

**DESARROLLO DE PRUEBAS A ESCALA DE LABORATORIO A UN SISTEMA
EN DOS DIMENSIONES PARA EL TRANSPORTE DE AGUAS
SUBTERRÁNEAS**

YALETXIS NAZARIA SOLANO BRITO

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
SANTANDER
FLORIDABLANCA
2018**

**DESARROLLO DE PRUEBAS A ESCALA DE LABORATORIO A UN SISTEMA
EN DOS DIMENSIONES PARA EL TRANSPORTE DE AGUAS
SUBTERRÁNEAS**

YALETXIS NAZARIA SOLANO BRITO

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

DIRECTOR

**JUAN CARLOS FORERO SARMIENTO ING. CIVIL. M.SC EN ING. CIVIL -
RECURSOS HÍDRICOS**

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

ESCUELA DE INGENIERÍAS

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

SANTANDER

FLORIDABLANCA

2018

DEDICATORIA

Dedico este proyecto a Dios, a mis padres, a mi familia y profesores; quienes fueron ese pilar fundamental para que todos mis objetivos se cumplieran; por brindarme ese apoyo incondicional durante toda mi etapa universitaria, porque gracias a su esmero y dedicación pude cumplir con todas mis expectativas durante este bonito proceso. Esto no hubiese sido posible sin el aporte de cada uno de ellos.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, agradecerle a Dios por ser luz, guía y motor en cada momento de mi vida; por estar siempre ahí cuando mi corazón por medio de la oración lo solicita, por ser ese personaje principal quien a través de señales me muestra el camino correcto en cada dificultad.

A mis padres y hermana, por ser siempre ese motivo de lucha en todos los momentos de mi vida, por ser esos ángeles protectores que con su amor y sacrificio constante no permiten que nada me quede grande.

A mis familiares, quienes por medio de consejos me impulsan a luchar por mis sueños recordándome siempre que en la vida se obtiene todo aquello que uno se proponga.

A mi abuela Arminda Mendoza; por ser siempre ese apoyo constante en todos los momentos arduos por los que pase, resaltando que querer es poder y que el que persevera alcanza.

A todos y cada uno de los profesores que me dieron clases, por sus enseñanzas, su tiempo y dedicación; en especial a los profesores de la Facultad de Ingeniería Civil que además de enseñarme todo lo que se de esta carrera hicieron que mi paso por la universidad fuera agradable.

A mi director Juan Carlos Forero Sarmiento por su apoyo y confianza durante este proceso, a la Universidad Pontificia Bolivariana por adoptarme durante estos cinco años, por aportar en mí; crecimiento, aprendizaje y madurez.

Todo lo que hagas, hazlo con amor y dedicación.

YALETXIS NAZARIA SOLANO BRITO.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCION	13
2. OBJETIVOS	13
2.1. OBJETIVO GENERAL	14
2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS	14
3. JUSTIFICACION	14
4. MARCO TEORICO	15
4.1. CICLO HIDROLOGICO	15
4.2. AGUA SUBTERRANEA	16
4.3. ACUIFEROS	19
Formaciones geológicas y su comportamiento	19
Acuíferos.	19
Acuitardos	19
Acuicludos.	20
Acuifugos.	20
Tipos de acuíferos y su comportamiento	20
Acuíferos porosos.	20
Acuíferos kársticos.	20
Acuíferos fisurados.	20
Según su estructura	20
Acuífero libre o freático.	20
Acuífero confinado o cautivo.	21
Acuífero semi-confinado.	21
4.4. LEY DE DARCY	21
4.5. CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA O PERMEABILIDAD K	23
4.5.1. Conductividad hidráulica en suelos parcialmente saturados	23
4.5.2. Conductividad hidráulica en suelos totalmente saturados	23

4.6.	MEDICION DE CONDUCTIVIDAD ELECTRICA A TRAVES DEL TRAZADOR SAL COMUN	24
5.	MARCO NORMATIVO	25
6.	METODOLOGIA	26
6.1.	EQUIPOS PARA MEDIR SALINIDAD	31
7.	RESULTADOS Y ANALISIS	35
7.1.	Ensayo de granulometría.	36
7.2.	Ensayo de peso específico.	39
7.3.	Ensayo de permeabilidad.	41
7.4.	Conductividad hidráulica (ley de Darcy).	46
7.5.	Ensayo con trazador (sal).	48
8.	CONCLUSIONES	56
9.	RECOMENDACIONES	57
10.	BIBLIOGRAFIA	58

ANEXOS

LISTA DE IMÁGENES

Imagen 1. Ciclo hidrológico.

Imagen 2. Agua subterránea.

Imagen 3. Tipos de acuíferos.

Imagen 4. Experimento de Henry Darcy.

Imagen 5. Modelo utilizado para simular el flujo de aguas subterráneas.

Imagen 6. Dimensiones del modelo y distribución de piezómetros.

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Conductividad hidráulica.

Tabla 2. Rangos de permeabilidad en Cm/seg.

Tabla 3. Dimensiones de piezómetros.

Tabla 4. Degradación de tamices y porcentaje retenido.

Tabla 5. Calculo granulométrico.

Tabla 6. Clasificación del agregado fino de acuerdo con el valor del módulo de finura.

Tabla 7. Datos obtenidos del ensayo de conductividad hidráulica.

Tabla 8. Registro de datos de altura para aplicar ley de Darcy.

Tabla 9. Datos para la curva de salinidad vs tiempo para el piezómetro 1.

Tabla 10. Datos para la curva de salinidad vs tiempo para el piezómetro 2.

Tabla 11. Datos para la curva de salinidad vs tiempo para el piezómetro 3.

Tabla 12. Datos para la curva de salinidad vs tiempo para el piezómetro 4.

Tabla 13. Datos para la curva de salinidad vs tiempo para el piezómetro 5.

Tabla 14. Datos obtenidos de salinidad en cada punto de toma.

Tabla 15. Datos de salinidad máxima en cada punto de toma.

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1. Instalación y acondicionamiento de elementos de suministro, circulación, medición de caudales y puntos de toma.

Fotografía 2. Piezómetros.

Fotografía 3. Equipo Inírida Deep Flow (medición de trazadores en tiempo real).

Fotografía 4. Patrón de conductividad.

Fotografía 5. Calibración de sonda para medir salinidad.

Fotografía 6. Proceso del ensayo de peso específico de la arena.

Fotografía 7. Proceso del ensayo de permeabilidad de la arena.

Fotografía 8. Cantidad de sal suministrada en el sistema para transporte de aguas subterráneas.

LISTA DE GRAFICAS

Grafica 1. Curva granulométrica.

Grafica 2. Curva de salinidad para el piezómetro 1.

Grafica 3. Curva de salinidad piezómetro 2.

Grafica 4. Curva de salinidad piezómetro 3.

Grafica 5. Curva de salinidad piezómetro 4.

Grafica 6. Curva de salinidad piezómetro 5.

Grafica 7. Dispersión de salinidad en el sistema.

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: DESARROLLO DE PRUEBAS A ESCALA DE LABORATORIO A UN SISTEMA EN DOS DIMENSIONES PARA EL TRANSPORTE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

AUTOR(ES): YALETXIS NAZARIA SOLANO BRITO

PROGRAMA: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR(A): JUAN CARLOS FORERO SARMIENTO

RESUMEN

El agua subterránea es un recurso bastante significativo en la vida cotidiana, al cual no se le da la importancia que merece. Muchas personas consideran a las aguas subterráneas como un fenómeno raro, que generalmente asocian con un mero pozo del que extraen agua a través de un balde sujetado a una cuerda. Pero lo que muchos desconocen, es que el agua subterránea es más que eso, ya que gracias a este recurso se mantiene el caudal de muchos ríos cuando duran largos periodos sin llover. Por esta razón, se vio la necesidad de realizar una investigación sobre los fenómenos de movilidad del agua, a fin de buscar estrategias de enseñanza y aprendizaje en las áreas de hidrología y mecánica de suelos para los estudiantes de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Pontificia Bolivariana, Seccional Bucaramanga. Para cumplir con las expectativas de este proyecto, se utilizó un modelo existente, el cual fue construido por los estudiantes de semillero. A fin de realizar pruebas para determinar las condiciones hidráulicas necesarias para simular un flujo de aguas subterráneas, así como también conocer la conductividad hidráulica en el sistema y por medio de un conductímetro, evaluar cómo se presenta la dispersión de salinidad en el mismo. Esto con la intención de brindarle a los estudiantes la capacidad de adquirir competencias a escala de laboratorio, las cuales a futuro podrán ser extrapoladas a escala real, es decir, en campo. Después de realizadas todas las pruebas se dedujo que la conductividad hidráulica del sistema es muy rápida. que a mayor cantidad de sales presentes en el agua mayor será la conductividad eléctrica y donde se da mayor saturación de trazado indica que el manto de suelo en ese punto tiene menor velocidad.

PALABRAS CLAVE:

Simulación, aguas subterráneas, conductividad hidráulica, conductímetro, dispersión de salinidad.

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: DEVELOPMENT OF LABORATORY SCALE TESTS TO A MODEL IN TWO DIMENSIONS FOR THE TRANSPORT OF UNDERGROUND WATERS.

AUTHOR(S): YALETXIS NAZARIA SOLANO BRITO

FACULTY: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR: JUAN CARLOS FORERO SARMIENTO

ABSTRACT

Groundwater is a very significant resource in everyday life, which is not given the importance it deserves. Many people consider groundwater as a rare phenomenon, which they usually associate with a mere well from which they extract water through a bucket attached to a rope. But what many do not know, is that groundwater is more than that, because thanks to this resource the flow of many rivers is maintained when they last for long periods without rain. For this reason, we saw the need to carry out research on the phenomena of water mobility, in order to seek teaching and learning strategies in the areas of hydrology and soil mechanics for students of the Faculty of Civil Engineering of the University Pontifical Bolivariana, Sectional Bucaramanga. To meet the expectations of this project, an existing model was used, which was built by the seedling students. In order to perform tests to determine the hydraulic conditions necessary to simulate a flow of groundwater, as well as to know the hydraulic conductivity in the system and by means of a conductivity meter, to evaluate how the salinity dispersion is presented in it. This with the intention of giving students the ability to acquire skills at laboratory scale, which in the future can be extrapolated to a real scale, that is, in the field. After all the tests were carried out, it was deduced that the hydraulic conductivity of the system is very fast. that the greater amount of salts present in the water, the greater the electrical conductivity and where there is a greater saturation of the tracing, it indicates that the soil layer at that point has a lower velocity.

KEYWORDS:

Simulation, groundwater, hydraulic conductivity, conductivity, salinity dispersión.

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

1. INTRODUCCIÓN

Debido a la gran competencia universitaria en un mundo globalizado se busca promover en los estudiantes el interés hacia la actualización e investigación. Esto con el fin de mejorar el nivel académico en la Universidad Pontificia Bolivariana, así como también permitir que el estudiante se familiarice con nuevas estrategias partiendo de su propia experiencia; enfrentando y resolviendo todo problema que se le presente en su vida como profesional. Tanto docentes como estudiantes, diariamente se encuentran expuestos a cambios presentados en la sociedad lo cual genera una fuerte responsabilidad que deben afrontar con soluciones que solo la amplia investigación puede dar. Investigar es fundamental en el diario vivir; debido a que esta es la única herramienta que genera respuestas a curiosidades que cualquier ser humano puede tener. La clave para aprender a investigar es tener dudas de un tema en específico que motiven a buscar información para generar un amplio conocimiento y posibilitarle al ser humano que se sirva de su propia razón. Es bueno tener claro que el objetivo principal de la investigación es buscar la manera de resolver un problema o indagar a profundidad las causas que lo provocan.

Atendiendo a lo anteriormente mencionado se realizó un proyecto de grado enfocado en el área de hidrología subterránea y mecánica de suelos. Este proyecto de investigación consiste en la profundización de las aguas subterráneas, ya que a este recurso no se le da la importancia que merece, muchas personas cuando les hablan de las aguas subterráneas inmediatamente lo asocian con un mero pozo que solo sirve para captar agua a través de un balde atado a una cuerda. Pero este recurso es algo más que eso, ya que es la única fuente que mantiene el caudal de ríos y manantiales cuando trascurren largos periodos sin llover. Es por este motivo que surgió la necesidad de fomentar un estudio donde se realizó un análisis de este recurso tan significativo. Para llevar a cabo este estudio se hizo uso de un prototipo a escala bidimensional, que fue construido por los estudiantes de semillero de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Pontificia Bolivariana; con el fin de determinar las condiciones hidráulicas necesarias para simular un flujo de agua subterránea en el mismo, así como también, estimar la conductividad hidráulica en el sistema aplicando la ecuación de Darcy y con la ayuda de un trazador salino evaluar su comportamiento en el interior de un suelo granular.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

- Evaluar de forma experimental las condiciones hidráulicas, para determinar el transporte de aguas subterráneas en un modelo de prueba a escala de

laboratorio para un sistema en dos dimensiones como herramienta académica.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer las condiciones hidráulicas necesarias para simular un flujo en dos direcciones para el modelo de prueba a escala de laboratorio existente.
- Estimar la conductividad hidráulica del sistema de aguas subterráneas en dos dimensiones (aplicando la ley de darcy).
- Evaluar cómo se presenta la dispersión de salinidad en el modelo en dos dimensiones de aguas subterráneas.

