLA COMPACTADA

Tabla 25. Registro de descensos de niveles de agua (mm)

medición	1.5	1.25	1	0.75	0.5	0.25	0
1	278.37	278.37	278.37	278.37	278.37	278.37	278.37
2	278.37	278.37	277.95	277.95	277.53	276.27	274.59
3	278.37	277.95	277.53	277.53	277.11	275.43	272.90
4	277.95	277.53	277.11	276.69	276.69	274.17	271.64
5	277.95	277.11	276.69	276.27	275.85	272.90	270.38
6	277.95	277.11	276.27	275.85	275.01	271.64	269.54
7	277.53	276.69	275.85	275.43	274.59	270.80	268.28
8	277.53	276.27	275.43	275.01	273.33	269.96	267.86
9	277.11	275.85	275.01	274.17	272.48	268.70	266.60
10	276.69	275.43	274.17	273.33	272.06	267.44	265.34

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Figura 4. Tasas se evaporación de columnas en mm/día

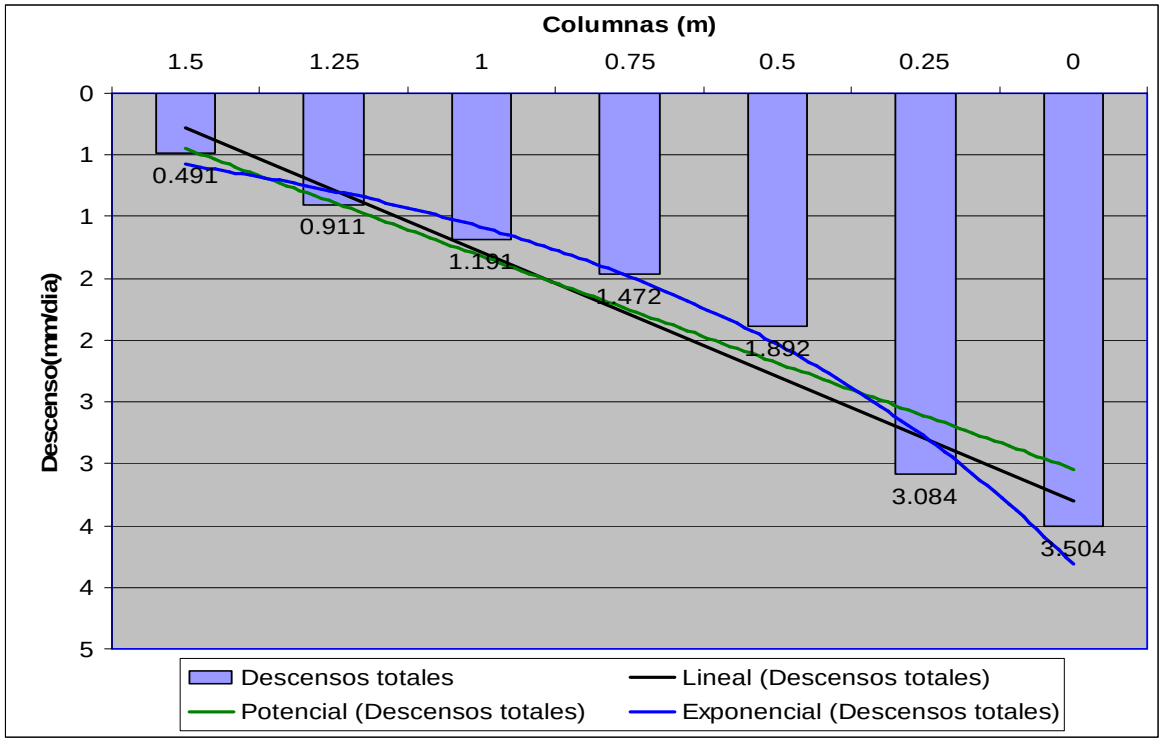


Tabla 26. Registro de temperatura
Columna de 1,5 metros

medición	0	0.15	0.3	0.45	0.6	0.75	0.9	1.05	1.2	1.4	Tº ambiente
1	64.4	24.6	23.6	22.8	21.3	20	19.4	18.4	17.3	17	*21*
2	74.4	27.1	26.4	25.8	24.4	23.1	22.9	21.2	20.7	19	23.2
3	79.7	25.8	24.7	23.1	22.9	21.2	20.6	19.3	18.8	17	20.6
4	88.8	28.9	27.4	26.4	25.1	26.5	25.8	26.1	25.4	24	22.6
5	90.1	27.7	26.4	25.8	24.3	23.4	22.1	21.3	20.8	20	20.1
6	97.3	29.8	28.5	27.5	26.9	25	24.3	23.7	22.4	21	21.4
7	100.6	28.5	27.3	26.6	25.1	24.3	23.7	22.6	21.9	21	20.2
8	109.4	30.8	29.7	28.4	27	26.3	25	24.3	23.1	23	21.8
9	110.5	29.9	28.7	27.5	26.8	25.2	23.8	22.6	21	21	20.2
10	127.1	32.9	31.7	30.6	29.5	28.6	27.4	26.8	25.3	25	22

