

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ingeniería Civil, Arquitectura y Geotecnia

Escuela Profesional de Ingeniería Civil

**ANÁLISIS COMPARATIVO NUMÉRICO Y
EXPERIMENTAL EN LABORATORIO DEL
EFECTO DE UN DREN SOBRE UN
ACUÍFERO LIBRE SATURADO**

TESIS

Presentada por:

Bach. Yary Mayly Mamani Hinojosa

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO CIVIL

TACNA - PERÚ

2025

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ingeniería Civil, Arquitectura y Geotecnia

Escuela Profesional de Ingeniería Civil

“ANÁLISIS COMPARATIVO NUMÉRICO Y EXPERIMENTAL EN
LABORATORIO DEL EFECTO DE UN DREN SOBRE UN
ACUÍFERO LIBRE SATURADO”

Tesis sustentada y aprobada el día 22 de enero del 2025 estando integrado
el Jurado Calificador por:

PRESIDENTE


:
Mtro. Ing. César Avendaño Jihuallanga

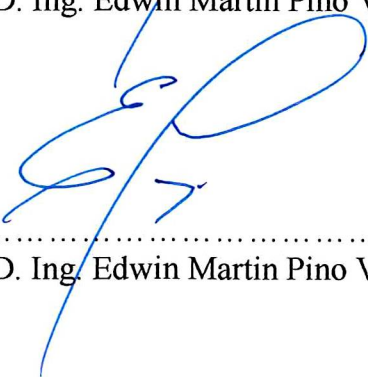
SECRETARIO


:
Mtro. Ing. Wilber Percy Mendoza Ramirez

VOCAL


:
Ph.D. Ing. Edwin Martin Pino Vargas

ASESOR DE TESIS



:
Ph.D. Ing. Edwin Martin Pino Vargas

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, Edwin Martín Pino Vargas, en mi condición de ASESOR acreditado con Resolución de Facultad N° 904-2024-FIAG-/UNJBG del 22 de Noviembre del 2024, del Trabajo de Tesis titulado: ANÁLISIS COMPARATIVO NUMÉRICO Y EXPERIMENTAL EN LABORATORIO DEL EFECTO DE UN DREN SOBRE UN ACUÍFERO LIBRE SATURADO. Presentado por la Bach. Yary Mayly Mamani Hinojosa . Para optar el título profesional de Ingeniero Civil.

Habiendo cumplido con lo establecido en el reglamento de originalidad y similitud de trabajos de investigación y producción intelectual de la UNJBG; considerando que según la revisión, evaluación y análisis realizado a través del software de similitud textual TURNITIN, cuenta con el nivel de similitud permitido cuyo porcentaje es 8 %. Por lo que CERTIFICO LA SIMILARIDAD de la tesis enunciada líneas arriba, la cual esta expedita para continuar con los trámites para optar el título profesional de Ingeniero Civil, según corresponda para su publicación en el Repositorio Institucional.

Tacna, 04 de febrero 2025.



FIRMA ASESOR
Edwin Martín Pino Vargas
00486621



Huella dactilar



FIRMA AUTOR
Yary Mayly Mamani Hinojosa
76945997



Huella dactilar

DEDICATORIA

A mi madre, quien dirige cada paso de mi vida y me otorga sabiduría, claridad y fortaleza para continuar.

A mis profesores y mentores, por sus enseñanzas y guía, quienes, con su sabiduría, me han orientado en cada paso de este camino.

AGRADECIMIENTO

A mi madre, por darme el impulso necesario para seguir adelante, incluso acompañándome en la adversidad.

A mi asesor de tesis, por orientarme con generosidad en cada etapa de este proceso. Su dedicación y sabiduría han sido fundamentales para que pueda alcanzar este logro.

ÍNDICE GENERAL

PORTADA	i
HOJA DE JURADO	ii
CERTIFICADO DE SIMILITUD	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
ÍNDICE GENERAL	vi
ÍNDICE DE TABLAS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
RESUMEN.....	xv
ABSTRACT	xvi
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I: ASPECTOS GENERALES.....	4
1.1 Identificación del problema.....	4
1.2 Formulación del problema	6
1.2.1 Problema principal	6
1.2.2 Problemas secundarios.....	6
1.3 Justificación del problema	7
1.3.1 Justificación teórica.....	7
1.3.2 Justificación metodológica.....	7

1.3.3	Justificación experimental.....	8
1.4	Importancia de la investigación	8
1.5	Alcances y limitaciones	8
1.5.1	Alcances	8
1.5.2	Limitaciones	9
1.6	Objetivos	9
1.6.1	Objetivo general	9
1.6.2	Objetivos específicos.....	9
1.7	Hipótesis	10
1.7.1	Hipótesis general.....	10
1.7.2	Hipótesis específicas.....	10
1.8	Variables	11
1.8.1	Identificación de variables	11
1.8.2	Caracterización de las variables.....	11
1.8.3	Medición operacional de las variables.....	12
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO		13
2.1	Antecedentes	13
2.1.1	Antecedente internacional	13
2.1.2	Antecedente nacional	13
2.1.3	Antecedente local.....	14
2.2	Conceptos generales	15

2.3 Bases teóricas.....	16
2.3.1 Descripción de los dimensiones de la investigación	17
2.3.2 Descripción de los Indicadores de la investigación	19
2.3.3 Método Crank Nicolson.....	21
2.3.4 Experimental	35
CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO	37
3.1 Tipo de investigación.....	37
3.2 Diseño de investigación.....	37
3.3 Procedimiento numérico.....	37
3.4 Procedimiento experimental	39
3.4.1 Zanja de drenaje	41
3.4.2 Pared de tablestacas.....	45
3.4.3 Fundamento 1.....	47
3.4.4 Fundamento 2.....	50
3.4.5 Muro de contención	51
CAPÍTULO IV: RESULTADOS	55
4.1 Resultado de la zanja de drenaje	55
4.1.1 Líneas de corriente según el manual.....	55
4.1.2 Líneas de corriente según ensayo	56
4.1.3 Líneas de corriente según numérico.....	56
4.2 Resultado de la pared de tablestaca	60

4.2.1	Líneas de corriente según el manual.....	60
4.2.2	Líneas de corriente según ensayo	61
4.2.3	Líneas de corriente según Matlab	62
4.2.4	Lectura del panel manométrico según el manual	63
4.2.5	Lectura del panel manométrico según ensayo.....	64
4.3	Resultado del fundamento 1.....	66
4.3.1	Medición de presión según el manual	66
4.3.2	Medición de presión según ensayo.....	67
4.4	Resultado del fundamento 2.....	69
4.4.1	Medición de presión según el manual	69
4.4.2	Medición de presión según ensayo.....	70
4.5	Resultado del muro de contención	72
4.5.1	Medición de presión según el manual	72
4.5.2	Medición de presión según ensayo.....	73
4.6	Contrastación de hipótesis principal	76
4.7	Contrastación de primera hipótesis secundaria	77
4.8	Contrastación de segunda hipótesis secundaria	78
4.9	Contrastación de tercera hipótesis secundaria	79
	CAPÍTULO V: DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	80
	CONCLUSIONES	82
	RECOMENDACIONES.....	84

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	86
ANEXOS	95

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Operacionalización de variables	12
--	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema generalizado para la geometría de una excavación en acuífero libre	25
Figura 2. Representación nivel piezométrico con geometría del acuífero libre	26
Figura 3. Comportamiento del flujo en un acuífero libre	27
Figura 4. Condiciones de contorno tipo Dirichlet.	29
Figura 5. Termino temporal y termino difusivo	31
Figura 6. <i>Discretización del problema en la dirección x</i>	32
Figura 7. Discretización del problema parabólico 1D	33
Figura 8. Cálculo numerico con excel.	38
Figura 9. Vista frontal del equipo de visualización de líneas de corrientes	40
Figura 10. Vista frontal del equipo	41
Figura 11. Montaje experimental de la zanja de drenaje	43
Figura 12. Procedimiento de la zanja de drenaje	44
Figura 13. Montaje experimental de la pared de tablestacas	46
Figura 14. Colocación de la pared de tablestaca	47
Figura 15. Montaje experimental del fundamento	48
Figura 16. Colocación del accesorio fundamento.	49
Figura 17. Nivelación horizontal del fundamento.	51

Figura 18. Montaje experimental del muro de contención.....	52
Figura 19. Medición de la arena en el depósito del ensayo.....	53
Figura 20. Líneas de corriente en un medio poroso	55
Figura 21. Experimentalmente líneas de corriente en un medio poroso...56	
Figura 22. Curvas del nivel freático con excel.....	57
Figura 23. Curvas del nivel freático con Matlab.	57
Figura 24. Comparación de líneas de corriente con el método de Clark Nicolson	59
Figura 25. Contraste de resultados de lectura calculada vs lectura observada	60
Figura 26. <i>Comportamiento de un flujo con una pared de tablestaca</i>	61
Figura 27. Líneas de corriente en un medio poroso con una tablestaca. .	62
Figura 28. Líneas de corriente con Matlab.....	63
Figura 29. Lectura de las presiones con pared de tablestaca según el manual	64
Figura 30. Gráfico del nivel del agua vs N°de tubo manométrico.	64
Figura 31. Datos tomados en la ejecución del ensayo para la pared de tablestacas.....	65
Figura 32. Ensayo del fundamento 1	66
Figura 33. Tablestaca a 140 mm sobre el nivel de la base del ensayo	67

Figura 34. Datos tomados en la ejecución del ensayo para el fundamento 1	68
Figura 35. Ensayo del fundamento 2	69
Figura 36. Tablestaca a 60 mm sobre el nivel de la base del ensayo	70
Figura 37. Datos tomados en la ejecución del ensayo para el fundamento 2	71
Figura 38. La presión del agua existente en un muro de contención	73
Figura 39. Presiones registradas para un muro de contención	74
Figura 40. Datos tomados en la ejecución del ensayo para el muro de contención	75

RESUMEN

En la actualidad, existen otros estudios relacionados con el análisis numérico y experimental que consideran la salinidad del agua en acuíferos; la cual representa un desafío debido a su naturaleza no lineal. Esto se atribuye a varias razones, como la permeabilidad del medio poroso, la falta de soluciones analíticas y datos de campo. Por ello, para proporcionar una comprensión más precisa del comportamiento del flujo en estos sistemas mediante el uso de modelos numéricos y compararlos con observaciones experimentales, el objetivo de este estudio fue analizar el comportamiento de un flujo en medios porosos, relacionado con el flujo de agua para evaluar los modelos numéricos. Para ello, se empleó el Excel y Matlab. Para hacer la comparación, fue necesario realizar experimentos, ya que los ensayos de laboratorio permiten observar el comportamiento del agua en condiciones específicas. A sí mismo, para los ensayos en laboratorio, se utilizó el equipo HM 169 Visualización de Corrientes de Infiltración. Se obtuvo como resultados similares al modelo numérico, esto se debe a que experimentalmente el resultado depende del caudal que se le proporciona, variando así los resultados que son próximos al numérico.

Palabras clave: Flujo, caudal, corrientes de infiltración.

ABSTRACT

It has been identified that there are currently other studies related to both numerical and experimental analysis considering the salinity of water in aquifers; which represents a challenge due to its non-linear nature, this is attributed to several reasons such as the permeability of the porous medium, due to the lack of analytical solutions and field data; This is why to provide a more precise understanding of the flow behavior in these systems by using numerical models and comparing them with experimental observations.

The objective of this study was to analyze the behavior of a flow in porous media, related to the flow of water. To evaluate the numerical models, Excel and Matlab are used, and to make the comparison it is necessary to carry out experiments, since the tests laboratory allows you to observe the behavior of water under specific conditions. Likewise, for the laboratory tests, the HM 169 Visualization of Infiltration Currents equipment was used. Obtaining similar results to the numerical model, this is because experimentally the result depends on the flow rate provided, thus varying the results that are close to the numerical one.

Keywords: flow, rate, infiltration currents.

INTRODUCCIÓN

Para la presente investigación, se tomó como referencia otros estudios donde los ensayos a escala de laboratorio se emplean de manera común para investigar la interfaz del agua.

A nivel internacional, la intrusión de salinidad en acuíferos es un problema global, especialmente en regiones costeras o en áreas con alta demanda de agua subterránea. Factores como la sobreexplotación de los acuíferos, el cambio climático y el aumento del nivel del mar contribuyen a la salinización de los recursos hídricos subterráneos. En países como Egipto, India y países del Medio Oriente, la intrusión salina afecta gravemente la disponibilidad de agua dulce para consumo humano, riego y uso industrial.

A nivel nacional, Perú, la intrusión salina en acuíferos es una problemática creciente, especialmente en la costa, donde la sobreexplotación de recursos hídricos subterráneos ha provocado que el agua dulce de los acuíferos se vea desplazada por agua salina. Las zonas como Ica, Lima, Piura y Tacna enfrentan graves problemas de salinización en sus acuíferos, debido a la extracción excesiva de agua y la falta de gestión sostenible de los recursos hídricos.

A nivel local, Tacna, ubicada en el sur del Perú, enfrenta desafíos significativos en relación con la salinización de sus acuíferos. Tacna es una región árida, con recursos hídricos limitados, por lo que depende en gran medida de sus acuíferos subterráneos. La sobreexplotación de estos acuíferos para satisfacer las demandas de agua potable, agrícola e industrial está provocando una intrusión de salinidad. A pesar de ser una región costera, Tacna enfrenta una falta de una adecuada gestión de recursos hídricos y problemas de contaminación de los acuíferos debido a la intrusión salina.

Considerando los estudios como antecedentes, esta investigación se limita a analizar el comportamiento del flujo (agua) en un medio poroso (cuarcita de arcilla) que posteriormente permitirá evaluar de manera precisa el rendimiento de los modelos matemáticos y numéricos, es fundamental llevar a cabo mediciones experimentales. Los ensayos de laboratorio brindan la ventaja de contar con condiciones iniciales y de contorno controladas, que brindan las trayectorias de las líneas de corriente en medios porosos que proporciona datos consistentes que ayudan a validar y comprender con mayor profundidad los comportamientos del flujo, lo que a su vez permitirá mejorar la precisión de los modelos numéricos empleados para predecir el comportamiento de los flujos en estos medios.

Esta investigación está compuesto por cinco capítulos, organizados de la siguiente manera:

En el capítulo I, se presentan los aspectos generales de la investigación.

En el capítulo II, se aborda el marco teórico que fundamenta el desarrollo del estudio.

En el capítulo III, se describe el procedimiento para la obtención de resultados numéricos y experimentales.

En el capítulo IV, se presentan los resultados y se realiza el análisis de los mismos.

En el capítulo V, se realiza la discusión de los resultados.

Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones derivadas de la investigación.

CAPÍTULO I

ASPECTOS GENERALES

1.1 Identificación del problema

El flujo de densidad variable en medios porosos está estrechamente vinculado a la dinámica del flujo de agua subterránea en acuíferos costeros. Este tipo de flujo, impulsado por diferencias de densidad, sigue siendo un desafío importante debido a su naturaleza no lineal y a la disponibilidad limitada de soluciones analíticas y datos estándar de campo (Simpson y Clement, 2003). En los últimos años, se han propuesto varios métodos basados en observaciones in situ para comprender la dinámica de los flujos dependientes de la densidad (Souza y Voss, 1987 y Zhang et al., 2002).

Sin embargo, para evaluar con precisión el desempeño de los modelos matemáticos y numéricos, es necesario realizar cuantificaciones experimentales. Los experimentos de laboratorio (o ensayos) ofrecen la ventaja de contar con condiciones iniciales y de contorno controladas, además de conocer las propiedades del material poroso. Por ello, los modelos de caja de arena en laboratorio se utilizan como herramientas útiles para la visualización del flujo y la realización de mediciones in situ (Konz et al., 2009, Dose et al., 2014 y Mehdizadeh et al., 2014). No obstante, hay pocos estudios (Werner et al., 2013 y Shokri et al., 2018; Abudawia et al., 2018) que utilicen modelos bidimensionales a escala de

laboratorio, como los experimentos con cajas de arena, para investigar la interfaz entre dos fluidos de densidad variable y su flujo a través de un medio poroso estratificado. Los experimentos a escala de laboratorio se utilizan ampliamente para estudiar la interfaz de agua (Lèye et al., 2018; Oz et al., 2015; Simmons et al., 2001; Diersch y Kolditz, 2002; Volker y Rushton, 1982).

A nivel internacional, se resaltan diversos factores que afectan los procesos de intrusión del agua salada en los acuíferos costeros y examina las metodologías sugeridas para el diseño de estrategias de gestión a nivel regional, mediante soluciones de modelos matemáticos. En los últimos años, se han alcanzado importantes avances en la creación de herramientas matemáticas para diseñar estrategias de gestión óptimas orientadas a controlar la intrusión de agua salada en los acuíferos costeros (Roy y Datta, 2017).

A nivel nacional, la evaluación de los impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos y el riesgo de inundaciones generalmente se realizan mediante modelos hidrológicos calibrados, que se seleccionan en función de los registros de caudales observados. Sin embargo, rara vez se consideran los cambios climáticos al elegir los modelos hidrológicos, lo que puede afectar su capacidad para representar adecuadamente los cambios futuros en la hidrología de las cuencas (Saavedra et al., 2022).

A nivel local, Tacna se encuentra entre las regiones más secas del Perú, lo que ha generado una gran demanda sobre sus recursos hídricos. La sobreexplotación de los acuíferos libres, especialmente para la actividad agrícola, ha provocado una reducción en su capacidad de recarga y, en ciertos casos, la infiltración de agua salina proveniente del océano Pacífico (Pino et al., 2019).

1.2 Formulación del problema

1.2.1 Problema principal

¿Cómo analizar el comportamiento numérico y experimental en laboratorio del efecto de un dren sobre un acuífero libre saturado?

1.2.2 Problemas secundarios

- ¿Cómo el modelo numérico predice el comportamiento de un dren sobre un acuífero libre saturado?
- ¿Qué parámetros son necesarios para realizar el análisis del comportamiento experimental de un dren sobre un acuífero libre saturado?
- ¿Cómo se realiza la comparación numérica y experimental de un dren sobre un acuífero libre saturado?