3. JUSTIFICACIÓN

El agua subterránea es aquella que se encuentra situada bajo la superficie terrestre, saturando los poros y las fisuras de la misma. Esta agua tiene la capacidad de moverse de forma natural en cauces fluviales, manantiales, etc. También puede moverse de manera artificial mediante pozos y otros tipos de captaciones. Generalmente se renueva de modo constante por la Naturaleza, merced a la recarga. Este recurso es esencial para mantener el caudal de muchos ríos y la humedad del suelo en áreas bajas.¹

A nivel global, el agua subterránea es de vital importancia en la actualidad; ya que es aquella reserva de agua potable para muchas regiones habitadas por seres humanos; por esta y otras razones más, se prefiere hacer uso de ella debido a que no se encuentra tan contaminada por residuos y microorganismos como las aguas superficiales. Este es un tema de gran importancia, el cual se ha convertido en una preocupación para países industrializados y es por esto que se ha visto la posibilidad de estudiarlas para descubrir que sucede con estas. A fin de encontrar respuestas a las dudas que se tienen, como por ejemplo como es su recorrido ya que no son observables para el ojo humano. Debido a esta problemática se ve la necesidad de establecer escenarios prácticos donde se puedan visualizar estos comportamientos. Por lo tanto, se planteó la posibilidad de hacer uso de un modelo bidimensional a escala de laboratorio en donde se simula el flujo de las aguas subterráneas. Este modelo fue la base principal del proyecto durante todo el estudio; ya que por medio del mismo se evaluó a pequeña escala su potencial y su posibilidad de desarrollo. La idea principal de este análisis es utilizar un trazador (sal), a fin de identificar y describir como se da el movimiento de las aguas

¹ (Veléz Otálvaro, 1992)

subterráneas en un suelo granular, así como también afianzar competencias instrumentales e interpersonales relacionadas con la distribución del agua en el ambiente subterráneo, buscando estrategias de enseñanza y aprendizaje para los estudiantes de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Pontificia Bolivariana.²

4. MARCO TEÓRICO

4.1. CICLO HIDROLÓGICO ³

Es un proceso detallado del continuo movimiento que tiene el agua y el almacenamiento producido por la Atmosfera, Biosfera, Hidrosfera y Litosfera lo que normalmente se denomina como Sistema Climático. El agua del subsuelo es el continuo movimiento del agua en el planeta Tierra, a través de un ciclo; este comportamiento es debido a dos casos: el primero, evaporación, que es cuando el sol ofrece energía para elevar el agua y el segundo es la precipitación y el escurrimiento; que es la gravedad terrestre que hace bajar el agua que se queda condensada en las nubes. Se puede decir también que el ciclo hidrológico es aquel que tiene la capacidad de mantener en movimiento las masas de agua de un punto a otro y está compuesto por tres estados distintos: sólido, líquido y gaseoso⁴. Se dice que toda agua que es transitada por los depósitos desiguales de la atmosfera, genera un ciclo que es producido gracias a la evaporación, condensación, precipitación, sedimentación, escorrentía, flujo de infiltración, sublimación, transpiración, fusión y aguas subterráneas.

el volumen total del agua que participa en el ciclo hidrológico es de aproximadamente 1338 millones de kilómetros cúbicos. Alrededor de un 97% es agua salada. Del agua dulce total, un 2,14% esta confinada en los glaciares y la nieve, y un 0,61% se encuentra en el subsuelo. Las fuentes superficiales de agua dulce, como ríos y lagos, solamente corresponden a unos 93.100 kilómetros cúbicos. A pesar de esto los ríos y lagos son la principal fuente de agua de la población. La cantidad de agua que se infiltra en el suelo depende principalmente de su humedad y de factores tales como tipo de suelo, vegetación y relieve (Gleick, 1996).⁵

Gracias al ciclo hidrológico, se puede decir que cuando hay presencia de lluvia, el agua que desciende de las nubes una parte fluye sobre la superficie terrestre y otra

² (Serrano Guzmán , Forero Sarmiento , Arias, & Ruiz , 2013, pág. 6).

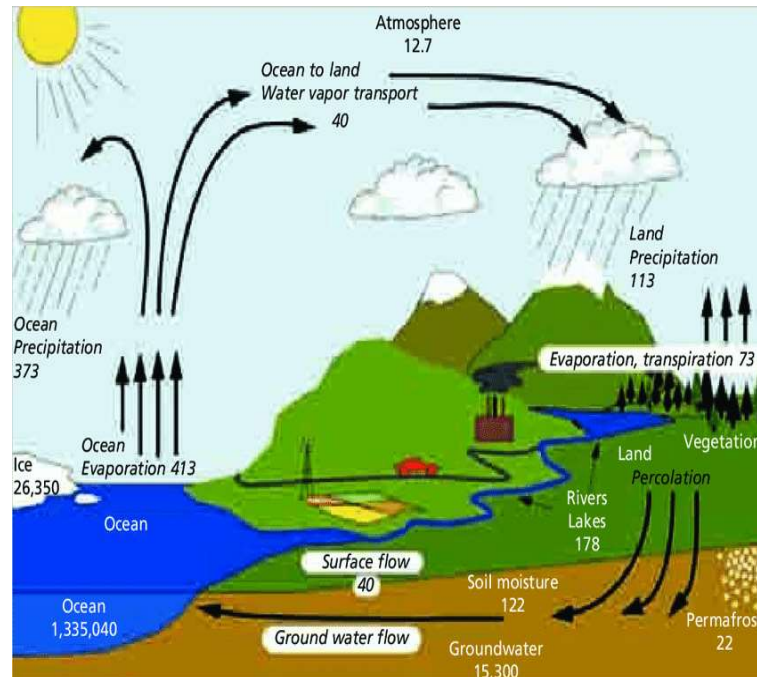
³ (Mateos Ruiz & Gonzalez Casasnovas , 2009).

⁴ El agua puede ir cambiando de estado (solido, liquido, gaseoso) en varias etapas del ciclo hidrológico y este proceso puede demorar bien sea millones de años o tan solo segundos.

⁵ Gleick, "water resources. In Encyclopedia of climate and weather" (Nueva York: Oxford University Press, 1996).

se queda infiltrada en los vacíos y fisuras de las formaciones geológicas, lo que hace que se formen los depósitos de las aguas subterráneas.

Imagen 1. Ciclo hidrológico.



Fuente: (Trenberth, 2007).

4.2. AGUA SUBTERRÁNEA ⁶

El agua subterránea es el agua filtrada en el terreno a través de vacíos que contienen las rocas y residuos que nacen por debajo de la Tierra. Estas aguas se caracterizan por ser capaces de quedarse estancadas en las distintas capas arenosas del subsuelo, lo que permite que se formen los acuíferos, expertos en retener el agua lluvia y esto se debe a factores como: la porosidad, la permeabilidad, la transmisibilidad específica y el coeficiente de almacenamiento. Por esta razón es de vital importancia conocer las características anteriormente mencionadas, ya que estas permiten evaluar cuanta cantidad se tiene del recurso y como aprovecharlo sin correr el riesgo de acabar con el mismo. Las aguas subterráneas generalmente son utilizadas para riego y uso industrial, así como también para abastecer a comunidades domésticas. El agua lluvia es el aporte fundamental para conformar las aguas subterráneas, así como también factores como: el tipo de suelo, los procesos microbiológicos y químicos del suelo. Lo que quiere decir también que gracias al agua lluvia, es que las aguas subterráneas o en su defecto la

⁶ (Custodio & Llamas, 1996) .

hidrogeología se puede formar de manera más fácil mediante el proceso de infiltración.

Se puede decir también que el agua subterránea es la más económica, la más segura y aquella que requiere de poco tratamiento previo. Alrededor de la mitad de la población mundial depende del agua subterránea como suministro de agua potable. El agua subterránea es muy delicada, es decir que fácilmente puede ser contaminada por procesos industriales y por sobreexplotación; ya que la mayoría de las actividades desarrolladas por la mano humana como: la industria, el desarrollo urbano y la agricultura, afectan de manera considerable su calidad ⁷. Lo que indica que extraer grandes cantidades de agua subterránea puede dar como resultado sequía en los pozos, daños en los ecosistemas, entrada de sustancia salina, hundimiento del suelo y pérdida total del recurso. La gestión de los recursos de agua subterránea tiene que equilibrar la explotación de un recurso complejo (en cuanto a cantidad, calidad e interacciones con el agua superficial) con las crecientes exigencias de los usuarios del agua y la tierra, quienes pueden representar una amenaza para la disponibilidad y calidad del recurso hídrico (Thuinof, 2002).⁸

Cabe resaltar que el agua superficial y el agua subterránea tienen algo en común. El agua superficial es aquella que tiene la capacidad de filtrarse formando parte del agua subterránea y el agua subterránea es aquella que tiene la capacidad de llegar a los manantiales y fuentes, para continuar con un recorrido superficial. Su fuente de aporte principal son los ríos, que son capaces de conformar las corrientes de las aguas subterráneas, los cuales tienen la facilidad de seguir transportando agua, aunque duren varios lapsos de tiempo sin presencia de lluvias.

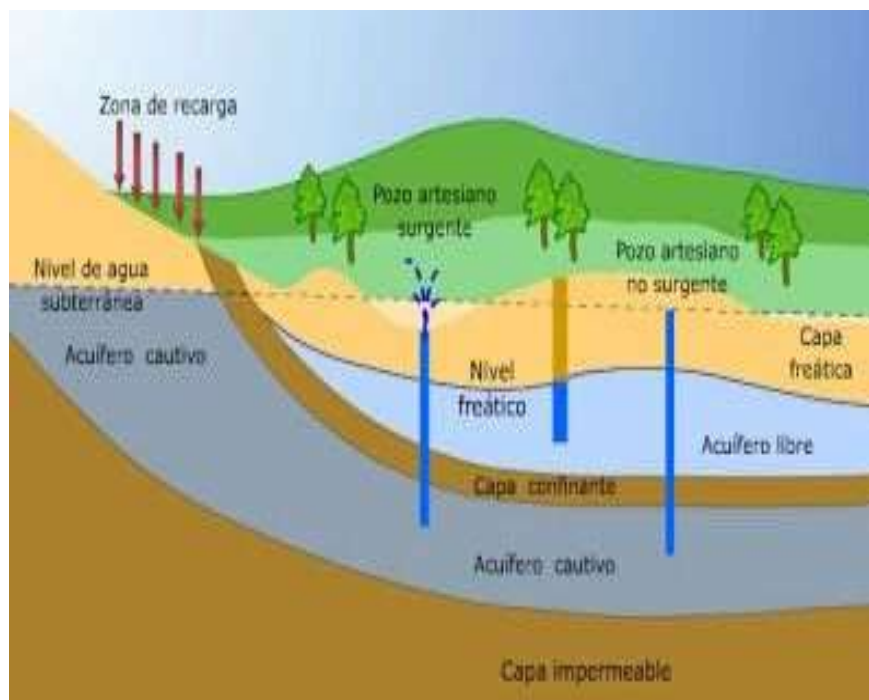
Tanto las aguas subterráneas como las superficiales tienen características de gran importancia, entre ellas:

- La velocidad de recorrido de las aguas superficiales es muy superior a la velocidad de recorrido de las aguas subterráneas.
- Las corrientes subterráneas se encargan de ocupar grandes espacios, mientras que las aguas superficiales se quedan concentradas más que todo en ríos.
- Las aguas superficiales poseen grandes variaciones de caudal, en cambio las aguas subterráneas son todo lo contrario, es decir qué; presentan variaciones muy pequeñas de caudal.

⁷ (Veléz Otalvaro, Ortiz Pimienta, & Quintero Vargas , 2011).

⁸ (Thuinof, 2002).

Imagen 2. Agua subterránea.



Fuente: (Valencia, s.f.).