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Tabla 27. Registro de temperatura
Columna de 1,25 metros

medición	0	0.15	0.3	0.45	0.6	0.75	0.9	1.05	1.2	Tº ambiente
1	72.4	23.3	22.6	21.3	20.8	19.4	18.8	17	16.2	*21*
2	81.4	25.9	24.6	23.6	22.1	21.5	20.8	19.3	18.8	23
3	86.6	24.7	23.3	22.1	21.8	20.8	19.6	18.4	17.3	21
4	88.1	27.4	26.4	25.9	24.3	23.5	22.4	21.3	20.8	23
5	91.3	26.5	25.1	24.7	23.6	22.1	21.6	20	19.6	20
6	96.3	29.6	28.5	27.6	26.6	25.4	24.3	23.1	22.8	21
7	99.4	28.5	27.4	26.1	25	24.2	23.9	22.1	21.8	20
8	100.7	31.4	30.6	29.5	28.6	27.5	26.8	25.4	24.3	22
9	104.3	30.5	29.9	28	27.4	26	25.5	24.2	23.1	20
10	109.4	33.4	32.5	31.7	30.6	29.8	28	27.5	26	22

Tabla 28. Registro de temperatura
Columna de 1 metro

medición	0	0.15	0.3	0.45	0.6	0.75	0.9	Tº ambiente
1	70.4	23.6	22.6	21.8	20	19.7	18.8	*22*
2	75.5	26.5	25	24.3	23.3	22.1	21.9	23.2
3	78.9	25.6	24.3	23.3	22.2	21.1	20.7	22
4	86.5	28.5	27	26.4	25.3	24	23.3	23.4
5	89.6	27.5	26	25.4	24	23.3	22.2	21.5
6	104.8	30.4	29.5	28.4	27.5	28.5	27.4	24.1
7	105.1	29.2	28.3	27.4	26.1	25.1	24.3	20.2
8	119.6	35.6	34.7	33.9	32.6	31.7	30	23.5
9	121.9	32.4	31.6	30.5	29	28.5	27.4	20
10	128.8	37.4	36.7	35.5	34.8	33.7	32.8	22.8

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Tabla 29. Registro de temperatura
Columna de 0,75 metros

medición	0	0.15	0.3	0.45	0.6	Tº ambiente
1	64.8	22.1	21	20.6	19.6	*21.8*
2	69.5	25.6	24.3	23.7	22.2	23.2
3	73.6	24.3	23.7	22.6	21.6	22
4	78.7	27.5	26.8	25.4	24	23.4
5	85.4	26.4	25.4	24	23.6	21.5
6	95.6	29.5	28.5	27.4	26.8	24.1
7	97.7	28.5	27.4	26.4	25	20.2
8	115.7	33.4	32.5	31.5	30.5	23.5
9	118.5	30.5	29.8	28.5	27.5	20
10	124.7	35.7	34.6	33.7	32	22.8

Tabla 30. Registro de temperatura
Columna de 0,5 metros

medición	0	0.15	0.3	0.45	Tº ambiente
1	50.5	26.9	24.8	22.7	*21.8*
2	59.8	35.2	33.8	31.1	23.2
3	70.4	32.6	30.6	28.9	22
4	78.3	38.9	36.9	34.1	23.4
5	82.5	33.8	31.9	29.6	21.5
6	88.5	39.5	37.3	35.1	24.1
7	96.5	36.7	34.9	32.3	20.2
8	106.7	40.4	38.6	36.3	23.5
9	108.4	38.9	36.4	34.4	20
10	110.7	41.8	39.6	38.6	22.8

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Tabla 31. Registro de temperatura
Columna de 0,25 metros

medición	0	0.15	Tº ambiente
1	57.5	27.9	*21.8*
2	62.7	30.6	23.2
3	75.4	29.7	22
4	81.2	32.4	23.4
5	88.9	31.7	21.5
6	92.9	33.9	24.1
7	99.7	32.6	20.2
8	105.8	35.9	23.5
9	111.4	37.9	20
10	114.3	40.1	22.8