1.3 Justificación del problema

1.3.1 Justificación teórica

Las soluciones numéricas existentes para el flujo en medios porosos se limitan a dominios 2-D. En este trabajo, desarrollamos una solución numérica utilizando el método de Crank-Nicolson, de diferencias finitas (Pino, 2020).

Lo más importante es que las soluciones analíticas pueden servir como una herramienta de referencia para evaluar la precisión y coherencia de los simuladores numéricos, tanto de forma general como en aspectos específicos (Shao et al., 2018).

1.3.2 Justificación metodológica

El enfoque metodológico de combinar estudios numéricos con experimental en laboratorio permite obtener resultados más completos y precisos. Los modelos numéricos permiten simular un amplio rango de condiciones sin la necesidad de realizar intervenciones costosas o difíciles de replicar en el campo. Estos modelos pueden prever el comportamiento del acuífero ante diversas condiciones, como variaciones en la permeabilidad del suelo o cambios en la velocidad del drenaje (Igboekwe y Achi, 2011).

1.3.3 Justificación experimental

Se empleó un experimento de laboratorio análogo para replicar el flujo de agua subterránea y el transporte de solutos en un acuífero kárstico con un conducto subterráneo dentro de la matriz. El enfoque principal del experimento se centra en los intercambios de agua y solutos entre la matriz y el conducto. Los resultados obtenidos servirán como base de referencia para el análisis numérico posterior (Faulkner et al., 2009).

1.4 Importancia de la investigación

Los estudios experimentales proporcionan datos reales que permiten ajustar y verificar los resultados obtenidos por los modelos numéricos. Estos experimentos suelen implicar la construcción de modelos a escala de acuíferos libres saturados en laboratorio, donde se puede controlar con precisión la permeabilidad, la altura del drenaje y otros factores que afectan la dinámica del acuífero.

1.5 Alcances y limitaciones

1.5.1 Alcances

Esta investigación tiene como propósito realizar ensayos utilizando uno de los equipos disponibles en el laboratorio de hidráulica e hidrología de la Escuela de Ingeniería Civil (HM 169 Visualización de Corrientes de Infiltración), con el objetivo de llevar a cabo diversos ensayos. Así, se busca obtener resultados específicos para cada tipo de prueba, teniendo en

cuenta las distintas condiciones que afectan al comportamiento del flujo en un medio poroso. La aplicación del uso del Excel y Matlab permite obtener valores puntuales y precisos como referencia a resultados que se pueden comparar con los resultados experimentales

1.5.2 Limitaciones

En un entorno de laboratorio, los ensayos hidráulicos pueden implicar procedimientos largos y complejos, especialmente cuando se buscan condiciones similares de campo de manera precisa. Las investigaciones metodológicas se destacan también una dificultad en la falta de información relevante sobre un acuífero compuesto únicamente de agua, ya que en la realidad existe una mayor fuente de datos relacionados con la salinidad.

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo general

Analizar el comportamiento numérico y experimental en un laboratorio del efecto de un dren sobre un acuífero libre saturado.

1.6.2 Objetivos específicos

- Predecir el comportamiento numérico del efecto de un drenaje sobre un acuífero libre saturado.

- Determinar los parámetros necesarios para el análisis del comportamiento experimental de un dren sobre un acuífero libre saturado.
- Comparar los resultados numéricos y experimentales de un dren sobre un acuífero libre saturado.

1.7 Hipótesis

1.7.1 Hipótesis general

¿Se podrá analizar el comportamiento numérico y experimental en laboratorio del efecto de un dren sobre un acuífero libre saturado?

1.7.2 Hipótesis específicas

- Se podrá predecir el análisis numérico del efecto de un drenaje sobre un acuífero libre saturado.
- Se podrá determinar los parámetros esenciales para el análisis experimental del comportamiento de un dren en un acuífero libre saturado en el laboratorio.
- Se podrá comparar los resultados numéricos y experimentales de un dren sobre un acuífero libre saturado.

1.8 Variables

1.8.1 Identificación de variables

En el presente estudio, se cuentan con los siguientes dos variables:

- Variable independiente: Afecto de un dren sobre un acuífero libre saturado.
- Variable dependiente: Análisis comparativo numérico y experimental en laboratorio.

1.8.2 Caracterización de las variables

- Las líneas de corriente hacia un dren indican las trayectorias que siguen las partículas de agua cuando se mueven a través de un medio poroso, debido a cómo el agua se dirige hacia ese drenaje debido a la pendiente del terreno, la permeabilidad del suelo, y la presencia de fuerzas como la gravedad.
- En un análisis comparativo, se comparan los resultados de ambos enfoques para determinar en qué medida el modelo numérico refleja correctamente la realidad observada en el laboratorio. Esta comparación es crucial para identificar discrepancias y mejorar tanto los modelos como las técnicas experimentales.

1.8.3 Medición operacional de las variables

Tabla 1

Operacionalización de variables

VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES
V. INDEPENDIENTE		
Efecto de un dren sobre un acuífero libre saturado.	Dinámica de fluidos	Línea de corriente Presión
V. DEPENDIENTE	DIMENSIONES	INDICADORES
Análisis comparativo numérico y experimental en laboratorio.	Especialidad de mecánica de suelos	Permeabilidad Porosidad

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

2.1.1 Antecedente internacional

Se emplea el método de diferencias finitas para resolver las ecuaciones que describen el flujo de agua subterránea, con el fin de obtener caudales, dirección del flujo y cargas hidráulicas en un acuífero. El propósito es analizar los principios y ejemplos del método de diferencias finitas, así como sus aplicaciones en la modelización de aguas subterráneas. Para ello, se utiliza un modelo en el que una cuadrícula se superpone al acuífero para obtener una solución precisa. El método puede emplearse para prever la dirección futura del flujo y la posición de las partículas dentro de un dominio (Igboekwe y Achi, 2011).

2.1.2 Antecedente nacional

La evaluación de los impactos del cambio climático en los recursos hídricos, generalmente, involucra diversas metodologías, que incluyen la selección de escenarios de emisiones, modelos climáticos globales (GCM), condiciones iniciales, métodos de reducción de escala, la estructura del modelo hidrológico y los valores de los parámetros. Las decisiones tomadas en estos aspectos generan incertidumbres, cuya relevancia puede

variar según las condiciones hidro climáticas particulares y las características de la cuenca. Los efectos derivados exclusivamente de la elección del modelo hidrológico, que en muchos casos se basa más en la tradición que en su adecuación, han sido ampliamente investigados en el contexto de los impactos del cambio climático. Numerosos estudios han caracterizado estos efectos utilizando un conjunto reducido de modelos hidrológicos. Actualmente, la evaluación de las incertidumbres estructurales se ha visto favorecida por el desarrollo de marcos de modelado modular (MMF, por sus siglas en inglés) (Saavedra et al., 2022).

2.1.3 Antecedente local

Al abordar el cambio climático, uno de los principales retos que enfrentan los gestores de recursos hídricos es decidir qué modelos de circulación general (GCM) deben emplearse para evaluar los efectos del cambio climático en los sistemas hídricos. Esta es una cuestión compleja, ya que todos los GCM presentan incertidumbres al predecir variables climáticas históricas. No obstante, ciertos criterios, como la resolución espacial, el grado de acoplamiento entre la atmósfera y el océano, y la disponibilidad de múltiples realizaciones, pueden ser considerados al seleccionar un conjunto de GCM, con el fin de reducir las incertidumbres en las predicciones de precipitación máxima e inundaciones derivadas de cada GCM individual (Pino et al., 2022).

2.2 Conceptos generales

Utilizando el esquema de Crank-Nicolson, un enfoque basado en el método de diferencias finitas, analizaremos cómo evoluciona el nivel freático a lo largo del tiempo sobre una geometría de acuífero libre, alterada por la excavación de una zanja. Las condiciones de frontera que se aplican son del tipo Dirichlet (con un nivel piezométrico prescrito en el contorno). El objetivo principal es derivar y aplicar adecuadamente la formulación de Crank-Nicolson para resolver el problema, haciendo especial énfasis en la estabilidad incondicional del método y en la posible presencia de oscilaciones (Pino, 2020).

No obstante, existe otras herramientas de la dinámica de fluidos computacional (CFD) que se han utilizado para simular varios procesos de transporte en medios porosos, con aplicaciones que van desde la exploración de petróleo y gas hasta la gestión del agua. Estudios previos demostraron que el flujo de agua subterránea se puede simular con éxito utilizando COMSOL Multiphysics o ANSYS Fluent (Liu y Liu, 2017). El uso de plataformas CFD ha atraído creciente interés en la investigación, ya que son capaces de resolver ecuaciones que describen dinámicas simultáneas (ŞEN y DÜŞÜNÜR-DOĞAN, 2021).

Para resolver de manera numérica, estas ecuaciones fundamentales, es necesario definir condiciones iniciales y de contorno que dependan de las características del proceso. Se emplea con frecuencia en conjunto con experimentos y datos de campo. Ofrece una descripción relativamente rápida del flujo de fluidos sin necesidad de un extenso entrenamiento, a diferencia de los algoritmos de redes neuronales, y proporciona modelos más robustos que cumplen con los requisitos de precisión en los resultados. Además, facilita evaluaciones de sensibilidad más ágiles mediante barridos paramétricos, permitiendo ajustar los valores iniciales y las condiciones de contorno. Esto puede mejorar la optimización del tiempo, especialmente cuando los experimentos requieren cambios en los materiales o en las técnicas de laboratorio (Chalá et al., 2024a).

2.3 Bases teóricas

El flujo de un fluido hace referencia al desplazamiento de partículas dentro del mismo como reacción a diferencias de presión, temperatura y otras fuerzas externas (Batchelor, 2000). El flujo de un fluido en un conducto se ve afectado por diversos factores como el diámetro del conducto, la viscosidad del fluido y las fuerzas externas que actúan sobre el mismo (Streeter y Wylie, 2009).

Según Cohen y Kundu (2008), "el comportamiento de los fluidos es complejo y no puede entenderse sin considerar las interacciones entre las moléculas y los efectos de la viscosidad en el movimiento" (p. 120).

El caudal de fluido es fundamental para resolver problemas relacionados con el transporte de líquidos y gases, ya que permite analizar cómo varía el flujo en función de la geometría del conducto (Cohen y Kundu, 2008).

El caudal de un fluido es una magnitud constante, lo que implica que en un flujo estable, el caudal volumétrico se mantiene inalterado a lo largo de una tubería. De hecho, la simulación de caudal en conductos y sistemas complejos permite predecir el comportamiento de los fluidos en condiciones difíciles de medir experimentalmente (Anderson, 2017).

El caudal es un parámetro clave en el diseño de sistemas de distribución de fluidos, ya que determina la cantidad de fluido que debe ser transportada para cumplir con los requerimientos operacionales (Müller y Johnson, 2007).

2.3.1 Descripción de los dimensiones de la investigación

- Dinámica de fluidos, es una subdisciplina de la mecánica de fluidos que se enfoca en el estudio del comportamiento de los fluidos en movimiento, es decir, cómo los líquidos y gases

reaccionan ante las fuerzas que influyen sobre ellos. Este ámbito examina variables como la velocidad, la presión, la temperatura y las fuerzas internas dentro de los fluidos, además de los efectos que generan su interacción con los sólidos cercanos. Su aplicación abarca diversas áreas, tales como la ingeniería, la meteorología, la oceanografía y la física (Batchelor, 2000).

- Según Panton (2013), la dinámica de fluidos aborda las fuerzas que afectan el movimiento de los fluidos, incluyendo los efectos de la viscosidad, la presión y la velocidad del flujo.
- Munson et al. (2006), señalan que "el entendimiento de los flujos turbulentos y su modelado matemático es uno de los mayores retos en la dinámica de fluidos debido a su complejidad inherente" (p. 135).
- Para Cohen y Kundu (2008), "el estudio de la dinámica de fluidos involucra no solo las propiedades físicas de los fluidos, sino también las interacciones con los entornos circundantes, lo que se traduce en aplicaciones tan diversas como la meteorología, la ingeniería hidráulica y la biología" (p. 203).
- Especialidad de mecánica de suelos, examina la porosidad se centra en analizar la organización y disposición de los vacíos dentro del suelo, denominados poros. La porosidad es una

característica fundamental que influye en el comportamiento del suelo, ya que afecta su capacidad para retener agua, permitir el paso de fluidos y responder a las cargas externas. Un suelo con mayor porosidad contiene más espacio vacío, lo cual puede influir en su estabilidad y resistencia, aspectos esenciales en la construcción y en las obras geotécnicas (Braja, 2010).

- Holtz y Kovacs (2011) mencionan que "la mecánica de suelos también estudia los fenómenos de consolidación y flujo en los suelos, lo que influye en el comportamiento de los cimientos y otras estructuras enterradas" (p. 78).
- Según Mitchell y Soga (2005), "una de las principales dificultades en la mecánica de suelos es la variabilidad natural del material, lo que hace que el comportamiento del suelo sea complejo y difícil de predecir" (p. 45).

2.3.2 Descripción de los Indicadores de la investigación

- Una línea de corriente es una línea en la que, en cada punto, es tangente a la dirección del flujo. En flujos estacionarios, las líneas de corriente se alinean con las trayectorias de las partículas del fluido (White, 2011).
- Las líneas de corriente son una herramienta visual esencial para comprender el comportamiento del fluido en flujos estacionarios,

particularmente cuando se simulan los resultados en la dinámica de fluidos computacional (Anderson, 2017).

- Las líneas de corriente son una representación simplificada del comportamiento de un fluido en movimiento, y facilitan la comprensión de cómo las partículas del fluido interactúan a lo largo del flujo (Lamb, 1932).
- La presión en un flujo de agua puede cambiar dependiendo de factores como la velocidad y la profundidad del fluido, lo que es esencial para analizar flujos en sistemas cerrados y abiertos (Shames, 1992).
- En un flujo de agua, la presión es un factor determinante para el comportamiento del fluido y juega un papel crucial en el diseño de sistemas hidráulicos (Som y Joshi, 2008).
- La presión en un fluido está asociada con la distribución de energía dentro del flujo, siendo esencial para la dinámica del flujo de agua en sistemas tanto abiertos como cerrados (Batchelor, 2000).
- La permeabilidad de un medio para el paso del agua está determinada por la estructura y distribución del tamaño de los poros, lo que influye en su capacidad para facilitar el flujo de agua (Chaudhry, 2014).

- La permeabilidad es una propiedad de los medios porosos que describe la capacidad de un fluido para fluir a través de ellos bajo una diferencia de presión aplicada (Bear, 1972).
- La permeabilidad es una propiedad fundamental de los suelos y materiales geológicos que afecta la velocidad y volumen del flujo de agua en aplicaciones de ingeniería (Holtz y Kovacs, 1981).
- La porosidad de los materiales determina la cantidad de agua que puede ser almacenada y transmitida, afectando la dinámica del flujo subterráneo en acuíferos y otros medios porosos (Domenico y Schwartz, 1990).
- El valor de la porosidad de un medio juega un papel importante en el modelado del flujo de agua subterránea, ya que influye en la capacidad del medio para almacenar y transmitir agua (Verruijt y Bear, 1987).
- La porosidad en medios porosos es una propiedad crítica para comprender cómo el agua se mueve a través de su estructura, influyendo en la velocidad y la cantidad de agua transportada (Luo y Ranjith, 2015).

2.3.3 Método Crank Nicolson

El método de Crank–Nicolson, utilizado para resolver ecuaciones diferenciales parciales parabólicas, fue creado por John Crank y Phyllis

Nicolson en la mitad del siglo XX. En 1947, Crank y Nicolson propusieron un enfoque práctico para la solución numérica de ecuaciones diferenciales parciales relacionadas con la conducción de calor. Más tarde, en 1953, Fort y Frankel modificaron el esquema explícito básico, demostrando que su variante era considerablemente más estable, lo que posibilitaba el uso de pasos de tiempo más grandes (Crank y Nicolson, 1996).

El método de Crank-Nicolson proporciona un esquema implícito alternativo que alcanza una precisión de segundo orden, tanto en el espacio como en el tiempo (Chapra y Canale, 2006).

El uso de una simulación numérica para analizar un problema específico generalmente requiere una planificación detallada del modelo matemático a emplear y de los algoritmos necesarios para resolverlo. A través de los métodos numéricos, se obtiene la solución aproximada de problemas, ya sea que se conozca o no su solución analítica (Lascano, 2023).

La implementación de los métodos de diferencia finita y Crank-Nicolson es poco estudiada, usualmente por razones de tiempo docente. Siendo así, las diferencias en estabilidad y precisión de los resultados quedan quizás en una mención en las clases teóricas, pero nunca vista en la práctica.

Según (Fitts, 2013), la ecuación básica que gobierna el flujo de agua en un acuífero libre saturado es la ecuación de difusión de la carga hidráulica, que se expresa generalmente en términos de la ecuación de Darcy. Para el flujo unidimensional en un acuífero libre saturado, la ecuación de difusión de la carga hidráulica es:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{K}{S} \frac{\partial^2 h}{\partial x^2}$$

Donde:

h : es la carga hidráulica

k : es la conductividad hidráulica del acuífero

S : es el almacenamiento específico del acuífero

t : es el tiempo

x : es la coordenada espacial a lo largo del acuífero.