El agua subterránea es el recurso que se encuentra de forma directa conectada con las aguas superficiales y la atmósfera. Debido a esto los rendimientos seguros en aguas subterráneas no dependen solo de las condiciones hidrogeológicas y geológicas, sino también de factores físicos-geográficos y antrópicos relacionados con cambios en los consumos de agua, que afectan a su vez las condiciones de recarga, la calidad del agua y los volúmenes de extracción (Unesco, 2004) ⁹. Por esta razón es de vital importancia saber cómo entra y sale el agua en los acuíferos, conocer la calidad de la misma, su circulación y qué cantidad de reserva del recurso se tiene. El agua subterránea se almacena y se mueve en los poros de las rocas, también llamadas formaciones geológicas. Esto indica que dichas formaciones geológicas propiamente dichas, tienen huecos, poros o vacíos. La relación entre el volumen de vacíos y el volumen total de un material está definida como la porosidad total y la porosidad eficaz (m_e) no es más que una porción pequeña de la porosidad total (m) que está afectada por la distribución del tamaño de los granos, por la presencia de arcilla y su estado de hidratación (Custodio & Llamas, 1996) ¹⁰. En el caso de materiales no consolidados, existen dos tipos de porosidad:

⁹ (Unesco, 2004).

¹⁰ (Custodio & Llamas, 1996).

- Porosidad primaria: son aquellas cuando hay existencia de huecos, partiduras y fracturas en las rocas.
- Porosidad secundaria: son aquellas que cuentan con vacíos generados por fisuras o huecos formados por separación de rocas.

La forma en como estos vacíos se encuentran determina la facilidad con que un fluido o líquido, puede moverse entre ellos. Este fenómeno se conoce como permeabilidad o conductividad hidráulica (K) en la literatura especializada. En todo el mundo el uso del agua subterránea es intensivo y se encuentra distribuida de la siguiente manera: el 50% es para consumo humano, el 20% para riego y el 40% para la industria (Unesco, 2004). A partir del conocimiento de la composición del agua, la identificación de las sustancias presentes en ella se define la posibilidad de utilizar el agua en casos concretos.

4.3. ACUÍFEROS ¹¹

Se denomina acuífero a toda formación geológica capaz de almacenar y transmitir el agua subterránea a través de ella, pudiendo extraer cantidades significativas mediante obras de captación como lo son los pozos.

Formaciones geológicas y su comportamiento frente al agua ¹²

En la naturaleza existe una gigantesca gama de formaciones geológicas, con la capacidad de transmitir y almacenar agua lluvia. Según estudios hidrogeológicos; estas formaciones pueden ser divididas en cuatro grupos, es decir; **acuífero**: aquellos que son capaces de almacenar y transmitir agua, **acuifugo**: esos que no contienen ni tampoco transmiten grandes cantidades de agua, **acuicludo**: los que los hidrólogos reconocen como un tipo de formación intermedia es decir, que son poco permeables (contienen agua pero debido a su permeabilidad no pueden transmitir suficiente agua para servir como fuente de alimentación, entre estas: las arcillas y las lutitas. Por último, los **acuitardos** que son aquellas formaciones consideradas como: limos y arenas limosas con baja capacidad de transmitir agua. A continuación, se hará mención de las características de estas formaciones geológicas:

- **Acuíferos**: Es la formación con capacidad de drenaje alta en las que se pueden perforar pozos con el fin de satisfacer las necesidades humanas de abastecimiento, agricultura, industria, ganadería, etc.

¹¹ Mateos Ruiz, R. M., & González Casasnovas, C. (Eds.). (2009). *Los caminos del agua en las Islas Baleares: acuíferos y manantiales*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España [u.a.].

¹² (Delgado Maldonado, 2012, pág. 149).

- **Acuitardos:** Son los que transmiten el agua con dificultad, a las cuales se les llama con frecuencia formaciones semipermeables (limos, arenas limosas, arenas arcillosas, etc.), su capacidad de drenaje es media a baja; no son de interés para la obtención de caudales servir para alguna necesidad hídrica, pero son aquellos que juegan un que pueden papel muy importante en la naturaleza ya que son elementos trasmisores de agua en recargas verticales mediante grandes superficies.
- **Acuicludos:** Son las formaciones que almacenan agua en grandes cantidades, pero no tienen la facilidad para transmitirla, es decir; se drenan con mucha dificultad; debido a que el agua se encuentra encerrada en los poros de la formación y no puede ser liberada (arcillas, arcillas plásticas, limos arcillosos, etc.).
- **Acuifugos:** Son las formaciones que no son capaces de almacenar ni transmitir agua; están representadas por las rocas compactas sin carstificar; se denominan como impermeables salvo que existan fracturas que puedan permitir flujos.

Tipos de acuíferos y su comportamiento

Dependiendo de su textura los acuíferos pueden se clasificados en:

- **Acuíferos porosos:** Son aquellos en los que el agua circula a través de sus poros o espacios existentes entre las capas del terreno; como ejemplo se puede hacer mención de las arenas, las areniscas, las llanuras aluviales y las cuencas terciarias. Algunos autores prefieren llamarlos también como **acuíferos detrilicos**.
- **Acuíferos kársticos:** Son aquellos con heterogeneidad organizada; sus huecos y su propio flujo se van jerarquizando y a su vez presenta una función transmisora que gobierna el flujo, así como también una función capacitiva que gobierna el almacenamiento.
- **Acuíferos fisurados:** Es cualquier formación geológica donde la circulación del agua se produce mediante fisuras o grietas consecuencia de una intensa fracturación.

Los acuíferos pueden ser clasificados según su estructura en:

- **Acuífero libre o freático:** Es cuando el agua satura los poros, fractura la formación y libera agua por drenaje (espontaneo o forzado por el hombre) produciendo una simple desaturación; se denomina **acuífero freático**. Y los acuíferos libres son aquellos que se encuentran en contacto directo con la

superficie del terreno y la superficie freática sometida a la presión atmosférica. Como, por ejemplo: las terrazas y llanuras aluviales.

- **Acuífero confinado o cautivo:** Se encuentran rodeados en el subsuelo de materiales impermeables tanto por arriba como por debajo. El peso de los materiales superiores supone una carga o presión sobre el agua (tensión intersticial) y sobre el esqueleto físico del acuífero (tensión intergranular).
- **Acuífero semi-confinado:** Es un sistema físico integrado por acuífero superior bien alimentado, un acuitardo y un acuífero inferior en condiciones de semiconfinamiento.

Imagen 3. Tipos de acuíferos.



Fuente: (Banco de imágenes del Departamento General de Irrigación, s.f.).

4.4. LEY DE DARCY ¹³

Esta ley fue establecida por el ingeniero francés Henry Darcy en el año 1856, la cual fue descubierta gracias a un estudio en forma experimental del flujo de agua a través de un medio poroso. Puntualmente; la ley física anteriormente mencionada es la ecuación fundamental para describir el movimiento del agua en el suelo. Darcy descubrió que la velocidad del agua que fluye en un medio poroso es directamente proporcional al gradiente hidráulico causado por el flujo.

¹³ (Ordoñez Galvéz, 2011).

$$Q = \frac{KA}{L} (h_2 - h_1)$$

Donde

Q = Descarga total.

K = Coeficiente de permeabilidad.

A = Área de la sección transversal.

L = Longitud de la columna de arena.

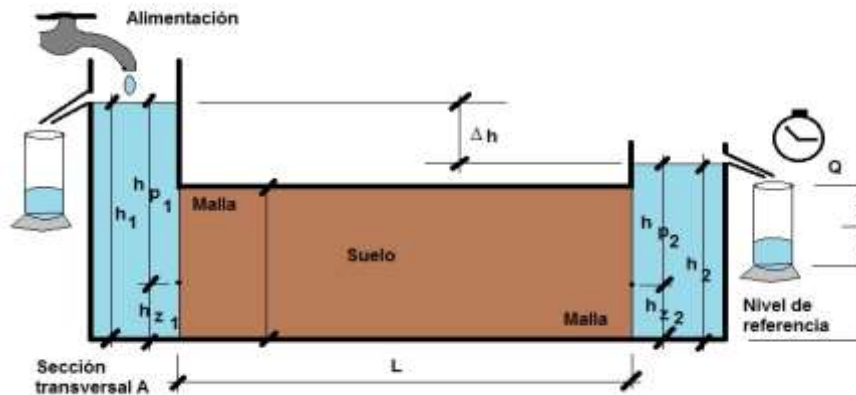
Esta ley es ampliamente utilizada en Ingeniería Civil y también en hidrogeología. La cual tiene la capacidad de determinar el flujo de agua que pasa a través de los acuíferos. Gracias a estudios posteriormente realizados se ha llegado a la conclusión de que la ley de Darcy es ampliamente utilizada y válida para la mayoría de los tipos de flujo en los suelos. También cabe resaltar que, para velocidades de flujo tanto crecientes como decrecientes, la ley de Darcy deja de ser válida por estas limitaciones a mencionar a continuación:

- La constante K depende tanto del medio poroso como del fluido que lo atraviesa.
- Cuando la constante K toma un valor muy bajo y las velocidades son muy elevadas, esto indica una relación no lineal entre el caudal y el gradiente hidráulico ¹⁴.

En todo tipo de suelo es de vital importancia determinar la conductividad hidráulica o coeficiente de permeabilidad K, debido a que esta es la única forma de darse cuenta de la capacidad que tiene un suelo de transmitir o transportar agua.

Imagen 4. Experimento de Henry Darcy

¹⁴ Ejemplo: si se hace el ensayo con un material arcilloso, el caudal a obtener será muy bajito; por lo tanto, se debe aplicar un gradiente bastante elevado a fin de que pueda circular el agua y así lograr obtener un caudal distinto a cero.



Fuente: (<http://geolabs.com.mx/blog/trabajo/propiedades-hidraulicas-del-suelo/>, s.f.).

4.5. CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA O PERMEABILIDAD K

Es aquella que tiene como función describir el movimiento del agua subterránea. En otras palabras, es la capacidad que tiene el agua de moverse a través de un medio poroso¹⁵. Donde la permeabilidad no es más que la encargada de cuantificar la capacidad de infiltración del suelo. La conductividad hidráulica es la propiedad utilizada para el estudio de los medios porosos, la cual depende de la porosidad del medio, la permeabilidad intrínseca y del grado de saturación que esta tenga. La diferencia que hay entre la conductividad hidráulica y la permeabilidad intrínseca es que la primera, depende tanto del medio como del fluido; mientras que la segunda es la capacidad que tiene un medio de transmitir un fluido y esta propiedad esta únicamente en función del medio por lo que es independiente de las propiedades del fluido.

4.5.1. Conductividad hidráulica en suelos parcialmente saturados ¹⁶

Esta conductividad hidráulica se presenta sobre el nivel freático; lo que quiere decir que, los poros se encuentran parcialmente llenos de agua; por lo tanto, su contenido de humedad es inferior a la porosidad y la presión del fluido es menor a la atmosférica. La ley de Darcy es válida en este caso siempre y cuando se tenga en cuenta que la conductividad hidráulica depende del contenido de humedad.

4.5.2. Conductividad hidráulica en suelos totalmente saturados

¹⁵ Vélez Otalvaro, María Victoria. Ortiz Pimiento Carolina. Vargas Quintero María Consuelo. *Las aguas subterráneas un enfoque práctico. Colección guías y manuales*. Ingeominas, instituto colombiano de geología y minería. República de Colombia.

¹⁶ (Barbecho Chuisaca & Calle Ortiz, 2012).

Esta conductividad hidráulica se da cuando la presión del agua de poros es positiva; es decir cuando el potencial del suelo es cero. Para este caso el movimiento del agua en el suelo es controlado por dos causas muy importantes, la primera; es la resistencia que tiene el suelo para fluir agua y la segunda; es la fuerza que actúa en cada unidad de agua presente en el suelo. Cabe resaltar que la ley de darcy es la ecuación que relaciona estos dos factores.

Tabla 1. Conductividad hidráulica

Clases	Rangos (Cm/hr)	m/día
Muy lenta	< 0.1	< 0.03
Lenta	0.1 – 0.5	0.03 – 0.12
Moderadamente lenta	0.5 – 2.0	0.12 – 0.5
Moderada	2.0 – 6.0	0.5 - 1.5
Moderadamente rápida	6.0 – 12.0	1.50 – 3.0
Rápida	12 – 18	3.00 – 4.50
Muy rápida	> 18	> 4.5

Fuente: (Rangos de conductividad hidráulica propuesta (service, E.U.A. Soil Conservation)., s.f.).

Tabla 2. Rangos de permeabilidad en Cm/seg.