Tabla 32. Registro de temperatura
Columna de 0 metros

medición	0	Tº ambiente
1	56.7	*21.8*
2	64.9	23.2
3	73.9	22
4	80.6	23.4
5	88.7	21.5
6	90.4	24.1
7	96.7	20.2
8	108.4	23.5
9	111.4	20
10	115.3	22.8

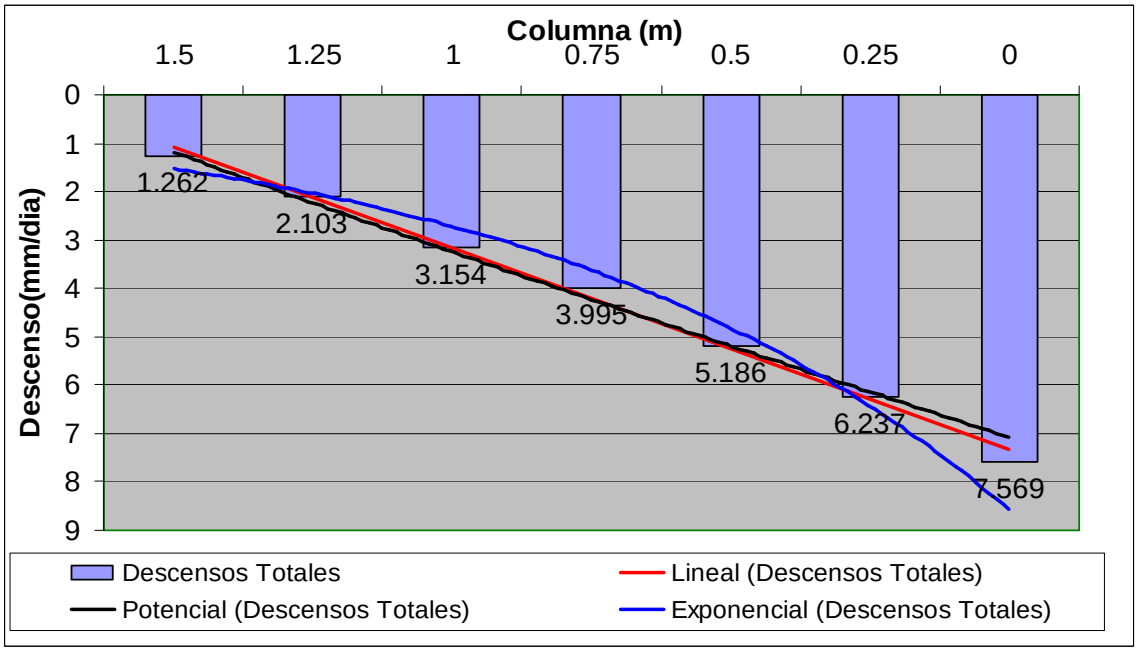
Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

5º EXPERIMENTO –SUELO ORGÁNICO

Tabla 33. Registro de descensos de niveles de agua (mm)

medición	1.5	1.25	1	0.75	0.5	0.25	0
1	278.37	278.37	278.37	278.37	278.37	278.37	278.37
2	277.95	277.53	277.53	277.11	275.85	274.59	273.75
3	277.53	277.11	276.69	276.27	274.59	272.48	270.80
4	276.69	276.27	275.85	275.01	273.33	270.38	268.28
5	276.27	275.85	275.01	273.75	271.64	268.28	266.18
6	275.85	275.01	273.75	272.06	269.96	266.18	263.23
7	275.43	274.17	272.48	270.38	267.86	264.07	259.87
8	275.01	272.90	270.80	268.28	265.34	261.13	257.77
9	274.59	272.06	269.12	266.60	262.39	259.03	254.82
10	274.17	271.22	267.86	264.92	260.71	256.51	251.88