El método de Crank-Nicolson es un método implícito que promedia las evaluaciones en el tiempo t y $t + \Delta t$ lo que lo hace más estable que otros métodos explícitos. Para discretizar la ecuación en el tiempo y el espacio (Bear, 1979), aplicamos las siguientes aproximaciones:

- Discretización temporal:

En el método de Crank-Nicolson, la derivada temporal se discretiza como un promedio entre el valor en t y en $t + \Delta t$:

$$\frac{h_i^{n+1} - h_i^n}{\Delta t} = \frac{1}{2} \left[\frac{K}{S} \left(\frac{h_{i+1}^{n+1} - 2h_i^{n+1} + h_{i-1}^{n+1}}{\Delta x^2} + \frac{h_{i+1}^n - 2h_i^n + h_{i-1}^n}{\Delta x^2} \right) \right]$$

- Discretización espacial:

La segunda derivada espacial (en x) se discretiza utilizando diferencias finitas centradas:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \approx \frac{h_{i+1} - 2h_i + h_{i-1}}{\Delta x^2}$$

- Esquema Crank Nicolson:

Sustituyendo las aproximaciones en la ecuación anterior, obtenemos el siguiente sistema de ecuaciones que debe resolverse para encontrar los valores de la carga hidráulica h_i^{n+1} en el siguiente paso $n + 1$:

$$\frac{h_i^{n+1} - h_i^n}{\Delta t} = \frac{K}{2S} \left[\frac{h_{i+1}^{n+1} - 2h_i^{n+1} + h_{i-1}^{n+1}}{\Delta x^2} + \frac{h_{i+1}^n - 2h_i^n + h_{i-1}^n}{\Delta x^2} \right]$$

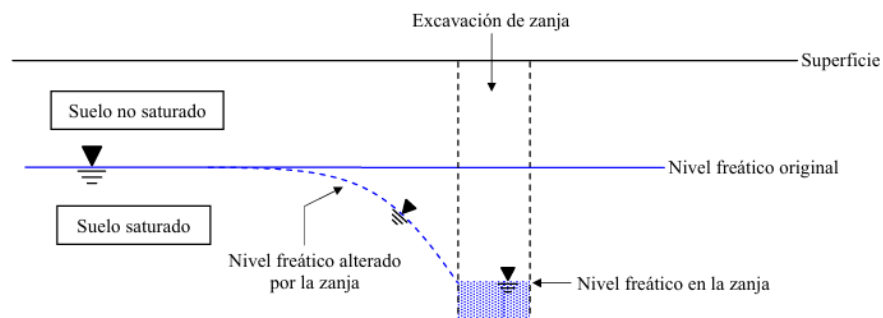
Este es un sistema de ecuaciones lineales que puede resolverse para encontrar los valores de h_i^{n+1} cada paso de tiempo.

En este estudio, se pretende analizar el impacto que tiene una excavación en un terreno saturado homogéneo con permeabilidad K

conocida. Para ello, se propone llevar a cabo un análisis de flujo en condiciones no estacionarias (transitorias) bajo una configuración de acuífero libre, como se ilustra en la figura 1.

Figura 1

Esquema generalizado para la geometría de una excavación en acuífero libre.



Nota. Tomado del libro *Solución numérica de ecuaciones diferenciales ordinarias y parciales* (Pino, 2020).

La resolución de un problema de flujo consiste en determinar el nivel piezométrico h y, por lo tanto, el caudal Q que se filtra en la zanja debido al gradiente de presión del agua:

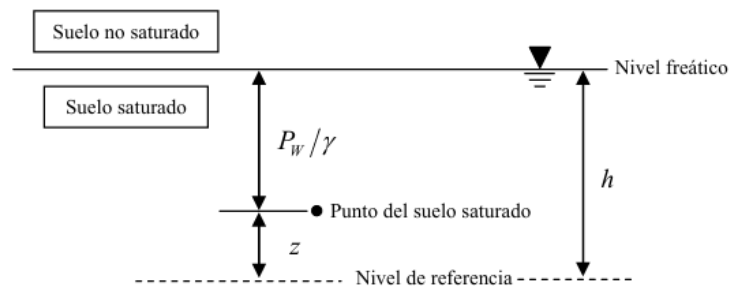
$$h = z + \frac{P_w}{\gamma}$$

En esta ecuación, z representa la altitud de un punto del suelo, expresada en unidades de longitud sobre un nivel de referencia; P_w es la presión del agua, medida en unidades de fuerza por unidad de longitud; y

γ el peso específico del agua (fuerza por unidad de superficie), y la relación $\frac{P_w}{\gamma}$ indica la presión expresada en términos de la altura de la columna de agua sobre dicho punto del suelo. La figura 2 ilustra un acuífero libre.

Figura 2

Representación nivel piezométrico con geometría del acuífero libre.

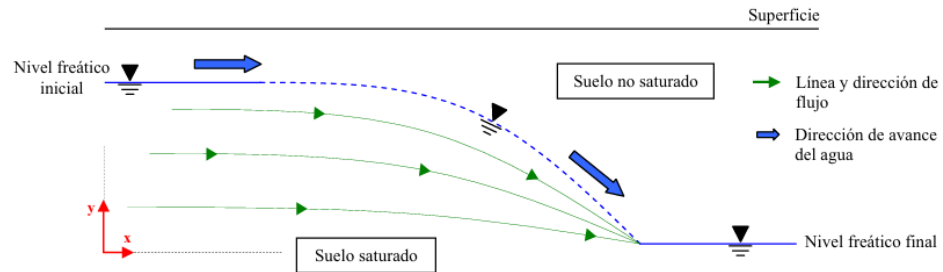


Nota. Tomado del libro *Solución numérica de ecuaciones diferenciales ordinarias y parciales* (Pino, 2020).

Así que, el nivel piezométrico tiene unidades de longitud y en este caso, dado que no hay confinamiento, coincide con el nivel freático (la cota que marca la separación física entre la parte saturada y la no saturada del terreno), tal como se observa en la figura 3.

Figura 3

Comportamiento del flujo en un acuífero libre.



Nota. Tomado del libro *Solución numérica de ecuaciones diferenciales ordinarias y parciales* (Pino, 2020).

No obstante, bajo condiciones en las que las líneas equipotenciales sean lo más verticales posibles, la denominada hipótesis de Dupuit supone un flujo exclusivamente horizontal, lo que simplifica el problema a uno estrictamente unidimensional. Así, se puede considerar:

$$h(x, y) = h(x) \text{ y } Q(x, y) = Q(x)$$

Para un planteamiento físico, zanja en terreno saturado y heterogéneo se tiene las siguientes hipótesis básicas del problema.

- Se asume la hipótesis de Dupuit
- Suelo homogéneo, isótropo y saturado

- Análisis transitorio, por lo tanto, el nivel piezométrico como el caudal depende también del tiempo $h(x) = h(x, t)$ y $Q(x) = Q(x, t)$.

El desplazamiento del agua a través del terreno está descrito por la ley de flujo de Darcy, que explica cómo el agua se mueve desde un nivel piezométrico más alto hacia uno más bajo:

$$q(x, t) = -K \cdot \nabla h(x, t) \quad \dots(1)$$

El problema general del flujo difusivo (sin tener en cuenta los términos de reacción ni de convección) en una geometría de acuífero libre está regido por la siguiente ecuación en derivadas parciales:

$$S_s \frac{\partial h(x, t)}{\partial t} = -\nabla \cdot q(x, t) + r \quad \dots(2)$$

- Recarga r (constante): Se refiere al caudal de agua que ingresa al acuífero debido a procesos activos en la superficie, expresado en unidades de volumen por unidad de tiempo. Su valor depende principalmente de la capacidad de infiltración del terreno.
- Coeficiente de almacenamiento específico S_s (constante): Se refiere al volumen de agua liberado por cada unidad de volumen del acuífero cuando el nivel piezométrico desciende una unidad. Se expresa en unidades inversas de longitud y los valores típicos

adoptados en acuíferos libres de espesor unitario varían entre $0,3 \text{ m}^{-1}$ y $0,01 \text{ m}^{-1}$.

Aplicando la ley de Darcy (1) a la ecuación (2) se obtiene:

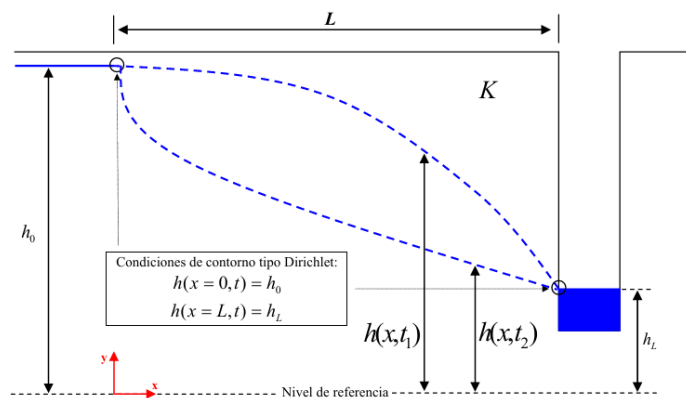
$$S_s \frac{\partial h(x, t)}{\partial t} = \nabla \cdot K \cdot \nabla h(x, t) + r = K \cdot \nabla \cdot (\nabla h(x, t)) + r$$

Debido a que el dominio espacial de la variable de estado $h(x, t)$ es unidimensional, el desarrollo del término de la divergencia $\nabla \cdot (\nabla h(x, t))$ se simplifica en la siguiente ecuación en ecuaciones de derivadas parciales (EDP) parabólica 1D. Se expresa de la siguiente forma:

$$S_s \frac{\partial h(x, t)}{\partial t} = K \frac{\partial^2 h(x, t)}{\partial x^2} + r$$

Figura 4

Condiciones de contorno tipo Dirichlet



Nota. Tomado del libro *Solución numérica de ecuaciones diferenciales ordinarias y parciales* (Pino, 2020).

En las variables y los parámetros de un modelo de excavación en un terreno saturado y homogéneo, se muestran dos curvas de nivel piezométrico correspondientes a dos momentos diferentes en el tiempo ($t_1 < t_2$).

La solución de este problema requiere dos condiciones de contorno, que en este caso se han establecido como de tipo Dirichlet (con valores preestablecidos para la variable): $h(x = 0, t) = h_0$ y $h(x = L, t) = h_L$. Estas condiciones de contorno, junto con el dominio de resolución $x \in [0, L]$ se muestran en la figura 5. Además, debido al carácter transitorio del problema, es necesario especificar una condición inicial que describa el estado del nivel piezométrico antes de realizar la excavación. En este caso, el nivel original es h_0 (véase figuras 1 y 4), por lo que la condición inicial es $h(x, t = 0) = h_0$.

El problema numérico: esquema de Solución.

Se busca resolver la siguiente ecuación en derivadas parciales parabólica unidimensional mediante un esquema de diferencias finitas, con un coeficiente constante (permeabilidad $k > 0$) e invariable en el tiempo, y condiciones de contorno de tipo Dirichlet.

Figura 5

Termino temporal y termino difusivo.

Término temporal **Término difusivo**

$$\begin{aligned}
 S_s \frac{\partial h(x,t)}{\partial t} &= K \frac{\partial^2 h(x,t)}{\partial x^2} + r \quad \forall x \in [0, L] \quad \forall t \in [0, T] \\
 h(x=0, t) &= h_0 \\
 h(x=L, t) &= h_L \\
 h(x, t=0) &= h_0
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

Nota. Tomado del libro *Solución numérica de ecuaciones diferenciales ordinarias y parciales* (Pino, 2020).

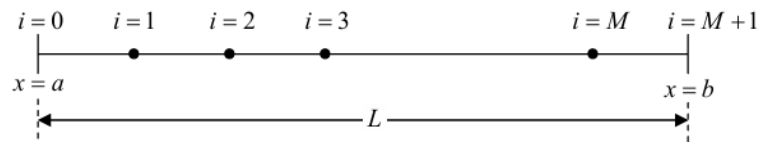
El objetivo es transformar la ecuación en derivadas parciales (5) en un problema discreto cuya solución da lugar a un sistema lineal de ecuaciones en cada paso de tiempo. Para lograr esto, es necesario establecer una discretización tanto espacial (en la dirección x) como temporal (en el tiempo t), tal como se ilustra en la figura 6.

$$x_i = x_0 + i\Delta x \quad i = 0, 1, \dots, M + 1$$

$$t^n = t_0 + n\Delta t \quad n = 0, 1, \dots, N \tag{6}$$

Figura 6

Discretización del problema en la dirección x.



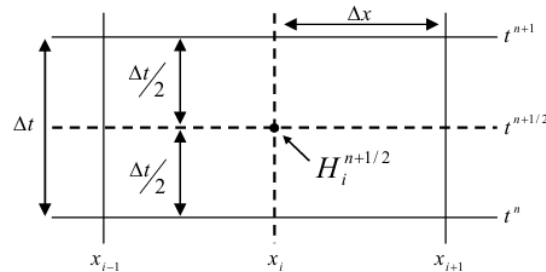
Nota. Tomado del libro *Solución numérica de ecuaciones diferenciales ordinarias y parciales* (Pino, 2020).

Al fin de hallar numéricamente la solución a la ecuación propuesta en términos temporal y difusivo, se impone que esta se verifique en un punto $x_i, 1 = 1, \dots, M$, y en un instante $t^{n+1/2}, n = 1, \dots, N - 1$, de la discretización (6). Para ello, de acuerdo con la siguiente figura 7, se denota el valor de la función $h(x_i, t^{n+1/2})$ como $t^{n+1/2}$ aproximándola por $H_i^{n+1/2}$.

$$S_S \left. \frac{\partial h(x,t)}{\partial t} \right|_i^{n+1/2} = K \left. \frac{\partial^2 h(x,t)}{\partial x^2} \right|_i^{n+1/2} + r \quad \dots(7)$$

Figura 7

Discretización del problema parabólico 1D.



Nota. Tomado del libro *Solución numérica de ecuaciones diferenciales ordinarias y parciales* (Pino, 2020).

La derivada temporal de la ecuación (7) se estima utilizando un esquema de diferencias finitas centradas con un paso $\Delta t/2$ y para aproximar el término difusivo (derivada espacial, no temporal) en el instante $t^{n+1/2}$, se realiza una interpolación lineal entre los instantes de tiempo t^n y t^{n+1} obteniendo la expresión:

$$\left. \frac{\partial^2 h(x,t)}{\partial x^2} \right|_i^n = \frac{h_{i-1}^n - 2h_i^n + h_{i+1}^n}{\Delta x^2} + O(\Delta x^2) \quad \dots(9)$$

$$\left. \frac{\partial^2 h(x,t)}{\partial x^2} \right|_i^{n+1} = \frac{h_{i-1}^{n+1} - 2h_i^{n+1} + h_{i+1}^{n+1}}{\Delta x^2} + O(\Delta x^2)$$

En adelante, para hallar la EDP discretizada, tan solo se debe de reemplazar las expresiones, teniendo en cuenta la interpolación lineal del término difusivo; sin embargo, para agilizar, el resultado se define al operador N como:

$$N(h_i^n) = h_{i-1}^n - 2h_i^n + h_{i+1}^n \quad \dots(10)$$

Teniendo como ecuación para el problema discreto:

$$h_i^{n+1} - h_i^n = \frac{1}{2}RN(h_i^{n+1}) + \frac{1}{2}RN(h_i^n) + \frac{\Delta t}{S_S}rO(\Delta t^2, \Delta x^2)$$

$$i = 1, \dots, M, \dots, n > 0$$

$$h_0^n = h_0, \dots, n > 0$$

$$h_{M+1}^n = h_L, \dots, n \geq 0$$

$$h_i^0 = h_0, \dots, i = 0, \dots, M + 1$$

$$R = \frac{K \Delta t}{S_S \Delta x^2}$$

En la ecuación anterior, se puede observar que cumple exactamente la EDP inicial debido a que involucra al término del error. Si se elimina dicho término, se obtiene la aproximación discreta deseada:

$$h_i^{n+1} - \frac{1}{2}RN(h_i^{n+1}) = h_i^n + \frac{1}{2}RN(h_i^n) + \frac{\Delta t}{S_S}r$$

$$i = 1, \dots, M, \dots, n > 0$$

$$h_0^n = h_0, \dots, n > 0$$

$$h_{M+1}^n = h_L, \dots, n \geq 0$$

$$h_i^0 = h_0, \dots, i = 0, \dots, M + 1$$

Si se sustituye el operador N, finalmente se tiene la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned}
 & -\frac{R}{2}(h_{i-1}^{n+1}) + (1 + R)h_i^{n+1} - \frac{R}{2}(h_{i+1}^{n+1}) \\
 & = \frac{R}{2}(h_{i-1}^n) + (1 - R)(h_i^n) + \frac{R}{2}(h_{i+1}^n) + \frac{\Delta t}{S_S}r
 \end{aligned}$$

$$i = 1, \dots, M, \dots, n > 0$$

$$h_0^n = h_0, \dots, n \geq 0$$

$$h_{M+1}^n = h_L, \dots, n \geq 0$$

$$h_i^0 = h_0, \dots, i = 0, \dots, M + 1$$

2.3.4 Experimental

El enfoque principal se centra en hallar soluciones numéricas a las ecuaciones diferenciales que rigen el transporte de masa, momento y energía en fluidos en movimiento. Se utiliza con frecuencia en combinación con experimentos y datos de campo. Facilita una descripción más ágil del flujo de fluidos sin necesidad de una formación extensa, como exigen los algoritmos de redes neuronales, y ofrece modelos más sólidos que satisfacen los requisitos de precisión para los resultados. La simulación experimental se dividió en cinco etapas principales: conceptualización, inicio del experimento, procedimientos experimentales y análisis de los

datos obtenidos. La primera etapa consistió en la conceptualización del modelo, que abarcó la elección de los medios porosos, la geometría, la estratigrafía, los valores iniciales y los supuestos específicos tomados en cuenta para cada evaluación experimental. A continuación, se dio inicio al experimento, lo que incluyó la aplicación de una técnica de empaquetamiento, así como los ajustes de la carga hidráulica y la concentración de NaCl (Chalá et al., 202).

En un experimento realizado en un tanque de arena, se observó una única interfaz de equilibrio entre agua salada y agua dulce, fenómeno que no se presenta en los análisis convencionales de acuíferos costeros. Durante el experimento, el aumento del nivel del agua subterránea detrás del malecón incrementó el gradiente de presión y la tasa de flujo del agua subterránea, lo que causó que la interfaz de agua salada y dulce se desplazara hacia el mar y formara una zona de agua dulce en el lecho marino frente al malecón. El análisis numérico permitió un estudio detallado de la distribución del nivel del agua subterránea, el flujo de agua subterránea, la interfaz entre agua de mar y agua dulce, así como las características de presión del agua intersticial en el acuífero costero con obstrucciones subterráneas (Lee et al., 2019) .