PERMEABILIDAD RELATIVA	VALORES DE K (cm/seg)	SUELO TIPICO
Muy permeable	>1x10E-1	Grava gruesa.
Moderadamente permeable	1x10E-1 - 1x10E-3	Arena, arena fina.
poco permeable	1x10E-3 - 1x10E-5	arena limosa, arena sucia.
muy poco permeable	1x10E-5 - 1x10E-7	Limo y arenisca fina.
impermeable	<1x10E-7	Arcilla

Fuente: (Geología y Geotecnia, permeabilidad de suelos, 2006).

4.6. MEDICIÓN DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA POR MEDIO DEL TRAZADOR SAL COMÚN ¹⁷.

¹⁷ (Molerio León).

Es una técnica que permite obtener información sobre un sistema o parte de él. Su objetivo principal es mostrar el comportamiento que tiene dicho trazador en el sistema o medio aplicado. La sal es un tipo de trazador que se ha venido utilizando hace mucho tiempo; con el fin de rastrear las aguas subterráneas. Generalmente los trazadores como la sal son bastante solubles en agua y una de sus ventajas es detectar de forma directa o indirecta la conductividad o empleo de electrodos de selección de iones. Llevar a cabo un experimento con este trazador resulta muy económico y se pueden obtener resultados de conductividad con pocas cantidades, generalmente (2000 μ s/cm), lo cual equivale a un gramo por litro. La forma más práctica y precisa de conocer los datos bien sea hidráulicos o de transporte de masa en un cauce natural o simulación de cauces es mediante trazadores. De los cuales existen dos métodos: cualitativos y cuantitativos. Los cualitativos son aquellos que se limitan a demostrar la interacción hidráulica entre dos o más puntos, es decir, se hace la respectiva inclusión del trazador en el medio de interés en estudio y se observa en el destino a ver si pasó completamente dicho trazador. Los cuantitativos que son aquellos que analizan las nubes de paso del trazador y permiten determinar cuándo, durante cuánto tiempo y con qué concentración pasó en cada momento.

En la vida cotidiana uno de los trazadores o electrolitos más utilizados es la sal común (cloruro de sodio NaCl), por su capacidad de disociarse en iones con una pequeña carga eléctrica (el catión sodio Na^+ y el anión cloruro Cl^-). Este tipo de ion, es considerado como buen conductor al igual que los ácidos, las bases, y sales inorgánicas como HCl, NaOH, entre otras. Este método de trazado tiene como propósito fundamental reflejar la capacidad que tiene el agua para conducir corriente eléctrica, por lo tanto; se puede decir que está relacionada de forma directa con la concentración de sales disueltas en el agua, lo que hace indicar que la conductividad eléctrica se encuentra relacionada con los sólidos disueltos totales. (Técnica de trazadores, s.f.)¹⁸. En la mayoría de las aguas, entre mayor sea la cantidad de sales disueltas mayor será su conductividad.¹⁹

5. MARCO NORMATIVO²⁰

En este espacio se hará referencia a las disposiciones nacionales de protección y aprovechamiento de un recurso tan importante como lo son las aguas subterráneas. El decreto 2811 de 1974 estableció un Código Nacional de Recursos Naturales Renovables (CNRN) y de Protección al Medio Ambiente, el cual contempla párrafos donde se hace referencia al recurso hídrico subterráneo. A continuación, se hará mención de ellos.

¹⁸ (Técnica de trazadores, s.f.).

¹⁹ (Gómez Isidro, 2014, pág. 101).

²⁰ (Parquearvi, 2014).

ARTICULO 149: Para los efectos de este título, se entiende por aguas subterráneas las subálveas y las ocultas debajo de la superficie del suelo o del fondo marino que brotan en forma natural, como las fuentes y manantiales captadas en el sitio de afloramiento, o las que requieren para su alumbramiento obras como pozos, galerías filtrantes u otras similares.

ARTICULO 150: Se organizará la protección y aprovechamiento de aguas subterráneas.

ARTICULO 151: El dueño, poseedor o tenedor tendrá derecho preferente en el aprovechamiento de las aguas subterráneas existentes en su predio, de acuerdo con sus necesidades. Se podrá otorgar concesión de aprovechamiento de aguas subterráneas en terreno distinto al del peticionario, para los usos domésticos y de abrevadero, previa la constitución de servidumbres, cuando se demuestre que no existen en el suyo en profundidad razonable y cuando su alumbramiento no contraviene alguna de las condiciones establecidas con este título. La concesión se otorgará sin perjuicio del derecho preferente del dueño, tenedor o poseedor del terreno en donde se encuentran las aguas, que podrá oponerse a la solicitud en cuanto lesione ese derecho, siempre que esté haciendo uso actual de las aguas o se obligue a hacerlo en un término que se le fijará según el tipo y la naturaleza de las obras necesarias y en cuanto el caudal subterráneo no exceda las necesidades de agua del predio.

ARTICULO 152: Cuando se compruebe que las aguas del subsuelo de una cuenca o de una zona se encuentran en peligro de agotamiento o de contaminación, o en merma progresiva y sustancial en cantidad o calidad, se suspenderá definitiva o temporalmente el otorgamiento de nuevas concesiones en la cuenca o zona; se podrá decretar la caducidad de las ya otorgadas o limitarse el uso, o ejecutarse, por cuenta de los usuarios, obras y trabajos necesarios siempre que medie el consentimiento de dichos usuarios, y si esto no fuere posible, mediante la ejecución de la obra por el sistema de valorización.

ARTICULO 153: Las concesiones de aprovechamiento de aguas subterráneas podrán ser revisados o modificadas o declararse su caducidad, cuando haya agotamiento de tales aguas o las circunstancias hidrogeológicas que se tuvieron en cuenta para otorgarlas hayan cambiado sustancialmente.

ARTICULO 154: El titular de concesión de aguas subterráneas está obligado a extraerlas de modo que no se produzcan sobrantes. Colombia pionera en el desarrollo normativo latinoamericano, con la expedición del Código Nacional de Recursos Renovables y de Protección al Medio Ambiente, el cual se constituyó en la primera compilación de carácter ambiental en América Latina.

6. METODOLOGIA

INTENCIÓN DEL ESTUDIO

A través de un modelo físico construido por los estudiantes de semillero de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga, se desarrollaron pruebas a escala de laboratorio con un trazador (sal), por su facilidad de manejo, medición y disposición. A fin de buscar estrategias de enseñanza-aprendizaje para los estudiantes. Quien tenga la oportunidad de utilizar este modelo, tendrá la capacidad de entender con facilidad los fenómenos de movilidad del agua y los preconceptos de la hidrogeología. También con esta estrategia, los estudiantes podrán fortalecer competencias tanto instrumentales como interpersonales que tengan relación con la distribución del agua en un suelo granular.

LUGAR DE ESTUDIO

Este proyecto de grado fue desarrollado en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga.

FASES DEL ESTUDIO

Inicialmente se realizó una evaluación del estado y condición de operatividad del modelo con el fin de establecer las condiciones en las que se encontraba, buscando así la manera de dejar funcional dicho elemento para proceder con las actividades de interés. Para el funcionamiento del modelo se establecieron condiciones apropiadas de flujo continuo y regulado para diferentes opciones posibles de experimentación; teniendo en cuenta esto se hizo la respectiva instalación y acondicionamiento de elementos de suministro, medición y circulación de agua; con los cuales se buscaba llegar a las condiciones exigidas por el modelo.

Para el desarrollo de este proyecto, se realizaron unos análisis previos de distintos tipos de suelo; a fin de escoger el más adecuado para cumplir con los objetivos de este estudio. Según los resultados obtenidos se escogió un suelo granular como material de prueba por su facilidad de transportar el agua. Y se idealizó la respectiva ubicación de cinco puntos (piezómetros) a distintas profundidades, esto con el fin de tomar los datos de salinidad en dichos puntos; por medio de un conductímetro (multímetro PL-700AL), más adelante se hará mención del mismo, indicando para que sirve y cuáles son sus capacidades. Finalmente se plantearon algunas recomendaciones de uso y operatividad del modelo para dejar una guía de manejo con los resultados más relevantes del mismo, a fin de dar a conocer a los estudiantes interesados en investigación cuál es el uso que se le puede dar a este, motivándolos a que sigan utilizando el modelo para otros proyectos que sirvan como herramienta académica para las próximas generaciones.

A continuación, se presentan las especificaciones del modelo de prueba fuente de aporte principal durante todo el estudio.

Imagen 5: Modelo utilizado para simular el flujo de aguas subterráneas.



Especificaciones del modelo

Este prototipo (tanque) fue diseñado por los estudiantes del semillero de la facultad de Ingeniería Civil, de la Universidad Pontificia Bolivariana; con la finalidad de permitir en el alumno la comprensión de la movilidad del agua y la contaminación de los suelos, en un flujo dado en dos dimensiones.

Para llevar a cabo su construcción hicieron uso de materiales como: vidrio con grosor de 1 pulgada, ya que este material permite la visibilidad y el fácil mantenimiento, también se hizo el respectivo uso de macro goteros (para fines de controlar el flujo de agua) de forma lenta en el laboratorio y una malla en la parte interna del mismo (para evitar el paso de material o en su defecto el paso de partículas de suelo granular a los compartimientos que son solo para presencia de agua limpia).

Este prototipo posee las siguientes dimensiones: Ancho (70 cm), alto (70 cm) y profundo (10 cm). Y en la parte inferior del mismo, se diseñó un “carro” para poder transportarlo; a fin de facilitar la interacción con los interesados y poder verificar en el movimiento en ambas caras frontales.

Para cumplir con las expectativas de este proyecto de grado, inicialmente se hicieron las respectivas instalaciones de los elementos de suministro, circulación, medición de agua y puntos de toma.

Registro fotográfico: En el laboratorio de hidráulica (Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga).

Fotografía 1. Instalación y acondicionamiento de elementos de suministro, circulación, medición de agua y puntos de toma.



Inicio del llenado del modelo con suelo Granular.



modelo acondicionado para dar inicio a ensayos.

Fuente: Autor

En la parte inferior de los tubos, los cuales hacen el papel de piezómetros para el respectivo estudio, se encuentra cubierta con tela de organza; a fin de evitar la entrada de partículas de suelo.

Fotografía 2. Piezómetros.



Piezómetros sin tela de organza.



Piezómetros con tela de organza.

Fuente: Autor.

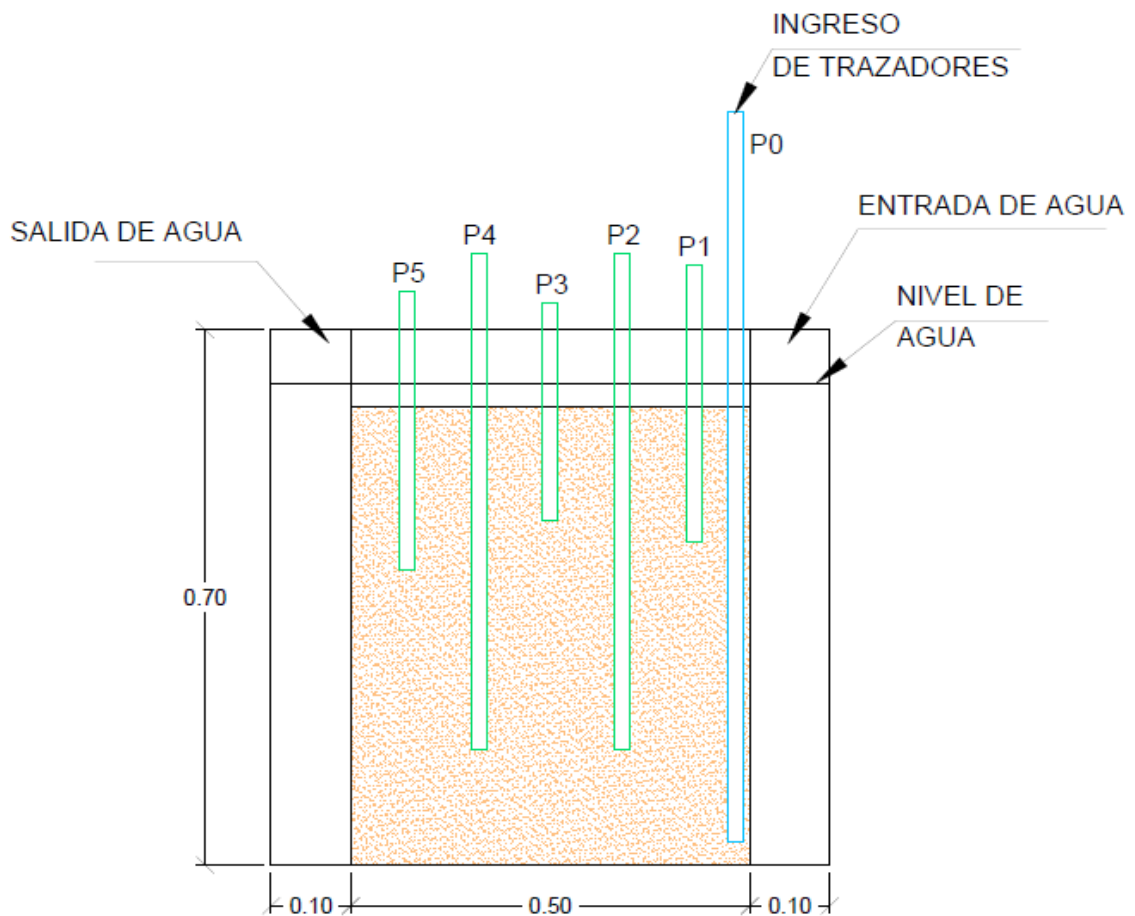
La tabla a continuación (tabla 3), indica las dimensiones que poseen cada uno de los piezómetros ubicados al interior del modelo de prueba.