Figura 5. Tasas se evaporación de columnas en mm/día



Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Tabla 34. Registro de temperatura
Columna de 1,5 metros

medición	0	0.15	0.3	0.45	0.6	0.75	0.9	1.05	1.2	1.35	Tº ambiente
1	65.8	27.6	26.5	25	24.7	23.1	22.6	21.9	20.6	19.5	*23.1*
2	72.6	29.7	28.5	27.4	26.1	25	24.6	23.1	22.5	21.7	24.8
3	77.7	28.5	27.4	26.4	25.5	24.1	23.8	22.4	21.7	20.8	23
4	89.6	31.2	30.5	29.6	28.5	27.4	26.4	25.3	24.3	23	25.2
5	92.8	30.1	29.2	28	27.5	26.5	25	24.1	23.8	22.2	22.5
6	105	32.9	32	31.4	29.8	28.8	27.5	26.4	25.8	24.6	24.3
7	107	31	29.9	28.8	27.9	27	26.8	25.4	24.7	23.6	21.8
8	119	34.5	32.6	31.5	30.6	29.6	28.5	27.5	26.3	25.3	23.9
9	122	33.2	32.6	31.6	30	29.5	28.7	27	26.4	25	21.2
10	139	37.8	36.7	35.7	34.3	33.8	32.9	31.3	30.9	29.7	24

Tabla 35. Registro de temperatura
Columna de 1,25 metros

medición	0	0.15	0.3	0.45	0.6	0.75	0.9	1.05	1.2	Tº ambiente
1	68.4	28.1	27.4	26.5	25	24.8	23.1	22.8	21.7	*23*
2	76.9	31	30.5	29.5	27.4	26.3	25.4	24.1	23.7	24.8
3	79.8	30.5	29.5	28.5	27.6	26.3	25.4	24.3	23.8	23
4	88.6	33.2	32.4	31.5	30	29.8	28.7	27.5	26	25.2
5	93.4	32.5	31	30.5	29.5	28.5	27.5	26.4	25.4	22.5
6	102	34.6	33.6	32.5	31.7	30.7	29.6	28.8	27.7	24.3
7	110	33.7	32.6	31.7	30.6	29.6	28.5	27.9	26.4	21.8
8	126	36.7	35.4	34.6	33.5	32.7	31.5	30.6	29.5	23.9
9	120	34.6	33.6	32	31.7	30.7	29.6	28.5	27.1	21.2
10	137	39.7	38.6	37.7	36.5	35.8	34.7	33.6	32.9	24

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Tabla 36. Registro de temperatura
Columna de 1 metro

medición	0	0.15	0.3	0.45	0.6	0.75	0.9	Tº ambiente
1	62.7	25.3	24.5	23.7	22.2	21.9	20	*23*
2	71.5	27.6	26.4	25	24.8	23	22.2	24.8
3	74.8	26.4	25.4	24.8	23.5	22.2	21.7	23
4	80.4	29.5	28.5	27.4	26.4	25.3	24	25.2
5	85.8	28.5	27.4	26	25.5	24.3	23.7	22.5
6	93.5	31.8	30.4	29.5	28.5	27	26.5	24.3
7	96.8	30.4	29.5	28.5	27.5	26.1	25.8	21.8
8	108	33.5	32.6	31.9	30.6	29.7	28	23.9
9	111	32.6	31.7	30.6	29.6	28.6	27.5	21.2
10	127	37.6	36	35.6	34.3	33.8	32.7	24

Tabla 37. Registro de temperatura
Columna de 0,75 metros

medición	0	0.15	0.3	0.45	0.6	Tº ambiente
1	61	22.9	21.6	20	19.5	*23.1*
2	70.1	24.5	23.6	22.8	21.9	24.8
3	74.9	23.6	22.6	21.7	20.6	23
4	85.6	25.6	24.7	24.1	23.7	25.2
5	89.6	24.7	23.9	22.8	21.9	22.5
6	106	27.6	26.5	25.8	24.7	24.3
7	109	26.8	25.8	24.3	23.7	21.8
8	117	29.5	28.5	27.5	26.4	23.9
9	122	28.5	2	26.8	25.7	21.2
10	138	33.5	32.7	31.8	30.6	24

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Tabla 38. Registro de temperatura
Columna de 0,5 metros

medición	0	0.15	0.3	0.45	Tº ambiente
1	69.9	26	25.6	24.8	*23.1*
2	76.5	29.5	28.5	27	24.8
3	79.9	28.5	27.4	26.9	23
4	86.4	32.7	31.7	30.7	25.2
5	90.4	30.6	29.7	28.5	22.5
6	96.7	34.9	33.7	32.8	24.3
7	107	32.8	31.8	30.7	21.8
8	112	36.7	35	34.9	23.9
9	117	35.9	34.7	33.7	21.2
10	120	37.8	36.9	35	24