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1 Tipo de investigación

La investigación es considerada como aplicada al suscitar aplicaciones en el laboratorio de Hidráulica e Hidrología en la Escuela de Ingeniería Civil, es decir, aplicar los conocimientos teóricos en ensayos prácticos para la obtención de resultados. La investigación aplicada se caracteriza por la utilización de teorías y métodos para resolver problemas prácticos y específicos, con el objetivo de generar soluciones útiles en contextos reales (Hernández et al., 2014).

3.2 Diseño de investigación

Experimentalmente y numéricamente el enfoque es cualitativo (comprender las características visualmente) y cuantitativo (analizar respecto a mediciones). La investigación cualitativa se enfoca en el análisis profundo en la observación participante para obtener una comprensión detallada y contextualizada (Creswell, 2013).

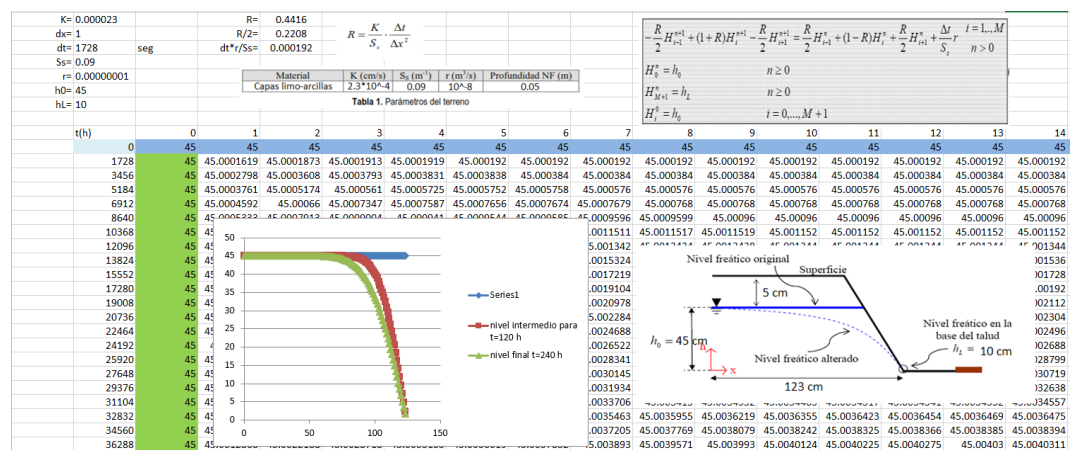
3.3 Procedimiento numérico

La ecuación y la solución utilizada por el método de Crank Nicolson se desarrolló en el Excel con el fin de obtener cálculos numéricos que se

iteran proporcionando una forma rápida de visualizar y obtener resultados es decir agilizar el procedimiento.

Figura 8

Cálculo numerico con excel



Y en Matlab para la solución planteada se propone el siguiente

código:

```

clc;clear;
L=123;%input('ingrese longitd L: ');
h1=45;%input('ingres nivel freatico inicial Ho: ');
h2=10;%input('ingrese nivel freatico final Hf: ');
t=1728;%input('ingrese tiempo de simulacion T:');
dx=1;%input('variacion de longitud dx: ');
dt=100;%input('variacion de del tiempo dt: ');
k=0.00023;%input('ingrese coef.permeabilidad k: ');
Ss=0.09;%input('ingrese coeficiente de alm.especifico Ss: ');
r=0.00000001;%input('ingrese recarga hidraulica r: ');
R=(k*dt)/(Ss*dx^2);
C=(dt/Ss)*r;
B=[25:dx:L];
n=length(B);
H=h1*ones(t,n);
for i=1:t-1

```

```

H(i,1)=h1;
H(i,n)=h2;
for j=2:n-1
    H(i+1,j)=((1-R)/(1+R))*H(i,j)+(R/(2*(1+R)))*(H(i,j-1)+H(i,j+1)+H(i+1,j-
1)+H(i+1,j+1))+C/(1+R);
end
H(i+1,n)=h2;
end

%disp(H);
plot(B,H)
%subplot(1,2,1); plot(B,H)
%subplot(1,2,2); plot (B,H)
%axis([9*L/10 L 4*h1/5 h1+1]);
title('simulacion de acuífero libre');
xlabel('longitud');
ylabel('nivel freatico');

```

3.4 Procedimiento experimental

Se hace imprescindible realizar ensayos en el Laboratorio de Hidráulica e Hidrología de la Escuela de Ingeniería Civil, en la que se utilizó el equipo HM 169 HM Visualización de Corrientes de Infiltración (figuras 9 y 10), cuyo manual de uso se adjunta en el anexo 1.

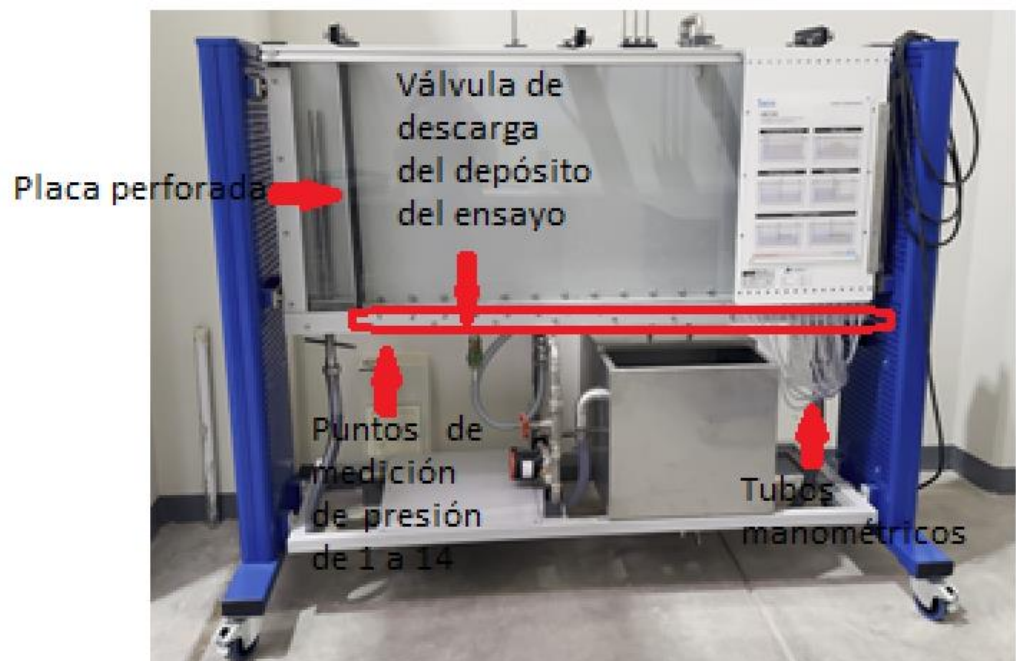
Para determinar el curso de líneas de corriente en un medio poroso contenido en una zanja, se pone condiciones de inicio antes de un ensayo la cual determina el comportamiento de las líneas de corriente, estas condiciones pueden variar en la zanja como la forma en que se llena la zanja con arena influye en la estructura del medio poroso; por ende, en la dirección y el flujo del agua, el llenado de agua, la cantidad y la forma en que se introduce el agua en la zanja también determina el comportamiento

del flujo en el medio poroso. La colocación de lanzas de inyección se utiliza para inyectar tinta en la zanja; su posición y orientación no afecta cómo se distribuye el flujo en el medio poroso, pero sí indica el comportamiento para la zona en que se pone la tinta.

Figura 9

Vista frontal del equipo de visualización de líneas de corrientes



Figura 10*Vista frontal del equipo*

3.4.1 Zanja de drenaje

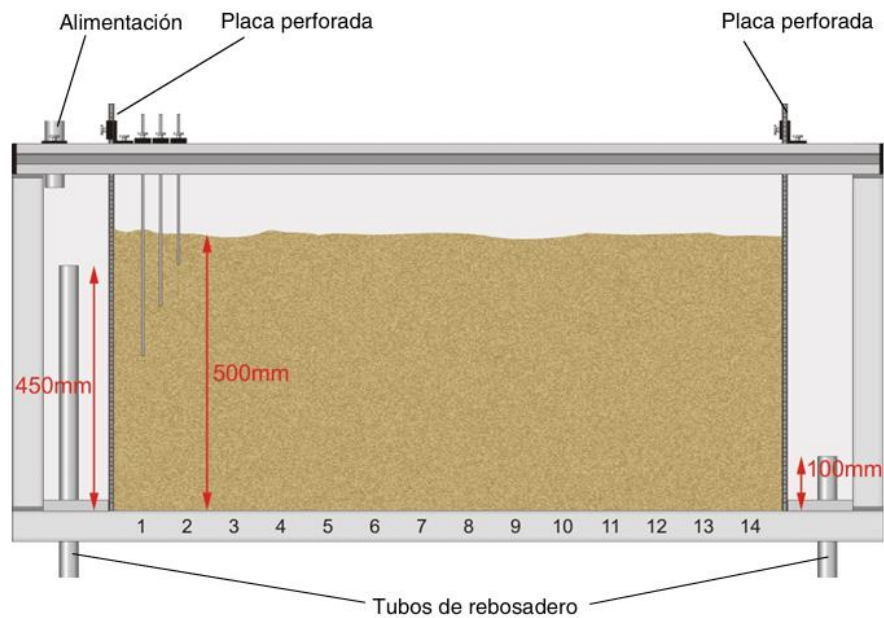
En este tipo de experimento, las líneas de corriente representan la trayectoria por donde fluye el agua. Estas líneas son un método gráfico para visualizar cómo se mueve el fluido a través de un medio poroso. En la cual, se determina el curso de las líneas de corriente. A continuación, se detalla el procedimiento a seguir.

- Para el llenado de la arena, debe haber aproximadamente 500 mm de arena sobre el fondo del depósito.

- Se ajustó el tubo de rebosadero izquierdo de modo que su borde superior quede aproximadamente 450 mm por encima del fondo del depósito de ensayo y del tubo rebosadero derecho para que su borde superior quede aproximadamente 100 mm por encima del fondo del depósito de ensayo.
- Se eliminó el aire de las lanzas de inyección y llenó el depósito con colorante previamente preparado fluoresceína en 500 ml de agua, posterior a ello ubicar las lanzas de inyección como se muestra en la figura 11.
- Se encendió la bomba para que el agua fluya lentamente en el depósito, la cual el caudal debe de ser constante.
- Se abrió lentamente las válvulas de las lanzas de inyección simultáneamente las tres para lograr ver las líneas de corriente.

Figura 11

Montaje experimental de la zanja de drenaje.



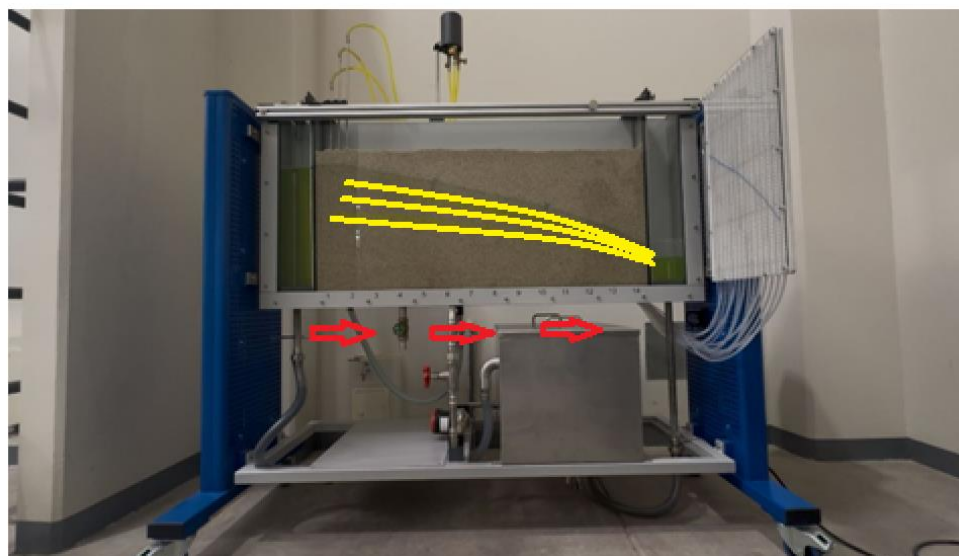
Nota. La imagen se tomó manual del equipo HM 169 Visualización de corrientes de infiltración.

Para el primer ensayo, se quitó el aire de la bomba, con ayuda de un destornillador; se prendió la bomba y llenó el depósito de agua, hasta alcanzar una altura de 10 cm respecto a su base, en el proceso de llenado de agua se observó que existe burbujas de aire en los tubos manométricos por lo que se purgó. Para evitar que el panel se incline, se purgó el aire utilizando una jeringa, extrayendo el aire de la parte superior del panel manométrico, conectando la jeringa a cada uno de los 14 tubos al panel.

De esta forma, el nivel de agua en el depósito coincide con la lectura mostrada en el panel manométrico. A continuación, se colocó la arena de cuarzo a 50 cm sobre la base del depósito de ensayo y se ajustó las alturas de los tubos rebosaderos, dejándolos a 45 cm en el lado izquierdo y 10 cm en el derecho respecto a la base del ensayo, las lanzas de inyección se colocaron a una distancia lateral de 2 cm y de 10 cm de altura entre ellas. Luego, se enciende la bomba y, cuando el caudal se estabiliza, se abrió las válvulas del depósito de colorante, como se muestra en la figura 12.

Figura 12

Procedimiento de la zanja de drenaje

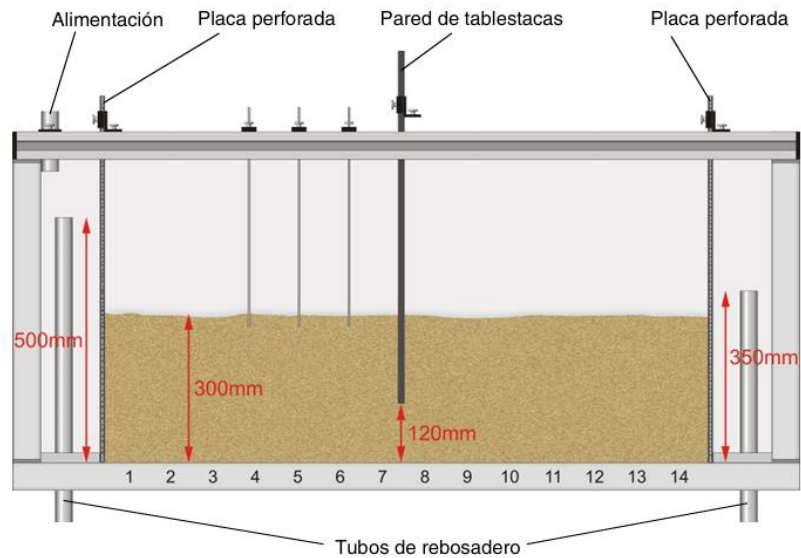


— Línea de corriente
→ Sentido del flujo

3.4.2 Pared de tablestacas

En este tipo de ensayo, se busca determinar el curso de las líneas de corriente considerando la integración de una tablestaca y ver la influencia de la restricción debajo de la pared de tablestaca en el flujo de infiltración obteniendo así la red de flujo y una lectura de presiones en el panel manométrico. A continuación, se detalla el procedimiento.

- La pared de la tablestaca se colocó en el medio del punto 7 o 8 a una altura de 120 mm desde la base del depósito del ensayo.
- El llenado de la arena fue hasta 300 mm aproximadamente de arena sobre el fondo del depósito.
- Se ajustó el tubo de rebosadero izquierdo de modo que su borde superior quede aproximadamente 500 mm por encima del fondo del depósito de ensayo y del tubo rebosadero derecho para que su borde superior quede aproximadamente 350 mm por encima del fondo del depósito de ensayo.
- Se eliminó el aire de las lanzas de inyección y llenó el depósito de colorante previamente preparado fluoresceína en 500 ml de agua; posterior a ello, ubicar las lanzas de inyección como se muestra en la figura 13.

Figura 13*Montaje experimental de la pared de tablestacas*

Nota. La imagen se tomó manual del equipo HM 169 Visualización de corrientes de infiltración.

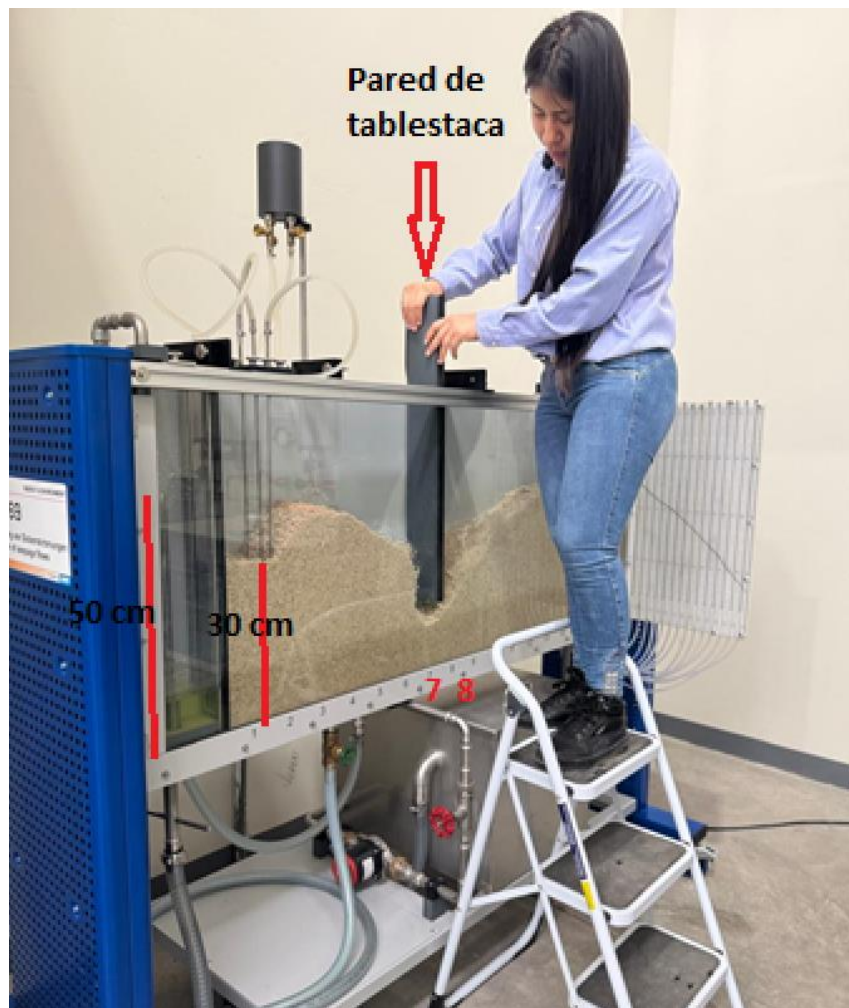
- Encender la bomba y deje que el agua fluya lentamente en el depósito, la cual el caudal debe de ser constante.