Tabla 3. Dimensiones de piezómetros.

Cantidad de piezómetros	Medida interna (cm)	Medida externa (cm)	Medida total (cm)
P0	70	25,5	95,5
P1	26,3	10,0	36,3
P2	45,0	16,0	61,0
P3	22,5	6,0	28,5
P4	45,0	16,0	61,0
P5	28,4	8,0	36,4

Fuente: Autor.

Imagen 6. Dimensiones del modelo y distribución de piezómetros.



Fuente: Autor.

Selección del material

Para llevar a cabo este proyecto; se inició con un estudio de los distintos tipos de suelo (suelo arcilloso, suelo granular, suelo limoso) que se pueden utilizar para llevar a cabo el desarrollo de pruebas a escala de laboratorio, donde después de obtener los resultados, se llegó a la conclusión de utilizar únicamente suelo granular por sus características y por su facilidad de transportar el agua.

Características del material

Según estudios, la arena es un material que se obtiene de la descomposición de las rocas y su tamaño es inferior a los 5mm. Este material está compuesto por sílice, molécula que es insoluble en agua y que se puede encontrar fácilmente en la naturaleza en forma de cuarzo. Este tipo de suelo es denominado suelo granular y el 35% del material fino o menos de este porcentaje pasa por el tamiz 200; por lo que estos suelos son participes de los grupos A-1, A-2, A-3. Los suelos tipo A-1, son aquellas mezclas de suelos bien graduados conformado por piedras, arenas, gravas y materiales poco plásticos. Los suelos tipo A-2, son aquellos que no están clasificados en el rango A-1 y A-3, A-2-4, A-2-5, A-2-6, A-2-7 y finalmente los suelos tipo A-3 son arenas finas sin características plásticas, sin finos limosos o arcillosos y en este tipo de suelo predominan las arenas finas con cantidades pequeñas de arena gruesa o bien graduada.

6.1. EQUIPOS PARA MEDIR SALINIDAD

6.1.1. INIRIDA DEEP FLOW 1.0 ²¹

Inírida Deep Flow es un equipo creado por la empresa llamada Amazonas technologies; la cual se encarga de desarrollar tecnología ambiental y ofrece productos y servicios de consultoría. Amazonas Technologies está desarrollando su estrategia de expansión a través de alianzas estratégicas con entidades nacionales e internacionales que puedan avalar la calidad y beneficios de los sistemas de medición desarrollados, e implementarlos en proyectos de impacto ambiental. Esta empresa actualmente tiene representación comercial en Colombia, Estados Unidos y varios países de Latinoamérica.

En este sentido las entidades públicas y mixtas de control y análisis ambiental, las universidades, así como también la sociedad civil organizada son un potencial aliado de negocios para Amazonas Technologies, que puede integrarse en proyectos con sus soluciones de software y hardware, pero también como consultor en un área donde la tecnología permite tomar decisiones más rápidas basadas en

²¹ (Amazonas technologies, s.f.).

información confiable y segura para el medio ambiente y las poblaciones. Amazonas Technologies es una empresa líder del Parque Tecnológico de Software de Cali - **PARQUESOFT**, el clúster de informática más importante de Colombia. Sus productos son certificados y en su realización intervienen los especialistas de calidad de esta organización.

Inírida Deep Flow es un sistema de análisis ambiental integrado a un dispositivo de hardware portátil (PDA), que permite realizar análisis de cauces y modelar parámetros físicos, hidráulicos y de transporte en tiempo real. Este sistema es la forma moderna de hacer estudios de trazadores descubriendo las condiciones actuales del agua en un punto geográfico determinado. Este método moderno es la solución ideal para medición y modelamiento de cauces, dando información oportuna, detallada, precisa y en tiempo real; sobre parámetros tanto físicos como hidráulicos y de transporte (Amazonas technologies, s.f.). Inírida Deep Flow, utiliza como método "riada de trazador" (dye tracer) mediante vertimiento súbito (slug technique); el cual se caracteriza por su precisión como se encuentra descrito en libros y artículos. Este método consiste básicamente en el vertimiento súbito de una determinada masa de trazador que es mezclada en un tramo del cauce, para luego ser medida por medio de un sensor apropiado. El sistema Inírida Deep Flow utiliza una interfaz que transforma datos básicos de conductividad y temperatura en información de alto nivel. Para generar esta información, se realiza una inyección rápida de trazador "aguas arriba" del punto donde se ubica el sensor, el cual muestrea apropiadamente las señales unidimensionales de las curvas de trazador. El trazador normalmente utilizado es la sal común (Cloruro de sodio) aunque el circuito de interfaz soporta también sensores de fluorescencia, en especial los que vienen calibrados para Rodamina WT. El sistema Inírida Deep Flow es útil en todas aquellas actividades de Medida, Estudio y Modelamiento o Monitoreo de aguas superficiales o aguas subterráneas, en las que las técnicas de trazadores ya han sido probadas como las más prácticas, las más precisas o las de menor costo relativo. Dada la transparencia del sistema al tipo de sensor, las mediciones de trazador pueden ser hechas sobre conductividad o sobre fluorescencia, según convenga. Este método contiene funciones variadas que permiten obtener una valiosa información sobre el cauce; es decir, que tiene la capacidad de analizar detalladamente la forma de las curvas.²².

²² Este equipo no requiere calibración por ser un programa basado en formulas físicas y puede ser utilizado directamente en cualquier tipo de cauce, aunque no se conozca información de entrada sobre ellos.

Fotografía 3. Equipo Inírida Deep Flow (medición de trazadores en tiempo real).



Fuente: amazonastech.

6.1.2. MULTIPARAMETRO DE MESA COMBINADO CON AGITADOR MAG PL-700AL MARCA EZODO

Este equipo tiene la capacidad de medir parámetros como: pH / ORP / CONDUCTIVIDAD / TDS / SALINIDAD / DO /TEMPERATURA. Lo que se busca con este multiparametro es facilitar el trabajo en los laboratorios en distintos procesos simultáneos y/o mediciones. Sus resultados suelen ser muy precisos y confiables. Para poder hacer uno de este equipo requiere de una calibración con un patrón y/o solución; antes del respectivo análisis (CesarUPB ventas On-line, s.f.)²³.

Este aparato rápido y eficiente, necesita de un patrón de conductividad, el cual es utilizado para calibrar la sonda encargada de medir los parámetros anteriormente mencionados. Si no se realiza la respectiva calibración de la sonda, probablemente se obtendrán datos inconsistentes al momento de realizar los estudios de interés. Por esta razón, es de gran importancia que antes de realizar cualquier toma de datos, lo primero que debe hacerse es calibrar la sonda a utilizar y después de realizado este paso si se puede continuar con el análisis respectivo.

²³ <http://cesarupb.mercadoshops.com.co/multiparametro-de-mesa-combinado-con-agitador-mag-pl700pc--96709144xJM>.

Fotografía 4. Patrón de conductividad.



Fuente. Autor.

Fotografía 5. Calibración de sonda para medir salinidad.



Fuente. Autor.

7. RESULTADOS Y ANALISIS

CONDICIONES HIDRÁULICAS NECESARIAS PARA DETERMINAR EL TRANSPORTE DE AGUAS SUBTERRANEÁS EN EL MODELO DE PRUEBA EXISTENTE.

En la fotografía a continuación, se puede observar cómo quedó finalmente el montaje del modelo acondicionado para la simulación del transporte de aguas subterráneas.

Fotografía 1: Instalación y acondicionamiento de elementos de suministro, circulación, medición de agua y puntos de toma.



Fuente: Autor.

Para la instalación y acondicionamiento del modelo de prueba se colocaron los macrogoteros a fin de controlar el flujo de agua que ingresa al sistema con un caudal constante, así como también la ubicación del tanque para agregar la solución salina y la respectiva ubicación de los piezómetros para tomar los datos de salinidad. Luego de esto, el sistema quedó funcional para la realización de los ensayos de interés y no se tuvo inconveniente alguno, por lo tanto, se lograron cumplir con las expectativas del proyecto ya que quedó un montaje muy bien realizado.

GRANULOMETRÍA

Ensayos realizados al suelo granular (Arena de río; pescadero) utilizado con el fin de caracterizarlo:

- Granulometría.
- Permeabilidad.
- Peso específico y absorción.

DATOS OBTENIDOS EN EL LABORATORIO

DEGRADACIÓN DE TAMICES (ARENA DE RIO, PESCADERO): #4, #8, #16, #30, #50, #100, #200, Fondo.

La tabla 4, posee en su respectivo orden la degradación de tamices utilizada para llevar a cabo el ensayo de la granulometría. Paso esencial para conocer las características del suelo utilizado durante todo el estudio, para poder cumplir con los objetivos del proyecto.

Tabla 4. Degradación de tamices y porcentaje retenido.

Tamiz	Retenido (gramos)
#4	0,8
#8	13,8
#16	201,2
#30	281,4
#50	347,2
#100	97,6
#200	40,8
FONDO	16,0
TOTAL RETENIDO	998,8

Fuente: Autor.

% de error: $(V_i - V_f / V_i) * (100)$ ➡ $(1000 - 998,8 / 1000) (100) = 0,12\%$

CALCULOS REALIZADOS SEGÚN DATOS OBTENIDOS

PESO INICIAL DE LA MUESTRA (ARENA-RIO): 1000 gramos.

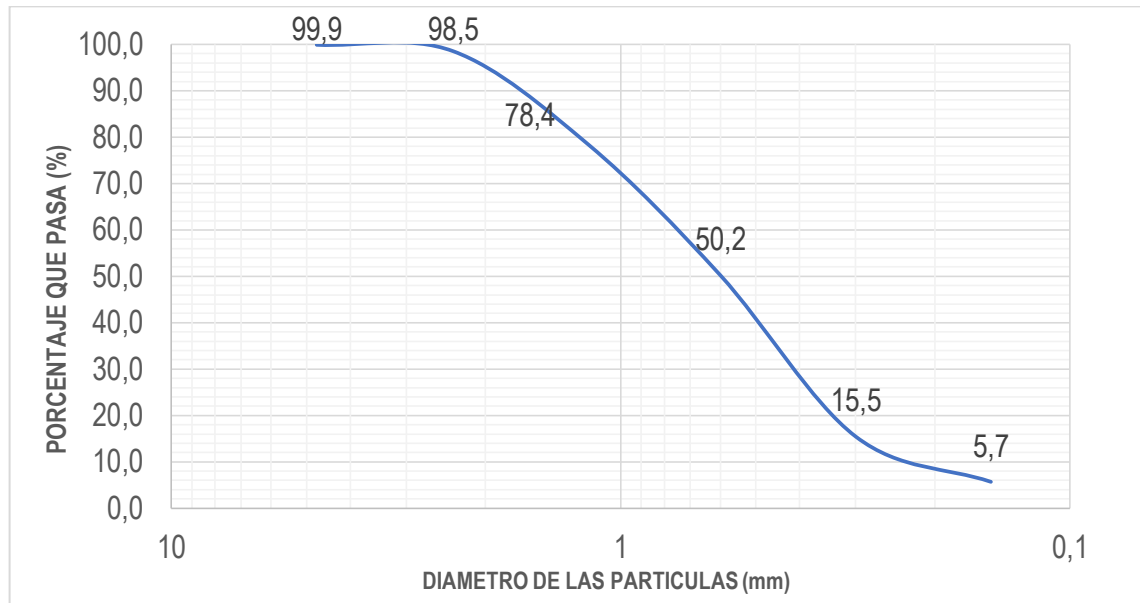
La tabla 5, muestra de forma completa los resultados obtenidos en el cálculo granulométrico, datos de suprema importancia para llevar a cabo la curva granulométrica ubicada en la parte inferior.