Tabla 39. Registro de temperatura
Columna de 0,25 metros

medición	0	0.15	Tº ambiente
1	65.5	24.9	*23*
2	69.7	28.4	24.8
3	73.5	25.1	23
4	78.9	30.6	25.2
5	83.5	28.8	22.5
6	89.4	31.9	24.3
7	96.4	30.3	21.8
8	103	33.8	23.9
9	111	32.9	21.2
10	116	35.9	24

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Tabla 40. Registro de temperatura
Columna de 0 metros

medición	0	Tº ambiente
1	60.1	*23.1*
2	68.7	24.8
3	73.9	23
4	79.4	25.2
5	85.7	22.5
6	90.6	24.3
7	95.5	21.8
8	104	23.9
9	112	21.2
10	120	24

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

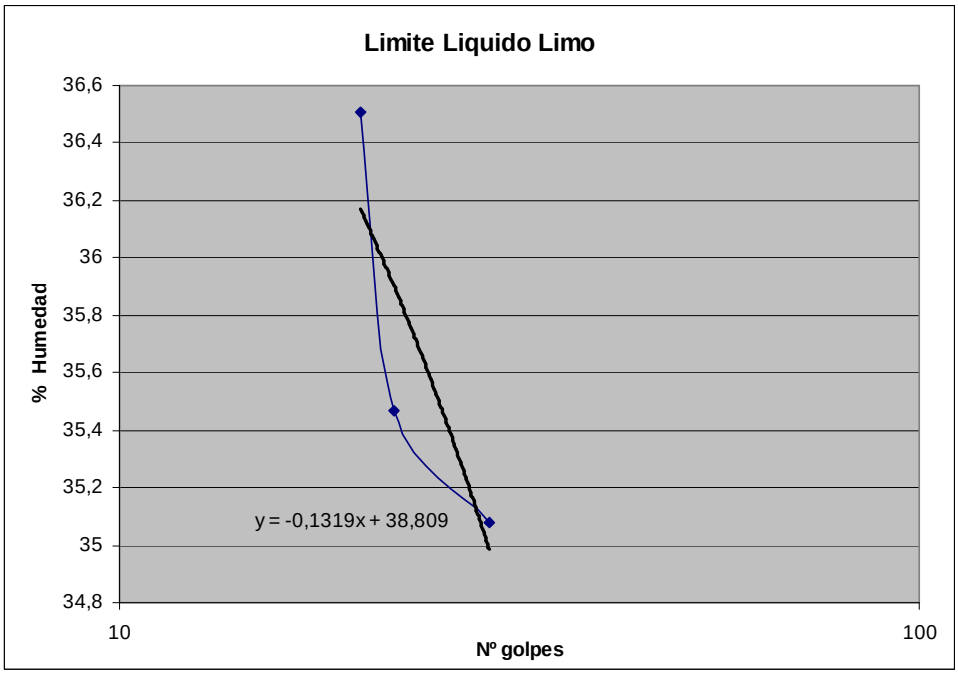
CLASIFICACIÓN U.S.C.S.

LIMITES DE ATTERBERG LIMO

Tabla 1. Resultados de humedad de límite liquido.

Limite Liquido			
Ensayo Nº	1	2	3
Capsula Nº	50	H	C
Nº golpes	**20**	**22**	**29**
Masa Húmeda	35,38	39,09	36,86
Masa Seca	30,75	34	32,26
Masa Capsula	18,07	19,65	19,15
% Humedad	***36,51***	***35,47***	***35,08***

Grafico 1. Obtención de Limite liquido a los 25 golpes



Limite Liquido = - 0,1319*25+ 38,809 = 35,51 %

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Tabla 2. Resultados de humedad de límite plástico.

Limite Plástico	
Capsula Nº	S
Masa Húmeda	26,14
Masa Seca	24,96
Masa Capsula	20,87
% Humedad	**28,85**