Luego de encender la bomba y asegurarse que el flujo sea constante, abrir las válvulas de las lanzas de inyección de la tinta.

En la figura 14, se muestra el procedimiento que se realizó.

Figura 14

Colocación de la pared de tablestaca



3.4.3 Fundamento 1

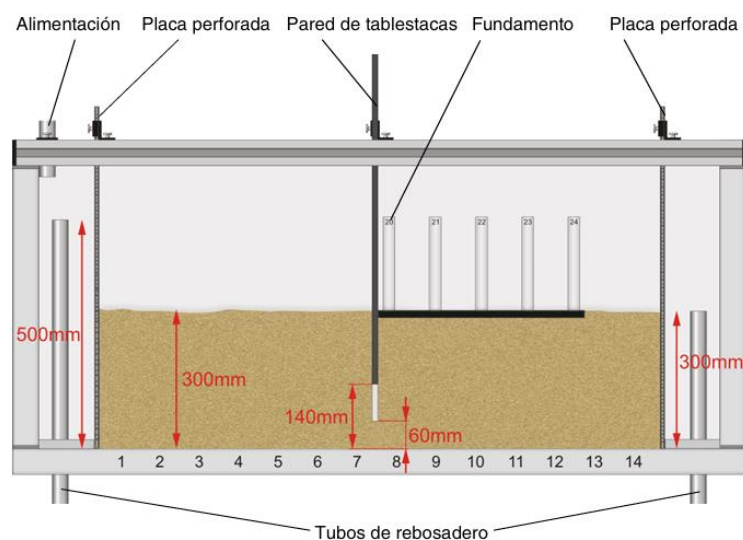
En este tipo de ensayo, se enfoca principalmente en determinar la presión del agua en un fundamento, variando la profundidad de la pared de tablestaca.

A continuación, se detalla el procedimiento.

- La pared de la tablestaca se colocó en el medio del punto 7 o 8 a una altura de 140 mm desde la base del depósito del ensayo.
- Se realizó el llenado de la arena a 300 mm aproximadamente de arena sobre el fondo del depósito.
- Se realizó el ajuste del tubo de rebosadero izquierdo de modo que su borde superior quede aproximadamente 500 mm por encima del fondo del depósito de ensayo y del tubo rebosadero derecho para que su borde superior quede aproximadamente 300 mm por encima del fondo del depósito de ensayo. (Figura 15)

Figura 15

Montaje experimental del fundamento.

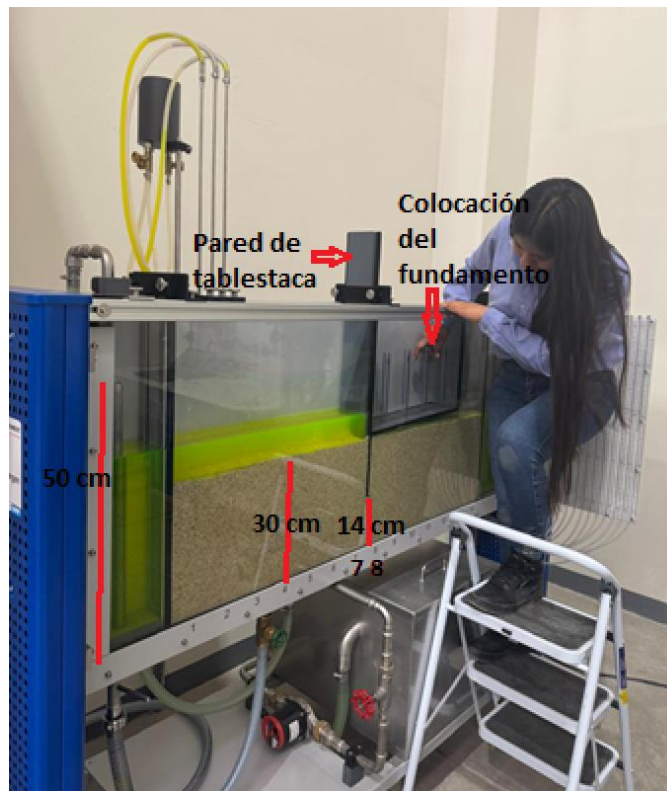


Nota. La imagen se tomó manual del equipo HM 169 Visualización de corrientes de infiltración.

En la figura 16, se aprecia que para este ensayo no se usó las lanzas de inyección, puesto que se ve la presión que se genera al colocar el accesorio fundamento que consta de una plaza con 5 tubos verticales. Este accesorio fundamento fue nivelado horizontalmente para garantizar la lectura correcta.

Figura 16

Colocación del accesorio fundamento



3.4.4 Fundamento 2

En este tipo de ensayo, se enfoca principalmente en determinar la presión del agua en un fundamento, variando la profundidad de la pared de tablestaca.

A continuación, se detalla el procedimiento.

- La pared de la tablestaca se colocó en el medio del punto 7 o 8 a una altura de 60 mm desde la base del depósito del ensayo
- El llenado de la arena fue aproximadamente 300 mm de arena sobre el fondo del depósito.
- El ajuste el tubo de rebosadero izquierdo de modo que su borde superior esté aproximadamente 500 mm por encima del fondo del depósito de ensayo y del tubo rebosadero derecho para que su borde superior esté aproximadamente 300 mm por encima del fondo del depósito de ensayo. (Figura 17)

Para este ensayo, solo varía la altura de la pared de tablestaca respecto a la base del ensayo a una altura de 6cm, las demás condiciones se mantienen tal cual al ensayo del fundamento 1; el fundamento debe de estar nivelado horizontalmente en los dos sentidos para evitar inclinaciones y tomar datos erróneos.

Figura 17

Nivelación horizontal del fundamento

**3.4.5 Muro de contención**

Este ensayo determina la presión que se ejerce al colocar el muro de contención en un medio poroso.

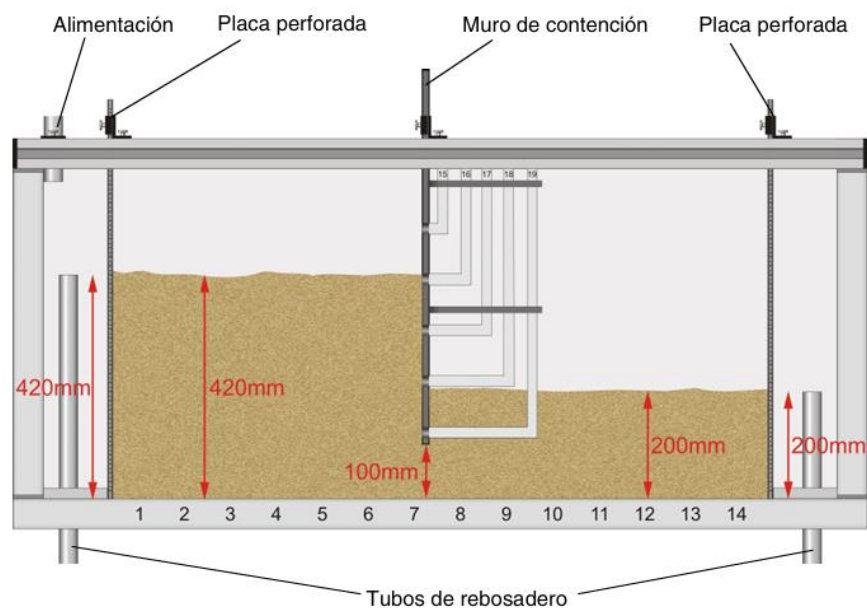
A continuación, se detalla el procedimiento.

- El muro de contención se colocó en el medio del punto 7 o 8 a una altura de 100 mm desde la base del depósito del ensayo.
- El llenado de la arena fue hasta aproximadamente 420 mm de arena sobre el fondo del depósito del lado izquierdo del muro de contención y 200 mm sobre el fondo del depósito al lado derecha del muro de contención.

- Se ajustó el tubo de rebosadero izquierdo de modo que su borde superior quede aproximadamente 420 mm por encima del fondo del depósito de ensayo y del tubo rebosadero derecho para que su borde superior quede aproximadamente 200 mm por encima del fondo del depósito de ensayo (figura 18).

Figura 18

Montaje experimental del muro de contención.

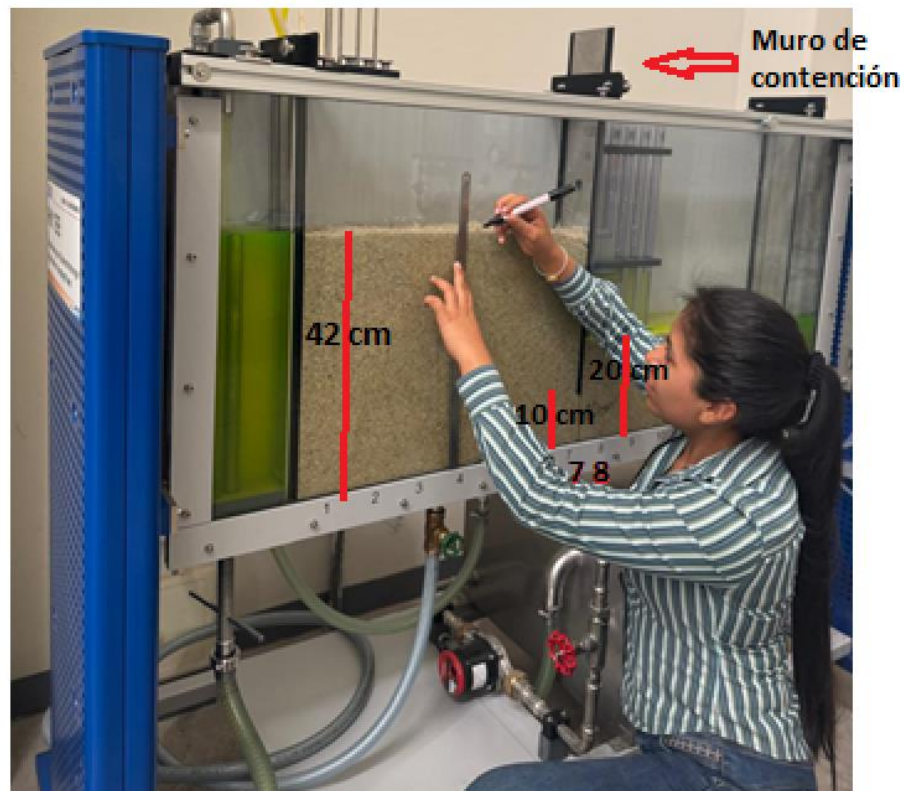


Nota. La imagen se tomó manual del equipo HM 169 Visualización de corrientes de infiltración.

En la figura 19 ya está colocado el muro de contención entre los puntos 7 y 8, a una altura de 10 cm por encima del nivel de la base. La altura de la arena a la izquierda del muro es de 42 cm, mientras que a la derecha es de 20 cm sobre el nivel de la base del ensayo. Se activa la bomba con el objetivo de mantener un caudal constante y poder medir las presiones en los tubos.

Figura 19

Medición de la arena en el depósito del ensayo.



La temperatura del entorno y del agua son a condiciones normales es decir a temperatura ambiente y no repercute en los resultados de los ensayos debido a que el comportamiento a analizar es cuando el agua está en movimiento de izquierda a derecha y es estudiado en un instante de tiempo. Sin embargo, si repercute en los resultados para cada uno de los ensayos, es el caudal que se le proporciona al equipo, se busca que sea constante, un buen indicador es cuando el tubo rebosadero izquierdo no desborde mucha agua al depósito de agua.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

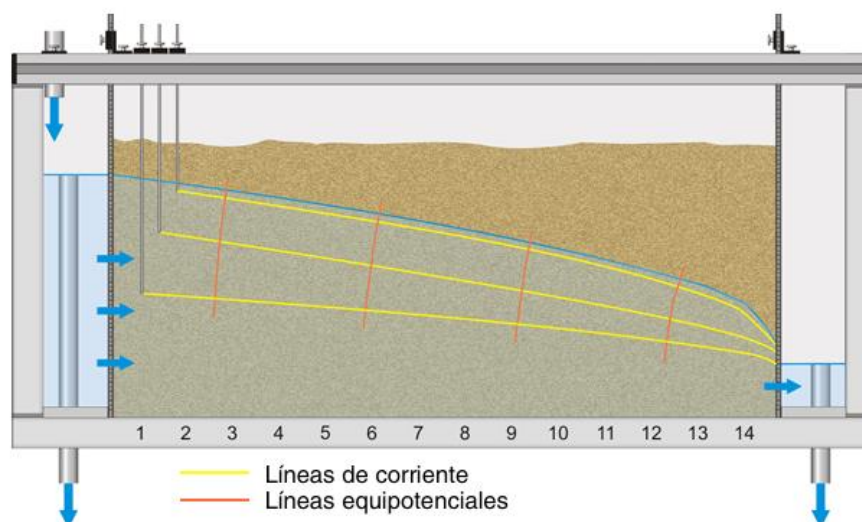
4.1 Resultado de la zanja de drenaje

4.1.1 Líneas de corriente según el manual

En la figura 20, se puede apreciar las líneas de corriente que representa las trayectorias del flujo generadas en este montaje experimental. Es claro que el movimiento del agua sigue el gradiente hidráulico existente entre los niveles de agua de los dos tubos rebosaderos.

Figura 20

Líneas de corriente en un medio poroso



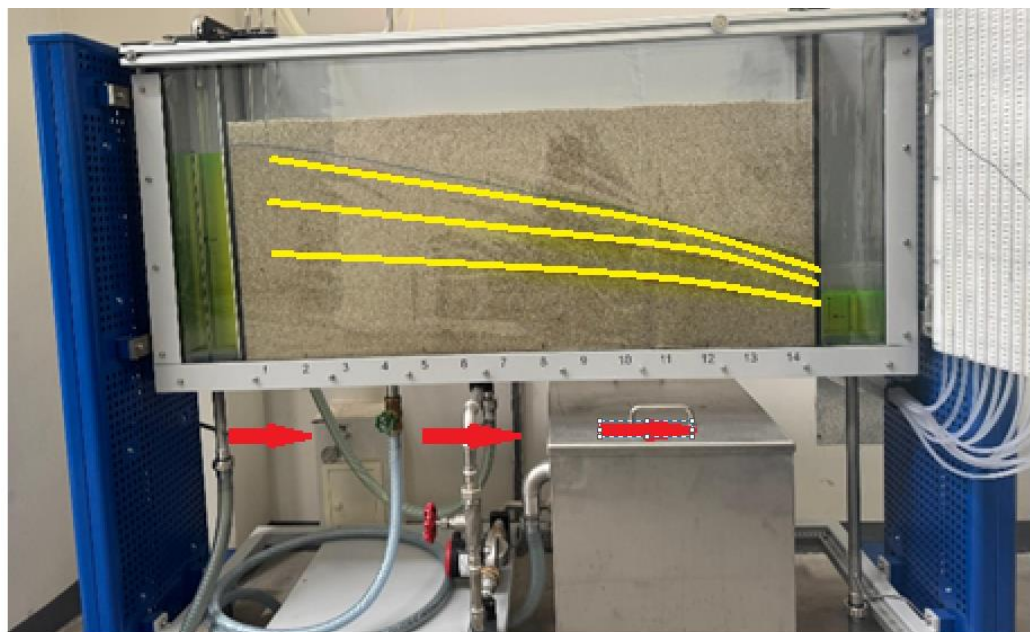
Nota. La imagen se tomó manual del equipo HM 169 Visualización de corrientes de infiltración.

4.1.2 Líneas de corriente según ensayo

En la figura 21, se aprecia la línea azul como la gradiente y las líneas amarillas como las líneas de corriente que se registró simultáneamente cuando se abrió las válvulas del depósito de tinta.