Tabla 5. Calculo granulométrico.

Núm. Tamiz	Diámetro (mm)	Peso retenido (gramos)	% Retenido	% Retenido acumulado	% Que pasa
4	4,75	0,8	0,1	0,1	99,9
8	2,36	13,8	1,4	1,5	98,5
16	1,18	201,2	20,1	21,6	78,4
30	0,6	281,4	28,2	49,8	50,2
50	0,3	347,2	34,8	84,5	15,5
100	0,15	97,6	9,8	94,3	5,7
200	0,075	40,8	4,1	98,4	1,6
FONDO		16	1,6	100,0	
MASA TOTAL		998,8	100,0		

Fuente: Autor.

Grafica 1. Curva granulométrica.



Fuente: Autor.

Cu =	3,0	mm
Cz =	0,9	mm

D10 =	0,25	mm
D30 =	0,42	mm
D60 =	0,75	mm

Cu: coeficiente de uniformidad.

$$Cu = \frac{D60}{D10}$$

Cz: coeficiente de curvatura.

$$Cz = \frac{D30^2}{(D10)(D60)}$$

MODULO DE FINURA

MF = 2,52

En la tabla a continuación (tabla 6), se encuentra claramente clasificado el agregado fino según los rangos de módulo de finura obtenido de la curva granulométrica.

Tabla 6. Clasificación del agregado fino de acuerdo con el valor del módulo de finura.

MODULO DE FINURA	AGREGADO FINO
Menor que 2,00	Muy fino o extra fino.
2,00 - 2,30	Fino.
2,30 - 2,60	Ligeramente fino.
2,60 - 2,90	Mediano.
2,90 - 3,20	Ligeramente grueso.
3,20 - 3,50	Grueso.
Mayor que 3,50	Muy grueso o extra grueso.

Fuente: (Unicauca.edu.co, s.f.)

- % pasa por el tamiz #200 (0,08 mm) = % finos = 1,6.
- % pasa por el tamiz #4 (5mm) = 99,9 -----> Grava = 100-99,9 = 0,1.
Arena = 100-1,6-0,1 = 98,3.

El suelo es una arena.

- % finos < 5% -----> Suelo limpio.
- Cu = 3 y Cz = 0,9 ----> Lo que indica una arena mal graduada (SP).

Según los resultados obtenidos de granulometría, como menos del 50% del suelo pasa por el tamiz #200 (0,075 mm) y más del 50% del suelo pasa por el tamiz #4 (5 mm), esto indica que el suelo obtenido es una arena. Y con el resultado de los

coeficientes de uniformidad y curvatura se puede decir que el suelo obtenido es una: arena mal graduada (SP).

PESO ESPECIFICO (ARENA-RIO)

DATOS OBTENIDOS EN EL LABORATORIO

(S) = Peso muestra inicial: 500 gramos.

(B) = Peso del picnómetro + agua: 690.4 gramos.

(C) = Peso del picnómetro + muestra + agua: 999.6 gramos.

(A) = Peso de la muestra seca al horno: 496.0 gramos.

Existen dos tipos de procedimiento para llevar a cabo el ensayo de peso específico y absorción: Gravimétrico y volumétrico.

En este caso el procedimiento aplicado fue el: Gravimétrico.

FORMULAS APLICADAS SEGÚN DATOS OBTENIDOS

DENSIDAD RELATIVA

Densidad relativa seca al horno (SH)

$$\frac{A}{(B+S-C)} = \frac{496.0}{690.4 + 500 - 999.6} = 2.60$$

Densidad relativa en condición saturada superficialmente seca (SSS)

$$\frac{S}{B+S-C} = \frac{500}{690.4 + 500 - 999.6} = 2.62$$

Densidad relativa aparente

$$\frac{A}{B+A-C} = \frac{496.0}{690.4 + 496.0 - 999.6} = 2.66$$

DENSIDAD

Densidad en condición seca al horno (SH)

$$Densidad_{(SH)}, \text{ kg/m}^3 = \frac{997.5 * A}{(B + S - C)} = \frac{997.5 (496.0)}{(690.4 + 500 - 999.6)} = 2593.08 \text{ kg/m}^3$$

Densidad en condición saturada y superficialmente seca SSS, kg/m3

$$Densidad_{(SSS)}, \text{ kg/m}^3 = \frac{997.5 S}{B + S - C} = \frac{997.5 (500)}{690.4 + 500 - 999.6} = 2613.99 \text{ kg/m}^3$$

Densidad aparente

$$Densidad \text{ aparente}, \text{ kg/m}^3 = \frac{997.5}{(B+A - C)} = \frac{997.5 (496.0)}{(690.4 + 496.0 - 999.6)} = 2648.61 \text{ kg/m}^3$$

ABSORCION

$$Absorción, \% = \frac{S-A}{A} * 100 = \frac{500 - 496.0}{496.0} * 100 = 0.81$$

Según los datos arrojados por el ensayo de peso específico se puede decir que entre menos denso sea el material mayor será su capacidad para absorber agua y viceversa. Por eso es de vital importancia conocer el % de absorción en los agregados ya que es a través de este dato es que se puede determinar la cantidad de agua que es capaz de contener el agregado en su interior.

Registro fotográfico.

Fotografía 6: Proceso del ensayo de peso específico de la arena.



Muestra en agua por 24 horas.
Fuente: Autor.



Peso del picnómetro + agua.
Fuente: Autor.



Eliminación de vacíos.
Fuente: Autor.



Peso del picnómetro + agua + muestra
Fuente: Autor.

PERMEABILIDAD

DATOS OBTENIDOS EN EL LABORATORIO

Peso cámara sola: 1616.1 gramos.
Peso cámara + suelo: 274.8 gramos.

Diámetro interior: 76.13 mm → 7.613 cm

Fueron tomados cuatro diámetros y se obtuvo un promedio

$$\frac{76.25 + 76.26 + 76.13 + 75.89}{4} = 76.13 \text{ mm} \rightarrow 7.613 \text{ cm}$$

h₁: 153.09 mm → 15.309 cm

Fueron tomadas cuatro alturas y se obtuvo un promedio

$$\frac{153.10 + 153.14 + 153.08 + 153.05}{4} = 153.09 \text{ mm} \rightarrow 15.309 \text{ cm}$$

Humedad:

P1: peso de masa húmeda: 78.5 gramos.

P2: peso masa seca: 66.3 gramos.

P3: peso capsula sola: 7.2 gramos.

Q: cantidad de agua que pasa por probeta: 345 cm³.

Fueron tomados cuatro caudales y se obtuvo un promedio

$$\frac{357 + 352 + 340 + 330}{4} = 345 \text{ ml} \rightarrow 345 \text{ cm}^3$$

Tiempo (segundos): 120.

Temperatura: 24.5 °C.

Lectura manómetro 1: 92.75 cm.

Fueron tomadas cuatro lecturas y se obtuvo un promedio

$$\frac{92.0 + 92.5 + 93.0 + 93.5}{4} = 92.75 \text{ cm}$$

Lectura manómetro 2: 49.15 cm.

Fueron tomadas cuatro lecturas y se obtuvo un promedio

$$\frac{46.0 + 48.4 + 49.7 + 52.5}{4} = 49.15 \text{ cm}$$

Distancia: 7.5 cm.

h₁: 153.09 mm ➡ 15.309cm

h₂: 22.46 mm ➡ 2.246 cm

Altura de la muestra (h): h₁ – h₂ ➡ h = 13.063 cm

FORMULAS APLICADAS SEGÚN DATOS OBTENIDOS

Área transversal de la muestra:

$$\frac{\pi * D^2}{4} = \frac{\pi (7.613)^2}{4} = 45.52 \text{ cm}^2$$

Coeficiente de permeabilidad K:

$$K = \frac{Q * L}{A * t * h} = \frac{345 \text{ cm}^3 * 7.5 \text{ cm}}{45.52 \text{ cm}^2 * 120 \text{ seg} * 13.063 \text{ cm}} = 0,0363 \frac{\text{cm}}{\text{seg}} \longrightarrow 130.54 \frac{\text{cm}}{\text{hr}}$$

Este valor indica una conductividad hidráulica **MUY RAPIDA** y **ARENA MODERADAMENTE PERMEABLE**. Según los datos descritos en las tablas 1 y 2 respectivamente.

La siguiente tabla (tabla 7), muestra los valores obtenidos después de realizar los respectivos cálculos según el reporte de datos del ensayo de conductividad hidráulica o permeabilidad K.

Tabla 7. Datos obtenidos del ensayo de conductividad hidráulica.

Descripción	Unidad	Valor
Q volumen de agua	Cm ³	345
L longitud de la muestra	Cm	7.5
A área transversal de la muestra	Cm ²	45.52
h altura de carga hidráulica	Cm	13.063
t tiempo de duración de la prueba	Seg	120
K coeficiente de permeabilidad	Cm/hr	130.54
T temperatura del suelo	° C	24.5 ° C
PERMEABILIDAD	-----	MUY RAPIDA
TIPO DE SUELO	-----	ARENA

Fuente: Autor.

Registro fotográfico

Fotografía 7. Proceso del ensayo de permeabilidad de la arena.



Inclusión de la muestra al permeámetro.

Fuente: Autor.



Compactación de arena; 35 golpes por capa.
Fuente: Autor.



Equipo adecuadamente instalado para dar inicio
a ensayo.
Fuente: Autor.



Instalación de bomba de vacíos.
Fuente: Autor.

**CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA O PERMEABILIDAD K
(APLICANDO LA FORMULA LEY DE DARCY)**

$$Q = \frac{KA}{L} (h_2 - h_1)$$

Registro de datos

En la siguiente tabla (tabla 8), se encuentran registradas las alturas tomadas en el modelo de prueba, para hacer la adecuada aplicación de la ley de Darcy.

Tabla 8. Registro de datos de altura para aplicar la ley de Darcy.

h_1 (m)	h_2 (m)
0.581	0.641
0.605	0.664
0.652	0.672

Promedio $h_1 = 0.613$ metros.

Promedio $h_2 = 0.659$ metros.

Tiempos tomados

Por medio de un aforo se tomaron tres tiempos para cada altura tomada y de estos se obtuvo un promedio, para mayor exactitud.

Para llevar a cabo el aforo, se tomó como punto de referencia 1 litro de agua, que equivale a 0.001 m^3 según conversión.

Datos necesarios para aplicación de fórmula

A = área transversal = $0.7 * 0.7 = 0.49 \text{ m}^2$.

L = Longitud de la columna de arena = 0.5 m .

h_1

2 ° 58' 13''
2 ° 52' 09''
2 ° 48' 63''

Promedio: 2 ° 53' 08'' > 174 segundos.

$$Q = \frac{v}{t} = \frac{0,001 \text{ m}^3}{174 \text{ seg}} = 5,75 * 10^{-6} \frac{\text{m}^3}{\text{seg}}$$

h_2

2 ° 36' 37''
2 ° 34' 25''
2 ° 33' 75''

Promedio: 2 ° 36' 67'' > 157 segundos.

$$Q = \frac{v}{t} = \frac{0,001 \text{ m}^3}{157 \text{ seg}} = 6,37 * 10^{-6} \frac{\text{m}^3}{\text{seg}}$$

h_3

1 ° 34' 03''
1 ° 34' 06''
1 ° 34' 66''

Promedio: 1 ° 34' 25'' > 94 segundos.

$$Q = \frac{v}{t} = \frac{0,001 \text{ m}^3}{94 \text{ seg}} = 1,06 * 10^{-5} \frac{\text{m}^3}{\text{seg}}$$

Reemplazo de datos en fórmula de Darcy.

K₁.

$$5,75 * 10^{-6} \frac{m^3}{seg} = \frac{K (0.49)}{0.5} (0.641 - 0.581)$$

$$K = 9.779 * 10^{-5} \frac{m}{seg} \text{ -----> } K = 35.204 \frac{cm}{hr}$$

K₂.

$$6,37 * 10^{-6} \frac{m^3}{seg} = \frac{K (0.49)}{0.5} (0.664 - 0.605)$$

$$K = 1.102 * 10^{-4} \frac{m}{seg} \text{ -----> } K = 39.661 \frac{cm}{hr}$$

K₃.

$$1,06 * 10^{-5} \frac{m^3}{seg} = \frac{K (0.49)}{0.5} (0.672 - 0.652)$$

$$K = 5.408 * 10^{-4} \frac{m}{seg} \text{ -----> } K = 194.694 \frac{cm}{hr}$$

Promedio = $89.853 \frac{cm}{hr}$ -----> Este valor indica una conductividad hidráulica **MUY RAPIDA** y **ARENA MODERADAMENTE PERMEABLE**. Según los datos descritos en las tablas 1 y 2 respectivamente.