Índice de Plasticidad = 35,51 - 28,85 = 6,66 %

CLASIFICACION USCS LIMO => ML

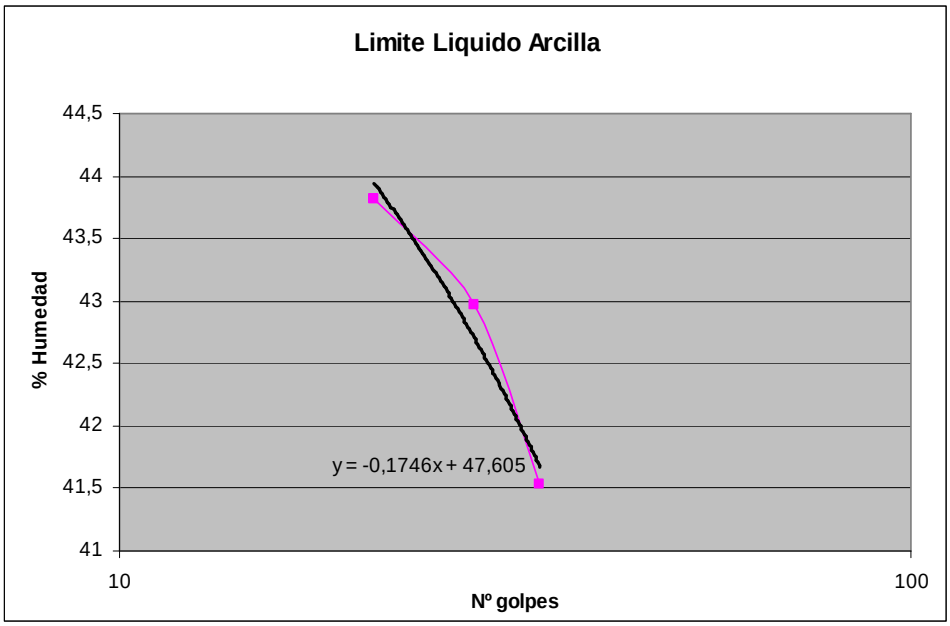
LIMITES DE ATTERBERG ARCILLA

Tabla 3. Resultados de humedad de límite liquido.

Limite Liquido			
Ensayo Nº	1	2	3
Capsula Nº	3	69	32
Nº golpes	**21**	**28**	**34**
Masa Húmeda	31,99	29,93	30,9
Masa Seca	28,44	26,35	27,71
Masa Capsula	20,34	18,02	20,03
% Humedad	***43,82***	***42,97***	***41,53***

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Grafico 2. Obtención de Limite liquido a los 25 golpes



Limite Liquido = - 0,1746*25+ 47.605 = 43,24 %

Tabla 4. Resultados de humedad de límite plástico.

Limite Plástico	
Capsula Nº	L
Masa Húmeda	26,63
Masa Seca	25,17
Masa Capsula	19,23
% Humedad	**24,58**

Índice de Plasticidad = 43,24 - 24,57 = 18,67 %

CLASIFICACION USCS ARCILLA => CL

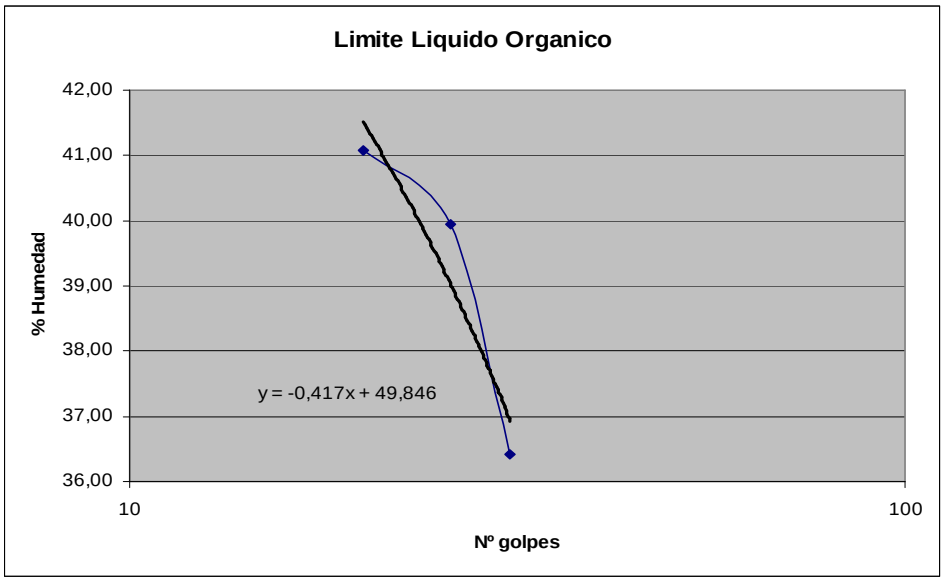
Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

LIMITES DE ATTERBERG ORGANICO

Tabla 5. Resultados de humedad de límite liquido.