Figura 21

Experimentalmente líneas de corriente en un medio poroso



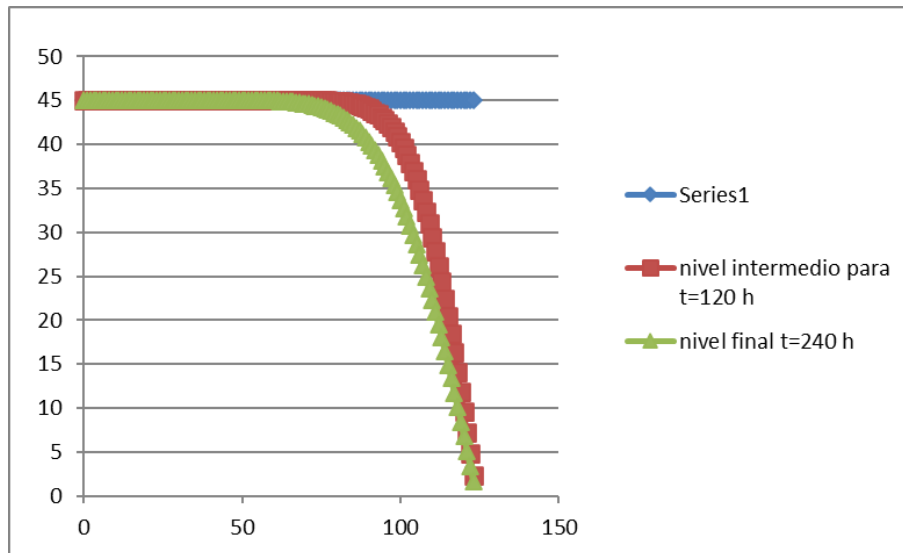
- Líneas de corriente
- ➔ Sentido de flujo

4.1.3 Líneas de corriente según numérico

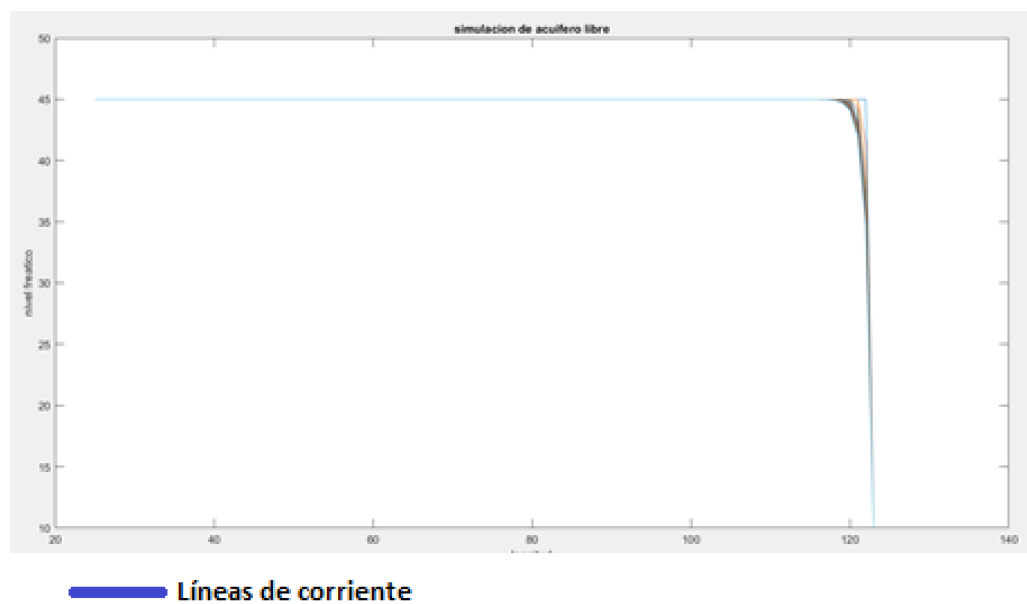
En la figura 22, se aprecia el resultado mediante Excel, mientras que, en la figura 23, se aprecia el resultado gráfico obtenido por el Matlab.

Figura 22

Curvas del nivel freático con excel

**Figura 23**

Curvas del nivel freático con Matlab

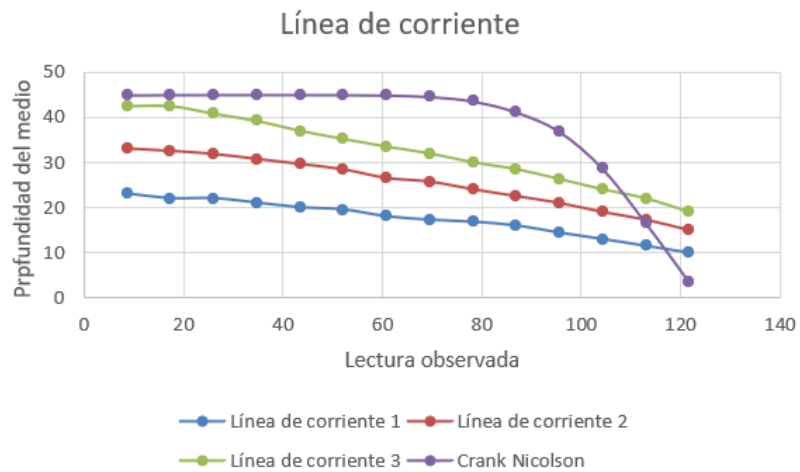


Las líneas de corriente se pueden visualizar experimentalmente en un periodo de tiempo debido a que el flujo continua y la tinta inyectada se difumina a medida que pasa el tiempo y se termina mezclando en todo el agua del depósito; por ello, los resultados deben ser marcados con plumón para poder así registrar las líneas de corriente y comparar a mayor detalle con la gráfica del manual y singularmente se asemejan, es decir, el comportamiento del flujo se verifica visualmente, de igual manera con la gráfica obtenida con Excel y Matlab.

En la figura 24, se observa que la gráfica refleja tres líneas de corrientes observadas experimentalmente. Dichos datos fueron tomados de la figura 21, el sentido del flujo del agua es de izquierda a derecha, y la línea morada es el cálculo numérico con el método de Crank Nicolson, tomados los datos de la figura 22.

Figura 24

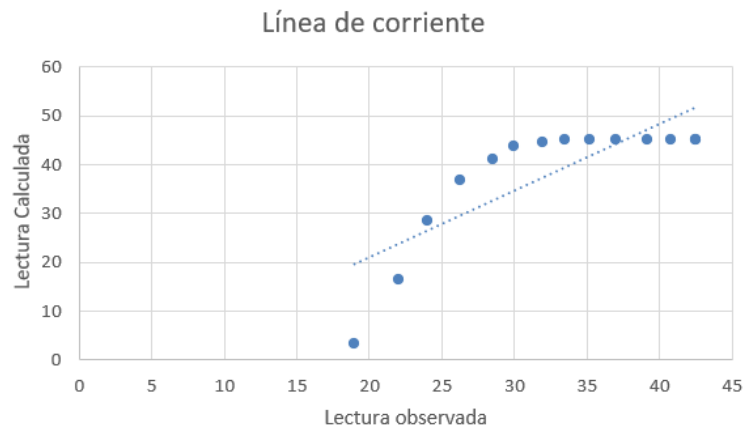
Comparación de líneas de corriente con el método de Crank Nicolson



En la figura 25, se toma a la línea de corriente 3 que se encuentra próxima a la línea de corriente hallada con el método de crank Nicolson para hacer el contraste de los resultados obtenidos.

Figura 25

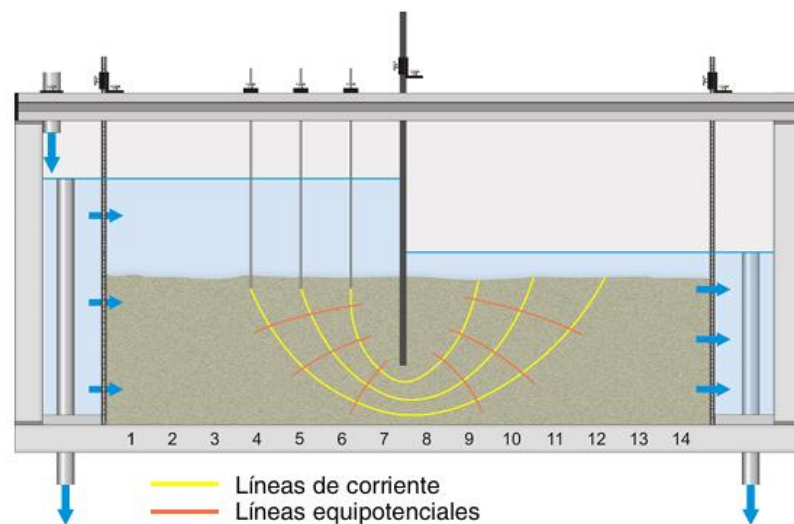
Contraste de resultados de lectura calculada vs lectura observada

**4.2 Resultado de la pared de tablestaca****4.2.1 Líneas de corriente según el manual**

En la figura 26, se muestra que el comportamiento del flujo se ve alterado debido a una interferencia, que en este caso corresponde a una pared de tablestaca.

Figura 26

Comportamiento de un flujo con una pared de tablestaca



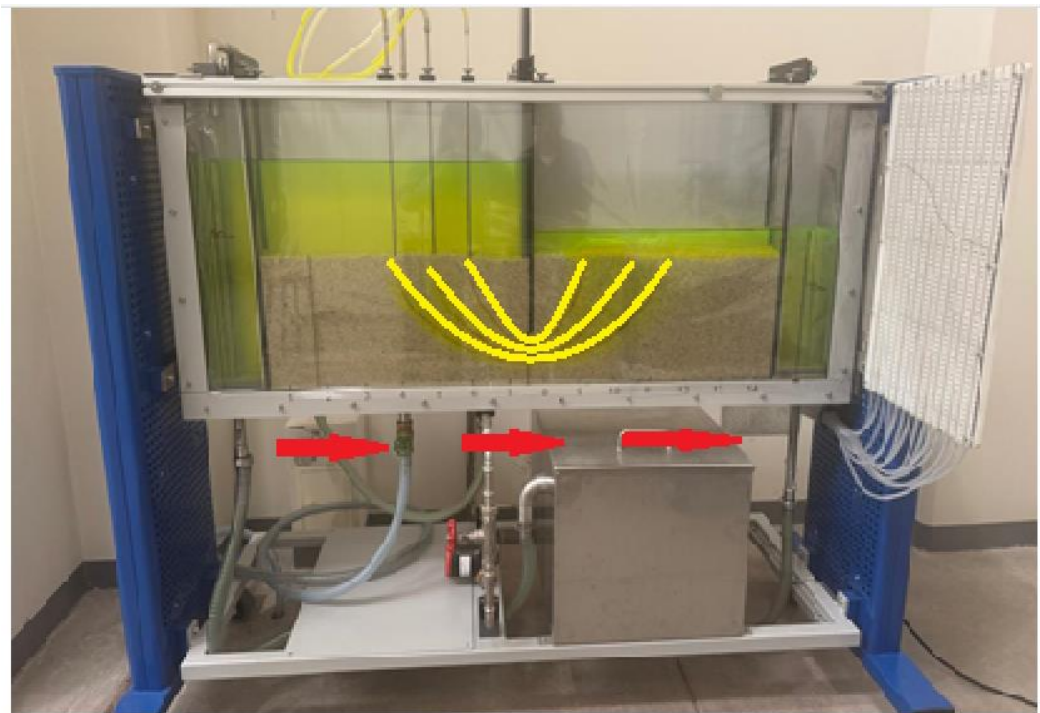
Nota. La imagen se tomó manual del equipo HM 169 Visualización de corrientes de infiltración.

4.2.2 Líneas de corriente según ensayo

En la figura 27, se observa que la influencia de la restricción debajo de la pared de tablestacas en el flujo de infiltración desvía el curso de la línea de corriente.

Figura 27

Líneas de corriente en un medio poroso con una tablestaca



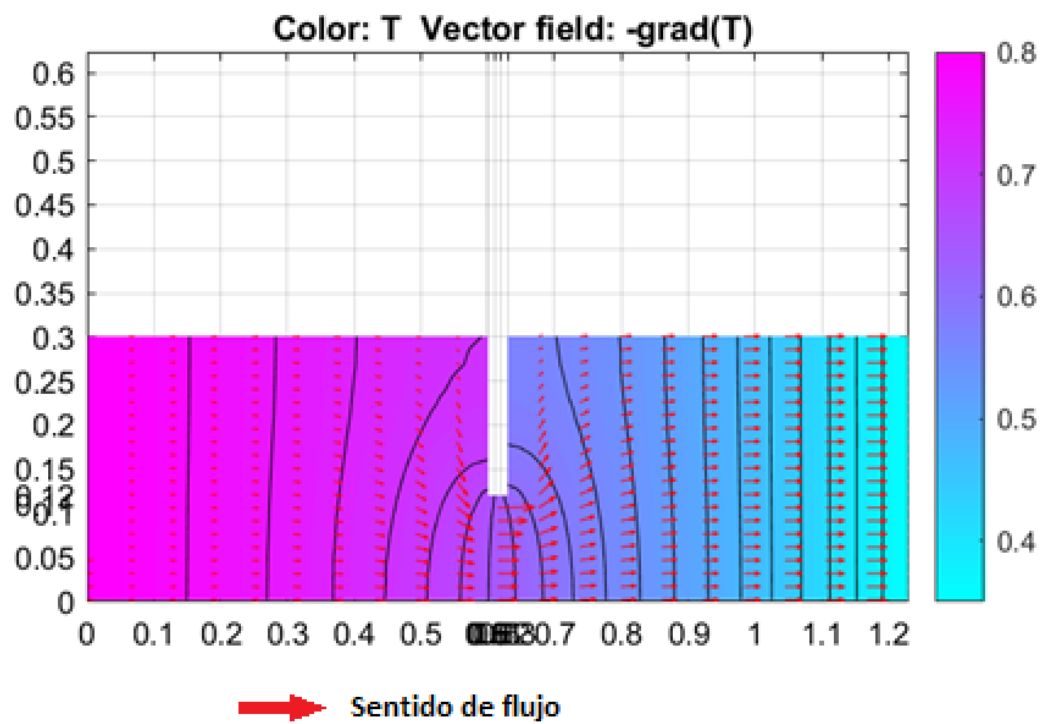
- Líneas de corriente
- ➔ Sentido de flujo

4.2.3 Líneas de corriente según Matlab

En la figura 28, para la modelación, se dibujó en Matlab con la función PDETOOL. Se observa las flechas de izquierda a derecha significa el sentido del flujo y de qué forma también se ve interferido por la colocación de la pared de tablestaca, se puso un rectángulo de similares dimensiones para luego quitar a la región donde se desplaza el flujo y se obtiene el siguiente resultado:

Figura 28

Líneas de corriente con Matlab



4.2.4 Lectura del panel manométrico según el manual

En las figura 29 y 30, se muestra los resultados a obtenerse en la lectura del panel manométrico de los respectivos 14 tubos manométricos.

Figura 29

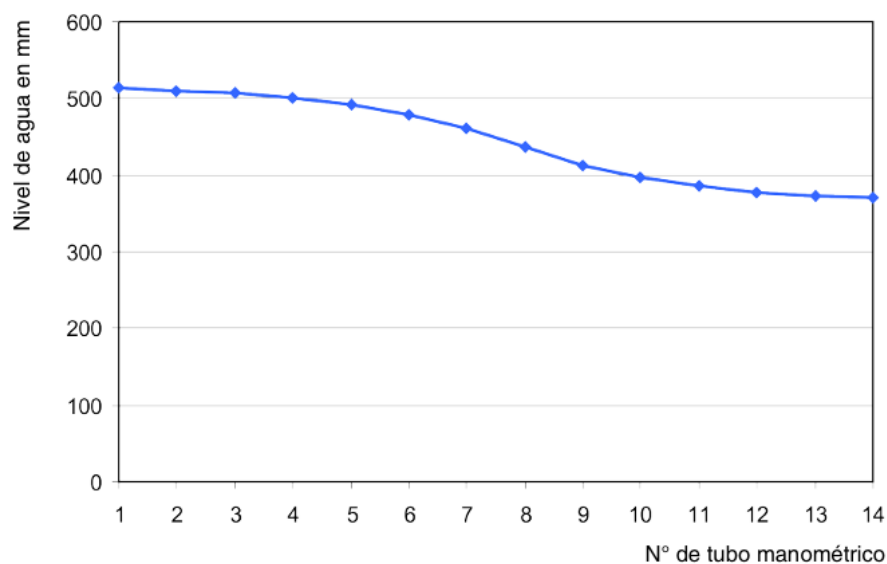
Lectura de las presiones con pared de tablestaca según el manual

N° de tubo manométrico	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Nivel de agua en mm	513	510	507	500	492	479	461	437	412	396	386	378	373	371

Nota. La imagen se tomó manual del equipo HM 169 Visualización de corrientes de infiltración.

Figura 30

Gráfico del nivel del agua vs N°de tubo manométrico



4.2.5 Lectura del panel manométrico según ensayo

En la figura 31, se registra todos los datos tomados durante la realización de los ensayos.

Figura 31

Datos tomados en la ejecución del ensayo para la pared de tablestacas.

Montaje experimental	
<input type="checkbox"/> Zanja de drenaje	<input type="checkbox"/> Presa
<input checked="" type="checkbox"/> Pared de tablestacas	<input type="checkbox"/> Muro de contención <input type="checkbox"/> Fundamento
Altura del lecho de arena:	
Unidad	300 mm sobre el suelo del depósito de ensayo
Diferente en la cuenca izquierda:	___ mm sobre el suelo del depósito de ensayo
en la cuenca derecha:	___ mm sobre el suelo del depósito de ensayo
Altura del tubo de rebosadero izquierdo:	500 mm sobre el suelo del depósito de
Altura del tubo de rebosadero derecho:	350 mm sobre el suelo del depósito de
Posición de la pared de tablestacas / muro de contención: Entre el punto de medición de presión <u>7</u> y <u>8</u>	
Borde inferior de la pared de tablestacas / muro de contención: <u>120</u> mm sobre el suelo	

N° de tubo manométrico	Nivel de agua en mm
1	513
2	509
3	504
4	498
5	489
6	475
7	453
8	422
9	400
10	381
11	378
12	376
13	371
14	369

N° de tubo de medición de la	Nivel de agua en mm
Modelo "muro de contención"	
15	
16	
17	
18	
19	
Modelo "fundamento"	
20	
21	
22	
23	
24	

Los resultados para este ensayo son similares a los resultados del manual, la cual es buen indicador de la correcta ejecución, y similar comportamiento al del Matlab. Esta similitud en resultados genera confianza en la utilización del equipo HM 169 para el análisis de las líneas de corriente.

4.3 Resultado del fundamento 1

4.3.1 Medición de presión según el manual

En la figura 32, se establece que se debería de registrar 4 lecturas en los tubos 20, 21, 22 y 23, siendo la última lectura 0 para el tubo N°24.