PRUEBA CON TRAZADOR (SAL)

Se realizó el procedimiento piezómetro a piezómetro, utilizando para el respectivo análisis un conductímetro de la marca Gondo Ezodo, con referencia PL-700AL. A fin de evaluar cómo se presenta la dispersión de salinidad en el modelo en dos dimensiones de aguas subterráneas.

Fotografía 8: Cantidad de sal suministrada al sistema para transporte de aguas subterráneas ²⁴ .



Fuente: Autor.

DATOS OBTENIDOS

En la tabla 9, se encuentra el reporte de datos tanto de tiempo como de salinidad, según el múltiparametro PL700AL para el piezómetro 1.

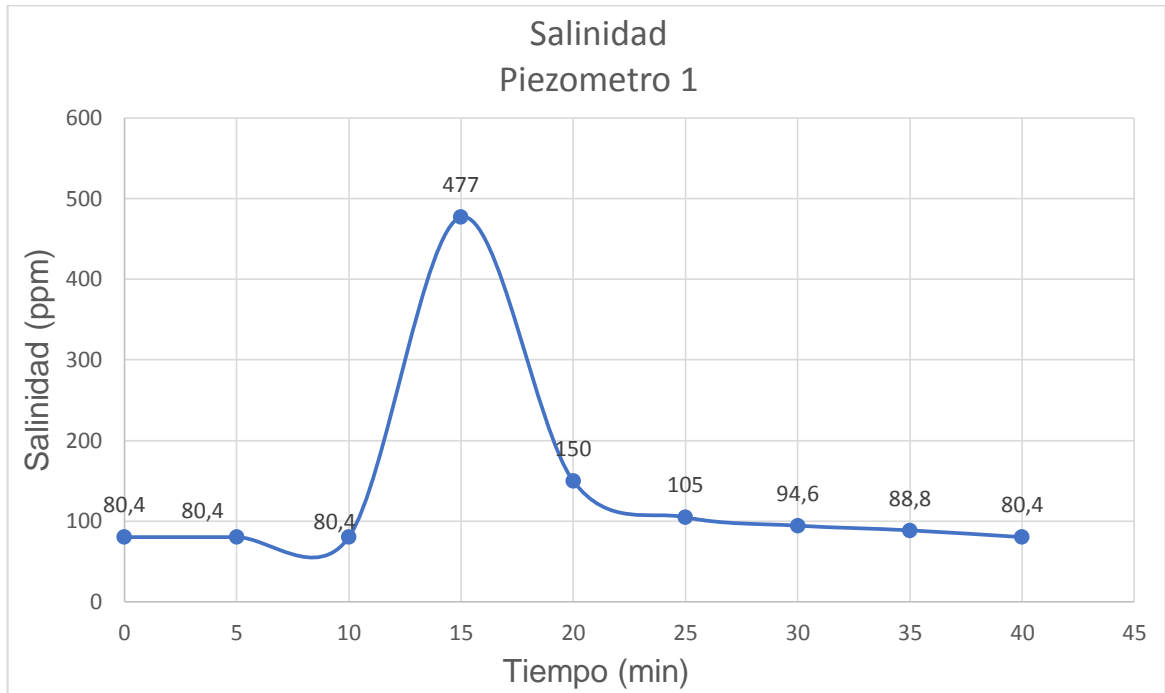
Tabla 9. Datos para la curva de salinidad vs tiempo para el piezómetro 1.

Tiempo (min)	Salinidad (ppm)
0	80,4
5	0,00000341
10	0,00000375
15	477
20	150
25	105
30	94,6
35	88,8
40	80,4

Fuente: Autor.

²⁴ Para llevar a cabo una medición de conductividad eléctrica se recomienda el sistema amperométrico para soluciones con baja concentración de sólidos disueltos, la cantidad de sal recomendada generalmente es hasta un gramo por litro (aproximadamente 2000 μ s/cm).

Grafica 2. Reporte de la curva de salinidad para el piezómetro 1.



Fuente: Autor.

En la tabla 10, se encuentra el reporte de datos tanto de tiempo como de salinidad, según el multiparametro PL700AL para el piezómetro 2.

Tabla 10. Datos para la curva de salinidad vs tiempo para el piezómetro 2.

Tiempo (min)	Salinidad (ppm)
0	76,5
5	79,3
10	93
15	102
20	186
25	564
30	213
35	128
40	109
45	95,2
50	79,6
55	76,5

Fuente: Autor.

Grafica 3. Reporte de la curva de salinidad para el piezómetro 2.



Fuente: Autor.

En la tabla 11, se encuentra el reporte de datos tanto de tiempo como de salinidad, según el multiparametro PL700AL para el piezómetro 3.

Tabla 11. Datos para la curva de salinidad vs tiempo para el piezómetro 3.

Tiempo (min)	Salinidad (ppm)
0	64,6
5	64,6
10	64,6
15	64,6
20	107
25	68,3

Fuente: Autor.

Grafica 4. Reporte de la curva de salinidad para el piezómetro 3.



Fuente: Autor.

En la tabla 9, se encuentra el reporte de datos tanto de tiempo como de salinidad, según el múltiparametro PL700AL para el piezómetro 4.

Tabla 12. Datos para la curva de salinidad vs tiempo para el piezómetro 4.

Tiempo (min)	Salinidad (ppm)
0	150
5	150
10	150
15	150
20	386
25	326
30	190
35	150

Fuente: Autor.

Grafica 5. Reporte de la curva de salinidad para el piezómetro 4.



Fuente: Autor.

En la tabla 13, se encuentra el reporte de datos tanto de tiempo como de salinidad, según el múltiparametro PL700AL para el piezómetro 5.

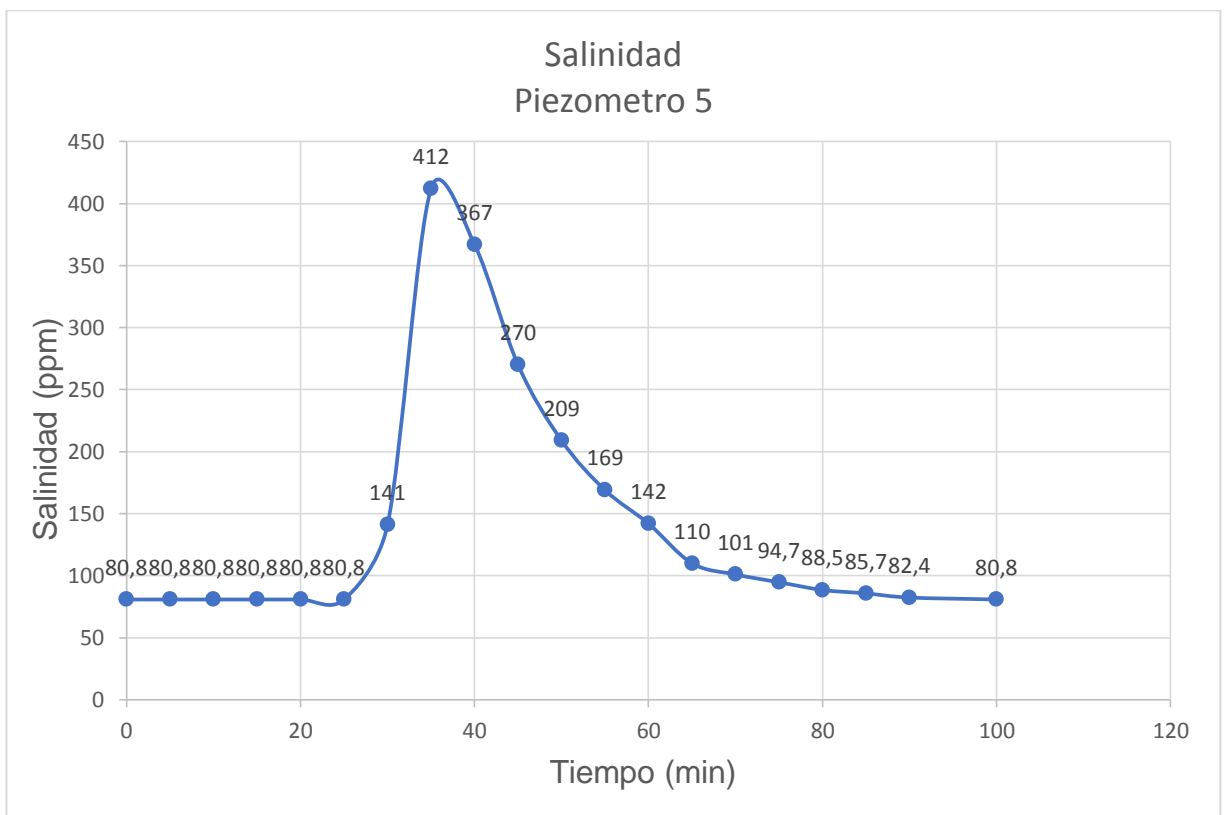
Tabla 13. Datos para la curva de salinidad vs tiempo para el piezómetro 5.

Tiempo (min)	Salinidad (ppm)
0	80,8
5	80,8
10	80,8
15	80,8
20	80,8
25	80,8
30	141
35	412
40	367
45	270
50	209
55	169

60	142
65	110
70	101
75	94,7
80	88,5
85	85,7
90	82,4
100	80,8

Fuente: Autor.

Grafica 6. Reporte de la curva de salinidad para el piezómetro 5.



Fuente: Autor.

En la tabla 14, se encuentra el reporte de datos de salinidad en cada punto de toma según el multíparametro PL700AL.

Tabla 14. Datos obtenidos de salinidad máxima en cada punto de toma.

Cantidad de piezómetros	Profundidad en (cm)	Salinidad en (ppm)
P1	26,3	477
P2	45,0	564
P3	22,5	107
P4	45,0	386
P5	28,4	412

Fuente: Autor.

En la tabla 15, se encuentra el reporte de datos de salinidad máxima en cada punto de toma, según el multímetro PL700AL.

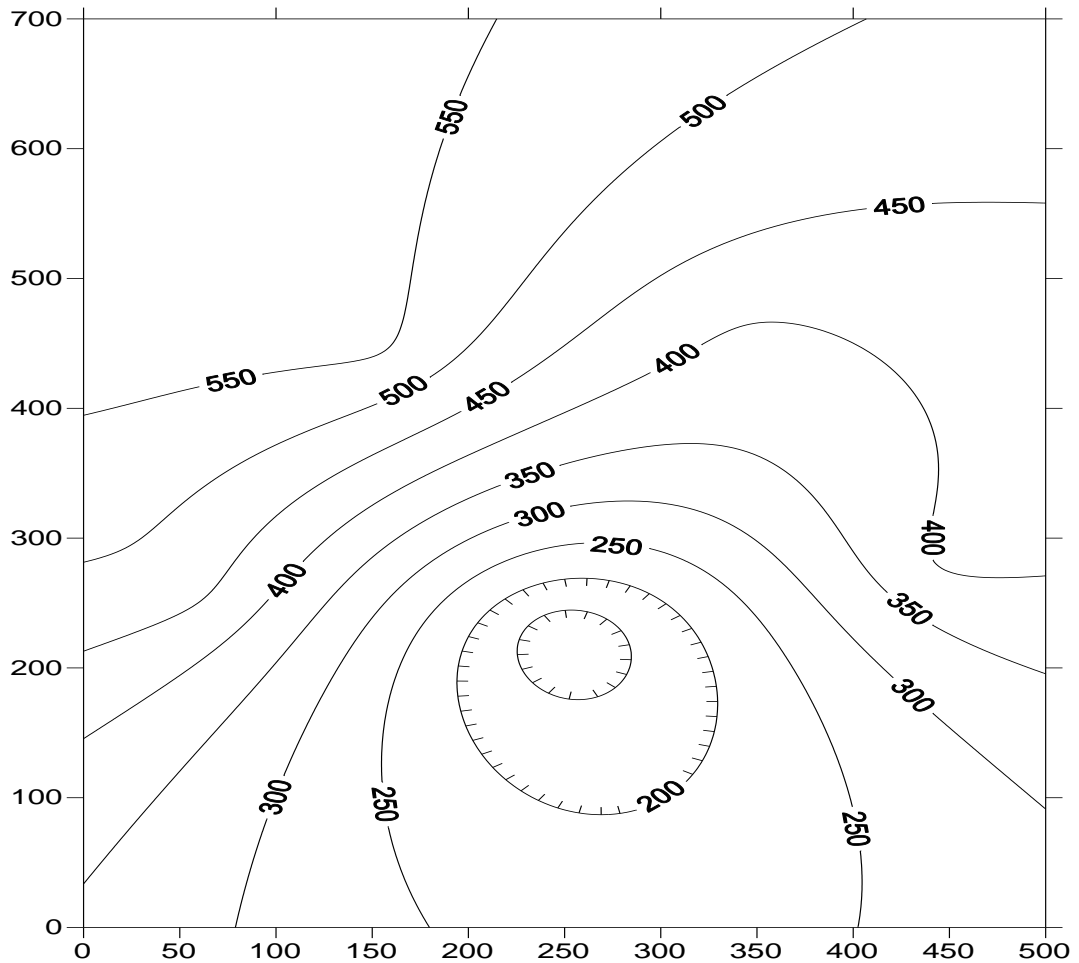
Tabla 15. Datos de la salinidad máxima en cada punto de toma.