Limite Liquido			
Ensayo Nº	1	2	3
Capsula Nº	2	C	57
Nº golpes	**20**	**26**	**31**
Masa Húmeda	33,12	36,33	33,7
Masa Seca	27,96	31,43	29,52
Masa Capsula	15,4	19,16	18,04
% Humedad	***41,08***	***39,93***	***36,41***

Grafico 3. Obtención de Limite liquido a los 25 golpes



Limite Liquido = -0,417*25+49,846=46,17 %

Tabla 6. Resultados de humedad de límite plástico.

Limite Plástico	
Capsula Nº	1
Masa Húmeda	20,11
Masa Seca	18,83
Masa Capsula	15,26
% Humedad	**35,85**

Índice de Plasticidad = 46,17 - 35,85 = 10,36 %

CLASIFICACION USCS ORGANICO => OL

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

CLASIFICACIÓN AASHTO

Tabla 7. Resultado de clasificación según método AASHTO

LIMO

		% retenido	% que pasa	Clasificación AASHTO A - 4 (0)
TAMIZ 10	5,2	2,6	97,4	-
TAMIZ 40	16,39	8,195	89,205	-
TAMIZ 200	101,98	50,99	38,215	36 min.

Limite Liquido	35,51	40 máx.
Índice plasticidad	6,66	10 máx.
IG	-0,20455775	

ARCILLA

		% que pasa	% que pasa	Clasificación AASHTO A - 7 - 6 (3)
TAMIZ 10	2,45	1,225	98,775	-
TAMIZ 40	8,71	4,355	94,42	-
TAMIZ 200	109,82	54,91	39,51	36 min.

Limite Liquido	43,24	41 min.
Índice plasticidad	18,67	11 min.
IG	3,100079	

ORGANICO

		% que pasa	% que pasa	Clasificación AASHTO A - 8 (1)
TAMIZ 10	1,91	0,955	99,045	-
TAMIZ 40	15,19	7,595	91,45	-
TAMIZ 200	109,7	54,85	36,6	-

Limite Liquido	46,17	-
Índice plasticidad	14,75	-
IG	1,39536	

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

SUELO EN ESTADO COMPACTADO

PROCTOR MODIFICADO LIMO

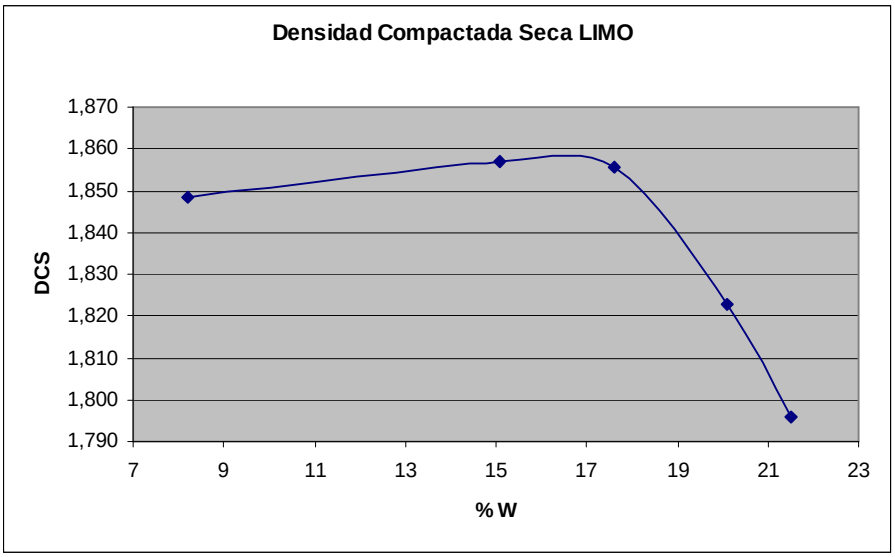
Tabla 8. Densidad de moldes según grado de humedad agregada

FRACCIONES	Humedad Agregada (%)	Masa molde + Suelo húmedo (gr)	Masa molde (gr)	Masa suelo húmedo (gr)	Volumen molde (cm3)	Densidad húmeda ρh(gr/cm3)	Densidad seca ρs(gr/cm3)
Fracción 1	4	3569	1735	1834	954	1,922	**1,848**
Fracción 2	6	3613	1735	1878	954	1,969	**1,857**
Fracción 3	8	3647	1735	1912	954	2,004	**1,856**
Fracción 4	10	3648	1735	1913	954	2,005	**1,823**
Fracción 5	12	3654	1735	1919	954	2,012	**1,796**