Figura 32

Ensayo del fundamento 1

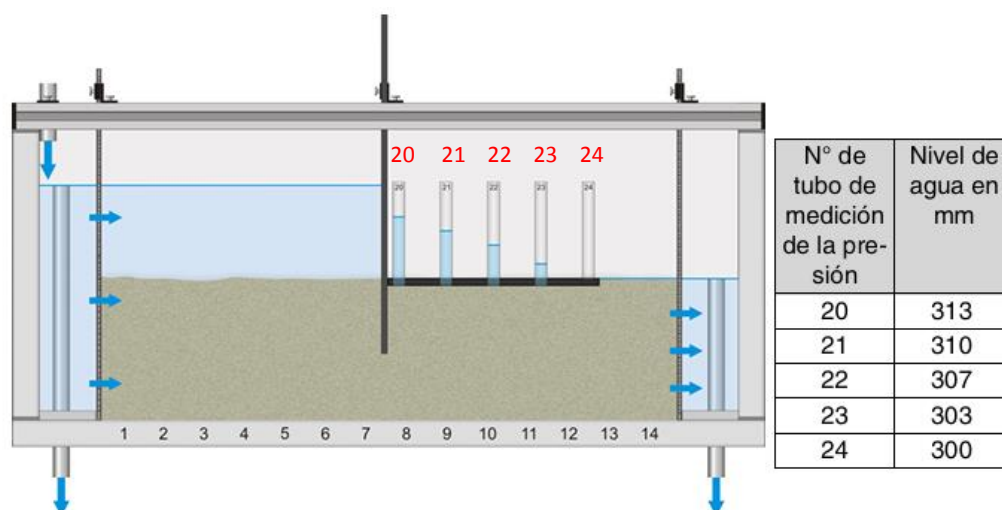


Figura 34

Datos tomados en la ejecución del ensayo para el fundamento 1

Montaje experimental	
<input type="checkbox"/> Zanja de drenaje	<input type="checkbox"/> Presa
<input type="checkbox"/> Pared de tablestacas	<input type="checkbox"/> Muro de contención <input checked="" type="checkbox"/> Fundamento
Altura del lecho de arena: Unidad <u>300</u> mm sobre el suelo del depósito de ensayo Diferente en la cuenca izquierda: <u> </u> mm sobre el suelo del depósito de ensayo en la cuenca derecha: <u> </u> mm sobre el suelo del depósito de ensayo	
Altura del tubo de rebosadero izquierdo: <u>500</u> mm sobre el suelo del depósito de	
Altura del tubo de rebosadero derecho: <u>350</u> mm sobre el suelo del depósito de	
Posición de la pared de tablestacas / muro de contención: Entre el punto de medición de presión <u>7</u> y <u>8</u>	
Borde inferior de la pared de tablestacas / muro de contención: <u>140</u> mm sobre el suelo	

N° de tubo manométrico	Nivel de agua en mm
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	
11	
12	
13	
14	

N° de tubo de medición de la	Nivel de agua en mm
Modelo "muro de contención"	
15	
16	
17	
18	
19	
Modelo "fundamento"	
20	350
21	341
22	335
23	327
24	320

En este ensayo, los valores obtenidos difieren de los resultados esperados según el manual. Se considera que esto se debe a que la unión entre la pared de tablestaca y el fundamento no lograba cerrar, lo que provocó la pérdida de presión. Para solucionar esto, se instaló un limpiatipo para cerrar esos huecos y evitar la fuga de presión. Sin embargo, las lecturas aún no coinciden.

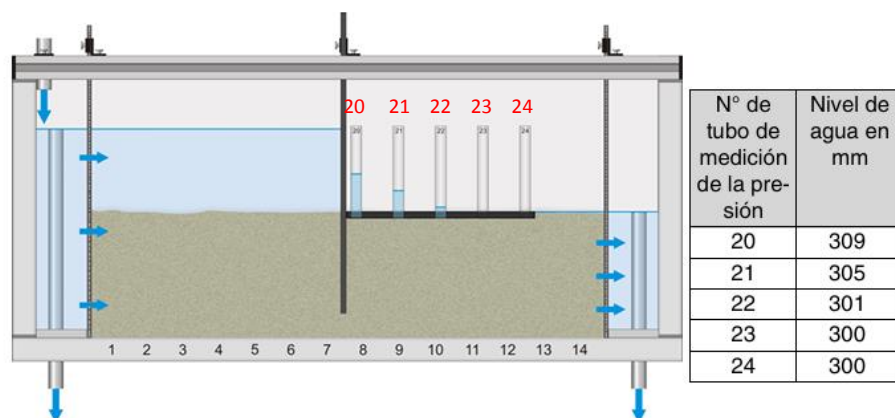
4.4 Resultado del fundamento 2

4.4.1 Medición de presión según el manual

En la figura 35, se establece que se debería de registrar tres lecturas en los tubos 20, 21, 22, siendo lectura 0 para el tubo 23 y 24.

Figura 35

Ensayo del fundamento 2

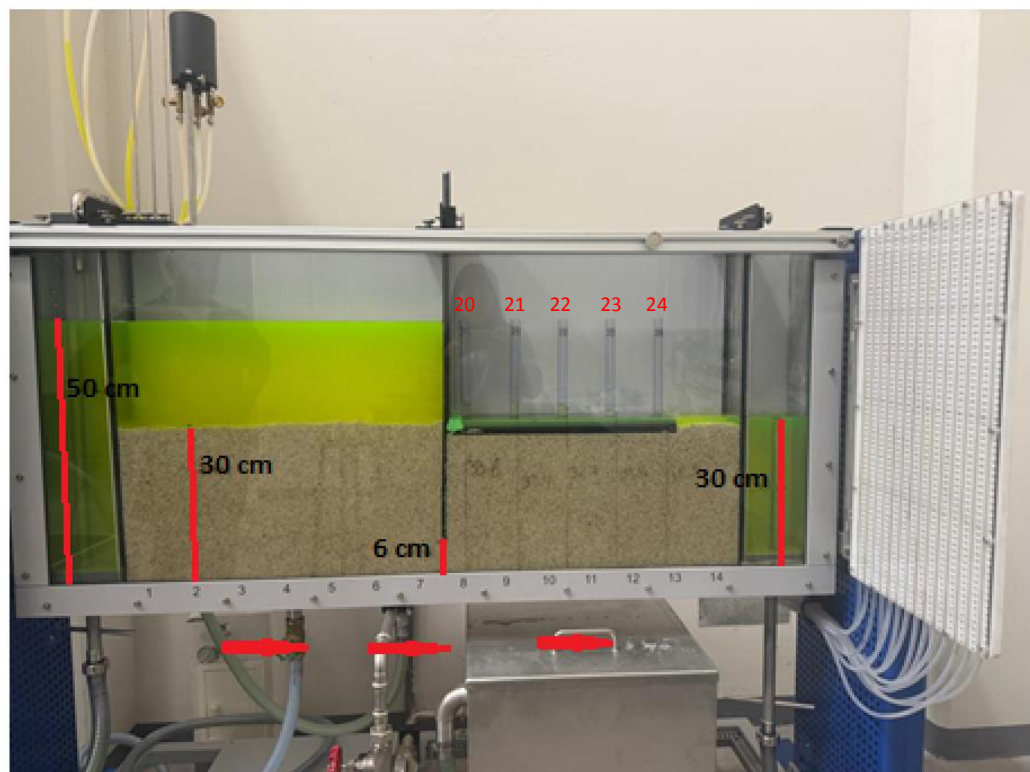


4.4.2 Medición de presión según ensayo

En la figura 36, se observa que registra cinco lecturas para los cinco tubos de medición y, en la figura 37, se anotó los datos obtenidos al realizar el ensayo.

Figura 36

Tablestaca a 60 mm sobre el nivel de la base del ensayo



→ Sentido de flujo

Figura 37

Datos tomados en la ejecución del ensayo para el fundamento 2

Montaje experimental	
<input type="checkbox"/> Zanja de drenaje	<input type="checkbox"/> Presa
<input type="checkbox"/> Pared de tablestacas	<input type="checkbox"/> Muro de contención <input checked="" type="checkbox"/> Fundamento
Altura del lecho de arena: Unidad <u>300</u> mm sobre el suelo del depósito de ensayo Diferente en la cuenca izquierda: <u> </u> mm sobre el suelo del depósito de ensayo en la cuenca derecha: <u> </u> mm sobre el suelo del depósito de ensayo	
Altura del tubo de rebosadero izquierdo: <u>500</u> mm sobre el suelo del depósito de	
Altura del tubo de rebosadero derecho: <u>350</u> mm sobre el suelo del depósito de	
Posición de la pared de tablestacas / muro de contención: Entre el punto de medición de presión <u>7</u> y <u>8</u>	
Borde inferior de la pared de tablestacas / muro de contención: <u>60</u> mm sobre el suelo	

N° de tubo manométrico	Nivel de agua en mm
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	
11	
12	
13	
14	

N° de tubo de medición de la	Nivel de agua en mm
Modelo "muro de contención"	
15	
16	
17	
18	
19	
Modelo "fundamento"	
20	336
21	334
22	327
23	318
24	308

Estos resultados en nivel de agua indica que se genera una fractura hidráulica, el cual se da cuando el suelo se encuentra sobresaturado de subterránea, el agua socaba al suelo y la fuerza ascensional del agua que se genera al colocar la tablestaca genera dicha fractura hidráulica.

Para este ensayo, los valores se encuentran diferentes a los resultados esperados según el manual. Esto se debe a que en la unión de la pared de tablestaca con el fundamento no se unían correctamente la cual hacía que la presión se pierda, para evitar la pérdida de presión se colocó un limpia tipo para poder cerrar lo orificios, sellando correctamente la unión de la tablestaca con el fundamento, permitiendo de esta forma no perder presión. Sin embargo, las lecturas registradas experimentalmente no se asemejan a las lecturas que se indican en el manual.

Tanto el ensayo del fundamento 1 como el fundamento 2 difieren en los resultados respecto al resultado del manual; no obstante, cabe resaltar que a medida que se instale más profundo la pared tablestaca la presión disminuye.

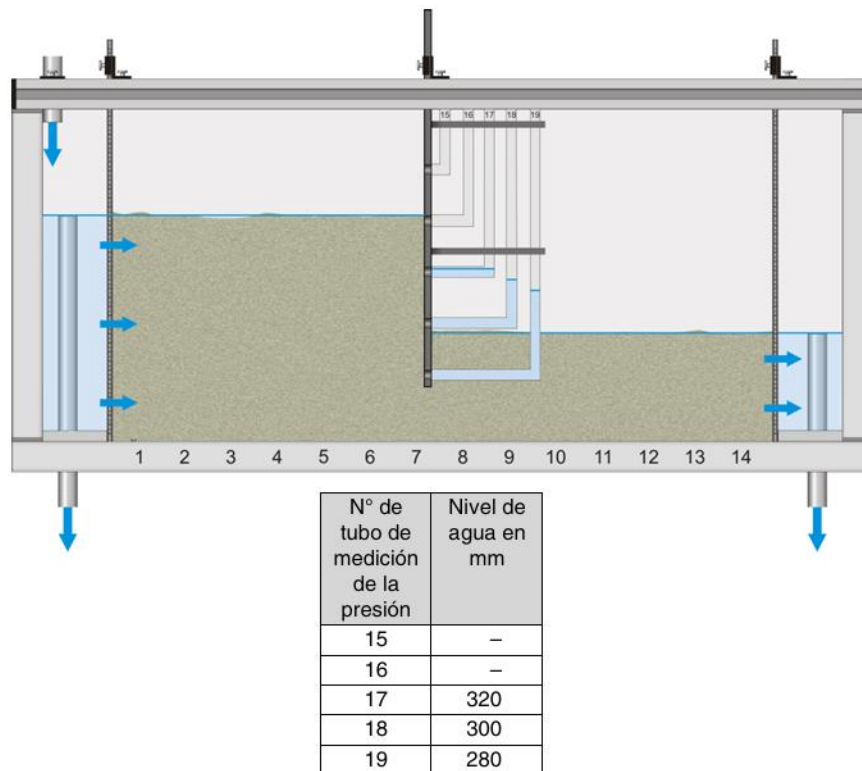
4.5 Resultado del muro de contención

4.5.1 Medición de presión según el manual

Para el último ensayo, se obtiene como resultado la lectura de presión como se indica en la figura 38.

Figura 38

La presión del agua existente en un muro de contención



4.5.2 Medición de presión según ensayo

En la figura 39, en el ensayo el medio poroso, la arena tiene color no se puede observar parte del tubo 19; sin embargo, se puede registrar las presiones como se detalla en la figura 40.

Figura 39

Presiones registradas para un muro de contención

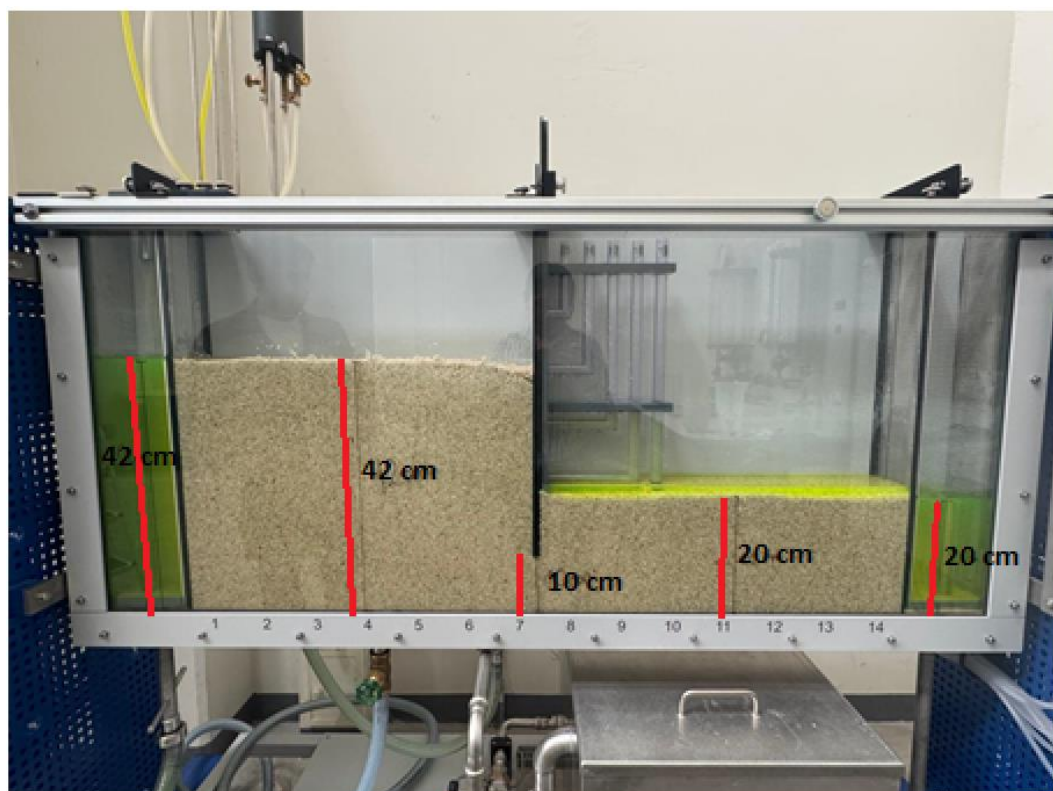


Figura 40

Datos tomados en la ejecución del ensayo para el muro de contención

Montaje experimental	
<input type="checkbox"/> Zanja de drenaje	<input type="checkbox"/> Presa
<input type="checkbox"/> Pared de tablestacas	<input checked="" type="checkbox"/> Muro de contención <input type="checkbox"/> Fundamento
Altura del lecho de arena:	
Unidad	_____ mm sobre el suelo del depósito de ensayo
Diferente en la cuenca izquierda:	<u>420</u> mm sobre el suelo del depósito de ensayo
en la cuenca derecha:	<u>200</u> mm sobre el suelo del depósito de ensayo
Altura del tubo de rebosadero izquierdo:	<u>420</u> mm sobre el suelo del depósito de
Altura del tubo de rebosadero derecho:	<u>200</u> mm sobre el suelo del depósito de
Posición de la pared de tablestacas / muro de contención:	Entre el punto de medición de presión <u>7</u> y <u>8</u>
Borde inferior de la pared de tablestacas / muro de contención: <u>100</u> mm sobre el suelo	

N° de tubo manométrico	Nivel de agua en mm
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	
11	
12	
13	
14	

N° de tubo de medición de la	Nivel de agua en mm
Modelo "muro de contención"	
15	-
16	-
17	360
18	350
19	330
Modelo "fundamento"	
20	
21	
22	
23	
24	

Como se puede ver, los valores son alejados a los valores esperados según el manual, debido a que el sistema de medición en el ensayo se hizo con regla debido a que los tubos en muro de contención no tienen medidas para cuantificar correctamente, respecto a los valores registrados en la figura 39 se detalla que tiene 3 lecturas de nivel del agua fue medido respecto al nivel de la base del depósito del agua.

4.6 Contratación de hipótesis principal

Para el ensayo de zanja de drenaje, sí se pudo realizar la comparación del comportamiento numérico y experimental en laboratorio del efecto de un dren sobre un acuífero libre saturado, la comparación se realizó mediante un gráfico de lectura calculada vs lectura observada, en el cual se contrasta que el comportamiento numérico se aproxima al comportamiento experimental, pero en los valores no son iguales.

Para el ensayo de tablestaca, no se pudo realizar la comparación numérica y experimental, debido a que no se pudo analizar el comportamiento numérico. Esto se debe a que se interpone un elemento en el medio poroso la cual no se considera en el modelo numérico; pero, se realizó una simulación con la herramienta PDEtool con Matlab, para poder ver la tendencia del comportamiento de un flujo ante la interferencia de un elemento incrustado que en este caso experimentalmente es una pared de tablestaca, la cual sí se realizó correctamente. Dicho gráfico

obtenido con la herramienta PDEtool simula las líneas de corriente, tal cual se demostró experimentalmente.

Para el ensayo de fundamento, no se pudo realizar la comparación numérica y experimental, debido a que no se pudo analizar el comportamiento numérico. Esto se debe a que el modelo numérico no contempla distintos elementos que interfieren en el medio, pues bien el fundamento es un elemento que permite ver las presiones que se dan en distintos puntos a lo largo de este elemento, experimentalmente tiene como objetivo ver las presiones si cambian a medida de que la pared de tablestaca sube o baja.

Para el ensayo de muro de contención, no se pudo realizar la comparación numérica y experimental debida a que no se pudo hacer el modelamiento numérico; sin embargo, experimentalmente sí se realizó, la cual tiene como criterio ver las presiones que ejerce el flujo del agua a lo largo del muro de contención.