Salinidad (ppm)	Piezómetros
477	P1
564	P2
107	P3
386	P4
412	P5

Fuente: Autor.

A continuación, se presenta la gráfica de dispersión de salinidad, la cual fue construida según los datos obtenidos de salinidad máxima en cada punto de toma; es decir, para cada profundidad piezométrica.

Grafica 7. Dispersión de salinidad en el sistema.



Fuente: Autor.

8. CONCLUSIONES

- Después de realizados los ensayos previos para el implemento del modelo de prueba, se puede decir que con las condiciones necesarias utilizadas como: el acondicionamiento del modelo, la instalación de elementos de suministro, medición y control de flujo de agua; se llegó a la expectativa inicial de este proyecto que era cumplir con todos los objetivos específicos. Esto debido a que el modelo quedo muy bien implementado, sin fallas ni inconvenientes que pudieran afectar de forma considerable el estudio realizado.
- Según los resultados obtenidos de granulometría, como menos del 50% del suelo pasa por el tamiz #200 (0,075 mm) y más del 50% del suelo pasa por

el tamiz #4 (5 mm), esto indica que el suelo obtenido es una arena. Y con el resultado de los coeficientes de uniformidad y curvatura se puede decir que el suelo obtenido queda clasificado como una: arena mal graduada (SP).

- Para efectos de estudio, se hicieron dos ensayos de conductividad hidráulica o permeabilidad K. El primero fue realizado en el laboratorio de suelos (permeabilidad a cabeza constante), donde cada capa de suelo agregada al permeámetro fue compactada cada 25 golpes, este dato arrojado fue tomado como (valor teórico) = 130.54 cm/hr y el segundo en el laboratorio de hidráulica directamente en el modelo de prueba, donde el suelo suministrado al sistema estaba suelto, este dato fue tomado como (valor experimental) = 89,853 cm/hr. Ambos ensayos indicaron una conductividad hidráulica muy rápida y arena moderadamente permeable, según las tablas 1 y 2 respectivamente. Y con los valores obtenidos se realizó el cálculo de %error = $\frac{\text{Teorico} - \text{experimental}}{\text{Teorico}} * 100$ y se obtuvo un error considerable del 31%.
Con la obtención de este resultado se concluye que se da esta variación debido a que un suelo estaba compactado y el otro estaba suelto por lo que hace la diferencia en los resultados.
- Gracias al aparato Gondo Ezodo con referencia PL700AL, se pudo determinar de forma rápida cómo se da la dispersión de salinidad en el modelo de prueba. Lo que facilitó el trabajo en el laboratorio, arrojando datos precisos y confiables que sirvieron para realizar el respectivo reporte de las curvas de salinidad y la distribución espacial en el sistema.
- La técnica de trazadores con sal común, es normalmente utilizada en la actualidad para rastrear las aguas subterráneas, por su capacidad de detectar de manera directa o indirecta la conductividad eléctrica. Según los datos obtenidos durante el análisis de estudio realizado para cumplir con las expectativas de este proyecto de investigación se pudo comprobar que: a mayores cantidades de sales solubles presentes en el agua, mayor será la conductividad eléctrica, es decir; la salinidad.
- Con los datos que se tomaron de salinidad máxima en cada punto de toma, se hizo la respectiva distribución espacial de la dispersión de salinidad en el modelo prueba, de lo que se puede decir que, donde se da la mayor saturación de trazado es donde el manto de suelo tiene menor velocidad.

9. RECOMENDACIONES

- Utilizar el prototipo expuesto a prueba para esta investigación, suministrando distintos estratos de suelo en el mismo; a fin de mirar el comportamiento que tiene un trazador en las distintas capas.
- Se recomienda para futuros análisis con el modelo incluir algunas mejoras que permitan controlar los niveles de descarga con algunos reboces o vertederos de excesos.
- En este proyecto se trabajó con un solo sensor para medir el comportamiento del flujo. Pero sería mucho más práctico poder contar con varios sensores que puedan medir simultáneamente el trazado en todos los puntos de toma del modelo.
- Se recomienda continuar experimentando en el modelo y de alguna manera proponer diferentes condiciones y combinaciones de flujo y material, que permitan ayudar a entender a los estudiantes el comportamiento del flujo subterráneo.

10. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Amazonas technologies. (s.f.). Obtenido de <http://www.amazonastech.com/idf.htm>.

Banco de imágenes del Departamento General de Irrigación. (s.f.).

Barbecho Chuisaca, J. G., & Calle Ortiz, J. E. (2012). *CARACTERIZACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA DE LOS SUELOS DE LA SUBCUENCA DEL RIO TARQUI.* Obtenido de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/771/1/ti897.pdf>.

CesarUPB ventas On-line. (s.f.). Obtenido de <http://cesarupb.mercadoshops.com.co/multiparametro-de-mesa-combinado-con-agitador-mag-pl700pc--96709144xJM>.

Custodio, E., & Llamas, M. (1996). *Hidrología subterránea. Tomos I y II.* Barcelona: Ediciones Omega.

Delgado Maldonado, L. C. (2012). *EVALUACION DEL COMPORTAMIENTO DE LA PLUMA CONTAMINANTE ANTE EVENTUALES ESCENARIOS DE CONTAMINACION POR HIDROCARBURO LIVIANO EN AGUAS SUBTERRANEAS DENTRO DE DOS INSTALACIONES INDUSTRIALES UTILIZANDO EL SOFTWARE VISUAL MODFLOW.* Floridablanca Santander.

Geología y Geotecnia, permeabilidad de suelos. (Septiembre de 2006). Obtenido de <https://www.fceia.unr.edu.ar/geologiaygeotecnia/Permeabilidad%20en%20Suelos.pdf>.

Gleick. (1996). *Water resources. In encyclopedia of climate and weather.* Nueva York: Oxford University Press.

Gómez Isidro, S. (2014). *Aguas subterráneas en zonas de montaña y trazadores ambientales.* Bucaramanga, Colombia.

<http://geolabs.com.mx/blog/trabajo/propiedades-hidraulicas-del-suelo/>. (s.f.).

Irrigación, B. d. (s.f.). aquabook.agua.gob.ar.

Mateos Ruiz, R. M., & Gonzalez Casasnovas , C. (2009). *LOS CAMINOS DEL AGUA EN LAS ISLAS BALEARES, ACUIFEROS Y MANANTIALES*. Obtenido de file:///C:/Users/Usuario/Downloads/CaminosDelAguaWeb1.pdf.

Molerio León, L. F. (s.f.). *HIDROLOGIA DE TRAZADORES EN LA GESTIÓN AMBIENTAL DE YACIMIENTOS DE PETRÓLEO ONSHORE*. Obtenido de http://www.redciencia.cu/geobiblio/paper/2007_leslie_Trazadoes_Geociencias.pdf.

Ordoñez Galvéz, J. J. (2011). *CARTILLA TECNICA: AGUAS SUBTERRÁNEAS-ACUÍFEROS*. Obtenido de <https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2017/06/Cartilla-t%C3%A9cnica-aguas-subterr%C3%A1neas-acu%C3%ADferos.pdf>.

Parquearvi. (2014). Obtenido de <http://parquearvi.org/wp-content/uploads/2016/11/Decreto-Ley-2811-de-1974.pdf>.

Rangos de conductividad hidráulica propuesta (service, E.U.A. Soil Conservation). (s.f.).

Serrano Guzmán , M. F., Forero Sarmiento , J. C., Arias, D. A., & Ruiz , D. P. (2013). *CONSTRUCCION DE PROTOTIPO: ESTRATEGIA PEDAGOGICA PARA EL AFIANZAMIENTO DE CONCEPTOS*. Obtenido de <https://www.acofipapers.org/index.php/acofipapers/2013/paper/viewFile/36/7>.

Técnica de trazadores. (s.f.). Obtenido de file:///C:/Users/Usuario/Downloads/582-890-1-PB.pdf.

Thuinof. (2002).

Trenberth. (2007). *ResearchGate*. Obtenido de https://www.researchgate.net/figure/Figura-122-Ciclo-hidrologico-Trenberth-et-al-2007-La-grafica-incluye-los-almacenes_fig1_286601951.

Unesco. (2004).

Unicauca.edu.co. (s.f.). Obtenido de www.unicauca.edu.co.

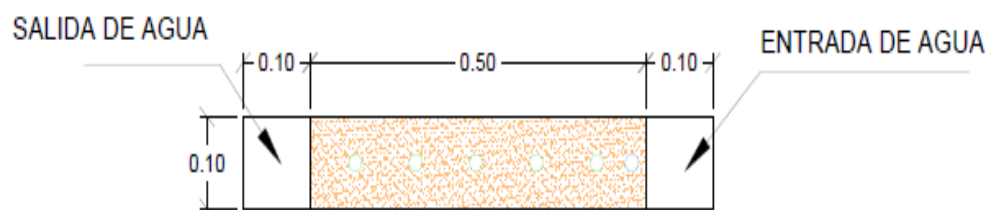
Valencia, J. (s.f.). *Apus del agua, sistema de Actualización Profesional Permanente en Gestión de Recursos Hídricos y Cambio Climático "Macroregión Sur" (SAPP-GIRH/CC)*. Obtenido de <http://apusdelagua.blogspot.com/2014/11/importancia-de-las-aguas-subterranas.html>.

Veléz Otálvaro, M. V. (1992). *HIDRAULICA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS*. Medellín, Colombia.

Veléz Otalvaro, M. V., Ortiz Pimienta, C., & Quintero Vargas , M. C. (2011). *LAS AGUAS SUBTERRANEAS UN ENFOQUE PRÁCTICO* . Bogotá, Colombia.

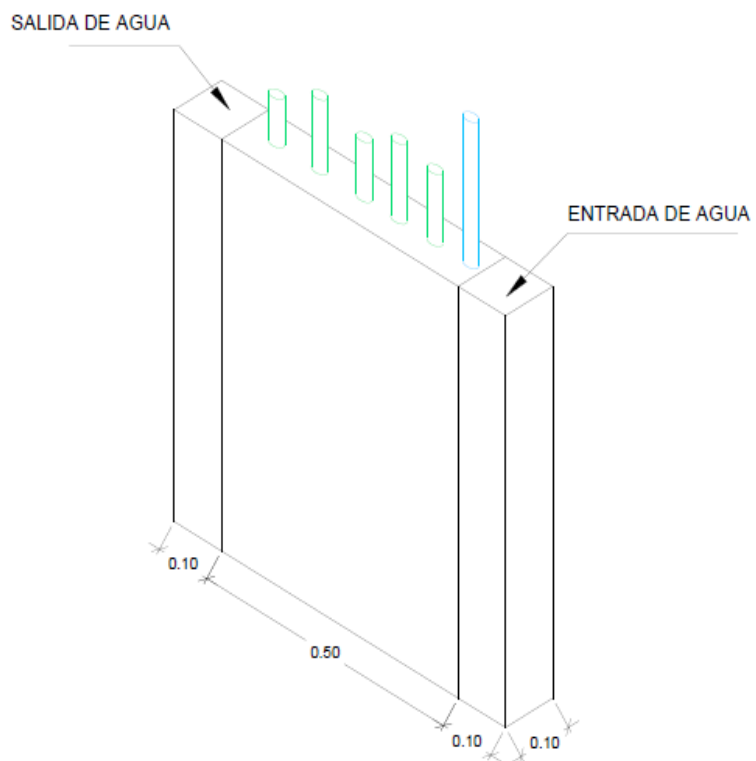
Anexos

Vista del modelo desde arriba.



Fuente: Autor.

Vista del modelo lateralmente.



Fuente: Autor.