Tabla 9. Determinación de humedades

Capsula	A-10	A-23	A-11	A-29	A-25
mh(masa húmeda mas capsula)	312,62	329,02	298,12	300,67	303,54
ms(masa seca mas capsula)	289,563	286,92	254,7	251,7	251,23
mr (masa capsula)	7,95	7,9	7,99	7,91	7,92
W humedad final %	**8,19**	**15,09**	**17,60**	**20,09**	**21,50**

Grafico 4. Determinación de máxima densidad compactada seca según humedad optima



Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

PROCTOR MODIFICADO ARCILLA

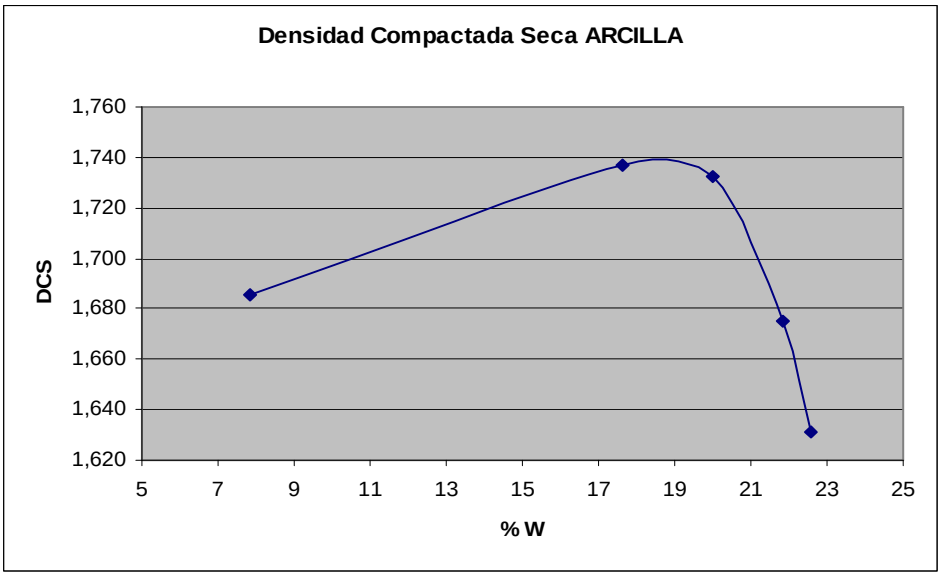
Tabla 10. Densidad de moldes según grado de humedad agregada

FRACCIONES	Humedad Agregada (%)	Masa molde + Suelo húmedo (gr)	Masa molde (gr)	Masa suelo húmedo (gr)	Volumen molde (cm3)	Densidad húmeda ρh(gr/cm3)	Densidad seca ρs(gr/cm3)
Fracción 1	12	3536	1735	1801	954	1,888	**1,686**
Fracción 2	14	3624	1735	1889	954	1,980	**1,737**
Fracción 3	16	3652	1735	1917	954	2,009	**1,732**
Fracción 4	18	3621	1735	1886	954	1,977	**1,675**
Fracción 5	20	3602	1735	1867	954	1,957	**1,631**

Tabla 11. Determinación de humedades

Capsula	A-12	A-7	A-14	A-13	A-25
mh(masa húmeda mas capsula)	296,25	275,06	285,96	305,01	294,36
ms(masa seca mas capsula)	275,25	235	239,64	251,78	241,65
mr(masa capsula)	7,96	7,9	7,99	8	7,97
W humedad final %	**7,86**	**17,64**	**20,00**	**21,84**	**22,56**

Grafico 4. Determinación de máxima densidad compactada seca según humedad optima



Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

SUELO EN ESTADO SUELTO

Tabla 12. Determinación de densidad aparente suelta y humedad natural

	Masa	volumen	Densidad aparente Suelta	Masa húmeda	Masa seca	Humedad natural
LIMO	100,46 gr	100 cm3	1,0046(gr/cm3)	1692 gr	1374 gr	23,10%
ARCILLA	89,09 gr	100 cm3	0,9(gr/cm3)	2107 gr	1662 gr	26,80%
ORGANICO	909,82 gr	1034 cm3	0,88(gr/cm3)	1935 gr	1419 gr	28,25%

PERMEABILIDAD DE LOS SUELOS

Tabla 13. Determinación de permeabilidad

	Tiempo(seg/cm)	Permeabilidad(cm/seg)
LIMO SIN COMPACTAR	125	0,008
LIMO COMPACTADO	217	0,004608
ARCILLA SIN COMPACTAR	26	0,038461
ARCILLA COMPACTADA	89	0,011235
ORGANICO	48	0,02083