4.7 Contrastación de primera hipótesis secundaria

Se pudo identificar el modelo numérico, debido a que el método de Crank Nicolson se aplica para modelar sistemas en los que la transferencia de calor o el flujo de agua dependen de variables no lineales (como la conductividad hidráulica que varía con el tiempo o la saturación), hace que

el método sea especialmente útil en estos contextos. Este método analiza el comportamiento del flujo de agua en medios porosos; para ello, fueron necesarios los parámetros como el nivel freático, coeficiente de permeabilidad, coeficiente de almacenamiento específico y la recarga hidráulica para simular la gráfica que indica la tendencia del comportamiento para un acuífero libre saturado.

4.8 Contratación de segunda hipótesis secundaria

Los parámetros esenciales para el análisis experimental son aquellos establecidos como condiciones previas al inicio de un ensayo, tales como la porosidad del medio que permite que el flujo del agua sea continua, las alturas en la que se pone los tubos rebosaderos permite el ingreso y egreso del agua de forma continua, el caudal que se proporciona al ensayo, es decir, la velocidad en que se desplaza el flujo en el medio poroso. De los tres, sí se puede saber sus propiedades físicas como la porosidad del medio, debido a que es un producto clasificado llamado arena de cuarzo, la altura que simula los desniveles se puede medir y el caudal es algo que no se pudo calcular debido a que la bomba que impulsaba el agua desde el depósito de agua era manual, o sea, el control de apertura solo era con una llave la cual no permitía cuantificar el caudal.

Los otros parámetros que influyen en el análisis experimental son los accesorios como la tablestaca, el fundamento y el muro de contención,

ya que interfiere en el medio poroso, cambiando el flujo del agua es decir las líneas de corriente.

4.9 Contrastación de tercera hipótesis secundaria

Se puede hacer la comparación para el ensayo zanja de drenaje, mediante un cuadro comparativo de los valores calculados numéricamente con los datos que da la hoja de cálculo para el método de Cranck Nicolson contrastando con los valores observados experimentalmente. En cambio, los demás ensayos no pueden modelarse numéricamente debido a la presencia de elementos que interfieren en el medio poroso y que no se consideran en el método numérico, lo que limita la posibilidad de hacer una comparación con los resultados experimentales.

CAPÍTULO V

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

- Se analizó el comportamiento numérico y experimental en un laboratorio del efecto de un dren sobre un acuífero libre saturado, por separado; luego, se constataron los resultados considerando las condiciones en la que se encuentra inicialmente sin obstáculos, el análisis numérico no abarca cuando se tiene elementos en el medio poroso de un acuífero libre saturado, siendo una limitante para este estudio. Por otro lado, el comportamiento experimentalmente se logró analizar con el enfoque en la visualización de línea de corriente para algunos ensayos y para otros ensayos la presión que se da al colocar elementos en el medio poroso.
- Un modelo numérico depende de parámetros en suposiciones como nivel freático, coeficiente de permeabilidad, coeficiente de almacenamiento específico y la recarga hidráulica, que podrían no captar completamente la dinámica real del sistema que se analizó experimentalmente. La comparación se hizo con una gráfica que refleja los datos calculados vs datos observados experimentalmente. Por ello, los resultados obtenidos para la zanja de drenaje se asemejan, mas no son iguales al modelado numérico. Para la pared de tablestaca, se prevé la utilización del Matlab, la cual tiene una

capacidad predictiva del comportamiento del flujo con similares condiciones de contorno. Este proceso de análisis entre los modelos numéricos y los experimentos puede conducir a mejoras continuas en las simulaciones y una mayor confianza en las predicciones.

- Para el fundamento 1 y fundamento 2, la comparación se realizó a los datos del manual del equipo utilizado, de los tubos N° 20, 21, 22 y 24. Estos tubos no registran una medición como en el panel manométrico; por ello, se realizó con una regla desde la base del ensayo. Si bien es cierto la unión de la pared de tablestaca junto con el fundamento, tenía huecos, es decir, la unión no era continua debido a las jebes laterales que tenían estos accesorios, permitía que la presión se pierda; sin embargo, sellando o no esos orificios con un limpiatipo los valores registrados no son similares, a las lecturas registradas según el manual.
- Finalmente, para el muro de contención, se realizó con el propósito de evaluar la presión que el flujo ejerce en un medio poroso para un muro de contención. Los valores obtenidos experimentalmente fueron comparados con el manual del equipo, mostrando similitudes. La diferencia observada podría reducirse si se cuantifica o controla el caudal que ingresa al equipo, evitando así variaciones en los resultados.

CONCLUSIONES

Primera. Se ha logrado ver el comportamiento tanto numérico como experimentalmente del efecto de un dren sobre un acuífero libre saturado bajo diversas condiciones de drenaje. La simulación numérica, al replicar las condiciones experimentales controladas, ha proporcionado una aproximación fiable respecto a las líneas de corriente obtenidas, mostrando una correlación con los datos experimentales obtenidos. La tendencia de estos resultados sugiere este modelo numérico con el comportamiento del acuífero.

Segunda. Para el análisis del comportamiento numérico, se requiere una solución numérica del flujo de agua en acuífero. Para ello, se identificó que el método de Crank Nicolson significativamente resuelve numéricamente; para lo cual, la correcta parametrización es esencial para la precisión, que permite predecir la respuesta del comportamiento de un dren en un acuífero saturado a diferentes condiciones, uno de los ensayos analizados fue el de zanja de drenaje; sin embargo, no abarcó todos los ensayos debido a que el método no considera la interferencia de elementos que se interponen en el medio poroso.

Tercera. Para analizar los comportamientos experimentales, se determinó los parámetros reales de los elementos que se usaron en el laboratorio. Este comportamiento del efecto de un dren sobre un acuífero libre saturado puede variar si se realiza cambios, como la intrusión de una pared de tablestaca o un fundamento, la distribución de la presión y el flujo de agua.

Cuarta. Los resultados que se lograron comparar es el ensayo de zanja de drenaje, la cual es la que más se asemeja al método de Crank Nicolson. Los otros ensayos, cuyos comportamientos fueron registrados, proporcionan información que será de utilidad para la validación de otros modelos numéricos o para la mejora de técnicas de manejo en la realización de ensayos.

RECOMENDACIONES

Primera. A pesar de que la simulación numérica ha demostrado ser significativa o similar, se recomienda seguir probando con el mismo y con otros modelos numéricos, de tal forma que se obtienen nuevos datos experimentales. Esto permitirá ajustar los parámetros y mejorar la precisión de las predicciones.

Segunda. Dado que el comportamiento del efecto de un dren en un acuífero puede variar dependiendo de las condiciones iniciales y a lo largo del tiempo, se recomienda realizar estudios adicionales que evalúen la variabilidad. Esto permitiría obtener una visión más detallada del comportamiento del acuífero bajo distintas condiciones, lo cual es crucial para mejorar al método numérico y su aplicabilidad.

Tercera. A pesar de haber establecido parámetros experimentales fundamentales, sería recomendable realizar estudios adicionales que incluyan una gama más amplia de tipos de acuíferos (por ejemplo, diferentes composiciones de medios porosos) y condiciones de drenaje (como diferentes caudales y configuraciones de drenaje como las alturas). Esto permitirá

entender mejor cómo varían los resultados en función de las características del acuífero.

Cuarta. Para el ensayo de zanja de drenaje, se recomendaría hacer el estudio de nuevo con distintos medios porosos la cual permitiría la corroboración del método de Crank Nicolson, mejorando así en resultados más certeros.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abudawia, A., Mourad, A., Rodrigues, J. H. y Rosier, C. (2018). A finite element method for a seawater intrusion problem in unconfined aquifers. *Applied Numerical Mathematics*, 127, 349–369. <https://doi.org/10.1016/j.apnum.2018.01.013>
- Anderson, J. D. (2017). *Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications* (2nd ed.). McGraw-Hill.
- Batchelor, G. K. (2000). *An Introduction to Fluid Dynamics*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511800955>
- Bear, J. (1972). *Dynamics of Fluids in Porous Media*. Dover Publications.
- Bear, J. (1979). *Hydraulics of Groundwater*. McGraw-Hill.
- Verruijt, A. y Bear, J. (1987). *Modeling Groundwater Flow and Pollution*. Springer.
- Braja, M. Das. (2010). *Principles Of Geotechnical Engineering*. (7.^a ed.). 2010.
- Chalá, D. C., Castro-Faccetti, C., Quiñones-Bolaños, E. y Mehrvar, M. (2024a). Salinity Intrusion Modeling Using Boundary Conditions on a Laboratory Setup: Experimental Analysis and CFD Simulations. *Water*, 16(14), 1970. <https://doi.org/10.3390/w16141970>

- Chalá, D. C., Castro-Faccetti, C., Quiñones-Bolaños, E. y Mehrvar, M. (2024b). Salinity Intrusion Modeling Using Boundary Conditions on a Laboratory Setup: Experimental Analysis and CFD Simulations. *Water*, 16(14), 1970. <https://doi.org/10.3390/w16141970>
- Chapra, C. S. y Canale, P. R. (2006). *Métodos Numéricos para Ingenieros* (Quinta). McGraw-Hill.
- Chaudhry, M. H. (2014). *Open Channel Flow*. Springer.
- Crank, J. y Nicolson, P. (1996). A practical method for numerical evaluation of solutions of partial differential equations of the heat-conduction type. *Advances in Computational Mathematics*, 6(1), 207–226. <https://doi.org/10.1007/BF02127704>
- Creswell, J. W. (2013). *Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches*. (4.^aed.). SAGE Publications.
- Diersch, H.-J. G. y Kolditz, O. (2002). Variable-density flow and transport in porous media: approaches and challenges. *Advances in Water Resources*, 25(8–12), 899–944. [https://doi.org/10.1016/S0309-1708\(02\)00063-5](https://doi.org/10.1016/S0309-1708(02)00063-5)
- Domenico, P. A. y Schwartz, F. W. (1990). *Physical and Chemical Hydrogeology*. Wiley.

- Dose, E. J., Stoeckl, L., Houben, G. J., Vacher, H. L., Vassolo, S., Dietrich, J. y Himmelsbach, T. (2014). Experiments and modeling of freshwater lenses in layered aquifers: Steady state interface geometry. *Journal of Hydrology*, 509, 621–630.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.10.010>
- Faulkner, J., Hu, B. X., Kish, S. y Hua, F. (2009). Laboratory analog and numerical study of groundwater flow and solute transport in a karst aquifer with conduit and matrix domains. *Journal of Contaminant Hydrology*, 110(1–2), 34–44.
<https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2009.08.004>
- Fitts, J. D. (2013). *Introduction to Groundwater Modeling: Finite Difference and Finite Element Methods*. CRC Press.
- Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación*. (6.^a ed.). McGraw-Hill.
- Holtz, R. D. y Kovacs, W. D. (1981). *An Introduction to Geotechnical Engineering*. Prentice Hall.
- Holtz, R. D. y Kovacs, W. D. (2011). *An Introduction to Geotechnical Engineering* (2.^a ed.).
- Igboekwe, Magnus. U. y Achi, N. J. (2011). Finite Difference Method of Modelling Groundwater Flow. *Journal of Water Resource and*

Protection, 03(03), 192–198.
<https://doi.org/10.4236/jwarp.2011.33025>

Konz, M., Younes, A., Ackerer, P., Fahs, M., Huggenberger, P. y Zechner, E. (2009). Variable-density flow in heterogeneous porous media — Laboratory experiments and numerical simulations. *Journal of Contaminant Hydrology*, 108(3–4), 168–175.
<https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2009.07.005>

Cohen, I. M. y Kundu, P. K. (2008). *Fluid Mechanics*. (5.^a ed.). Elsevier.

Lamb, H. (1932). *Hydrodynamics*. Dover Publications.

Lascano, M. W. (2023). *Implementación del método de Crank–Nicolson para resolver la ecuación unidimensional del calor con incertidumbre para estudiantes de cuarto semestre, Carrera de Telecomunicaciones de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo*.

Lee, W.-D., Yoo, Y.-J., Jeong, Y.-M. y Hur, D.-S. (2019). Experimental and Numerical Analysis on Hydraulic Characteristics of Coastal Aquifers with Seawall. *Water*, 11(11), 2343.
<https://doi.org/10.3390/w11112343>

Lèye, B., Koko, J., Kane, S. y Sy, M. (2018). Numerical simulation of saltwater intrusion in coastal aquifers with anisotropic mesh

adaptation. *Mathematics and Computers in Simulation*, 154, 1–18.

<https://doi.org/10.1016/j.matcom.2018.06.008>

Liu, L. y Liu, X. (2017). Future groundwater extraction scenarios based on COMSOL multiphysics for the confined aquifer at Linfen basin, Shanxi Province, China. *Cogent Engineering*, 4(1), 1404178.

<https://doi.org/10.1080/23311916.2017.1404178>

Luo, Y. y Ranjith, P. G. (2015). *Groundwater Flow and Contaminant Transport in Soils*. Springer. Springer.

Mehdizadeh, S. S., Werner, A. D., Vafaie, F. y Badaruddin, S. (2014). Vertical leakage in sharp-interface seawater intrusion models of layered coastal aquifers. *Journal of Hydrology*, 519, 1097–1107.

<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.08.027>

Mitchell, J. K. y Soga, K. (2005). *Fundamentals of Soil Behavior*.

Müller, E. y Johnson, R. (2007). *Introduction to Fluid Mechanics and Fluid Machines*. Pearson Education.

Munson, B. R., Young, D. F. y Okiishi, T. H. (2006). *Fundamentals of Fluid Mechanics*. (5.^a ed.). John Wiley y Sons.

Oz, I., Shalev, E., Yechieli, Y. y Gvirtzman, H. (2015). Saltwater circulation patterns within the freshwater–saltwater interface in coastal aquifers:

Laboratory experiments and numerical modeling. *Journal of Hydrology*, 530, 734–741.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.10.033>

Panton, R. L. (2013). *Incompressible Flow*. John Wiley y Sons.

Pino, V. E., Ramos, L., Avalos, O., Tacora, P., Chávarri, E., Angulo, O., Ascencios, D. y Mejía, J. (2019). Factores que inciden en el agotamiento y la contaminación por intrusión marina en el acuífero costero de La Yarada, Tacna, Perú. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 10(5), 177–213. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2019-05-07>

Pino, V. E. (2020). *Solución numérica de ecuaciones diferenciales ordinarias y parciales*.

Pino, V. E., Chávarri, V. E., Ingol, B. E., Mejía, F., Cruz, A. y Vera, A. (2022). Impacts of Climate Change and Variability on Precipitation and Maximum Flows in Devil's Creek, Tacna, Peru. *Hydrology*, 9(1), 10. <https://doi.org/10.3390/hydrology9010010>

Saavedra, D., Mendoza, P. A., Addor, N., Llauca, H. y Vargas, X. (2022). A multi-objective approach to select hydrological models and constrain structural uncertainties for climate impact assessments. *Hydrological Processes*, 36(1). <https://doi.org/10.1002/hyp.14446>

ŞEN, E. y DÜŞÜNÜR-DOĞAN, D. (2021). Finite volume modeling of bathymetry and fault-controlled fluid circulation in the Sea of Marmara. *TURKISH JOURNAL OF EARTH SCIENCES*, 30(5), 628–638. <https://doi.org/10.3906/yer-2101-20>

Shames, I. H. (1992). *Mechanics of Fluids*. McGraw-Hill.

Shao, Q., Fahs, M., Hoteit, H., Carrera, J., Ackerer, P. y Younes, A. (2018). A 3-D Semianalytical Solution for Density-Driven Flow in Porous Media. *Water Resources Research*, 54(12). <https://doi.org/10.1029/2018WR023583>

Shokri, N., Namin, M. M. y Farhoudi, J. (2018). A three-dimensional non-hydrostatic coupled model for free surface – Subsurface variable – Density flows. *Journal of Contaminant Hydrology*, 216, 38–49. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2018.08.002>

Simmons, C. T., Fenstemaker, T. R. y Sharp, J. M. (2001). Variable-density groundwater flow and solute transport in heterogeneous porous media: approaches, resolutions and future challenges. *Journal of Contaminant Hydrology*, 52(1–4), 245–275. [https://doi.org/10.1016/S0169-7722\(01\)00160-7](https://doi.org/10.1016/S0169-7722(01)00160-7)

Simpson, M. J. y Clement, T. P. (2003). Theoretical analysis of the worthiness of Henry and Elder problems as benchmarks of density-

dependent groundwater flow models. *Advances in Water Resources*, 26(1), 17–31. [https://doi.org/10.1016/S0309-1708\(02\)00085-4](https://doi.org/10.1016/S0309-1708(02)00085-4)

Som, S. K. y Joshi, B. P. (2008). *Fluid Mechanics and Machinery*. McGraw-Hill.

Souza, W. R. y Voss, C. I. (1987). Analysis of an anisotropic coastal aquifer system using variable-density flow and solute transport simulation. *Journal of Hydrology*, 92(1–2), 17–41. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(87\)90087-4](https://doi.org/10.1016/0022-1694(87)90087-4)

Streeter, V. L. y Wylie, E. B. (2009). *Fluid Mechanics*. McGraw-Hill.

Volker, R. E. y Rushton, K. R. (1982). An assessment of the importance of some parameters for seawater intrusion in aquifers and a comparison of dispersive and sharp-interface modelling approaches. *Journal of Hydrology*, 56(3–4), 239–250. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(82\)90015-4](https://doi.org/10.1016/0022-1694(82)90015-4)

Werner, A. D., Bakker, M., Post, V. E. A., Vandenbohede, A., Lu, C., Ataie-Ashtiani, B., Simmons, C. T. y Barry, D. A. (2013). Seawater intrusion processes, investigation and management: Recent advances and future challenges. *Advances in Water Resources*, 51, 3–26. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.03.004>

White, F. M. (2011). *Fluid Mechanics*. McGraw-Hill.

Zhang, Q., Volker, R. E. y Lockington, D. A. (2002). Experimental investigation of contaminant transport in coastal groundwater. *Advances in Environmental Research*, 6(3), 229–237. [https://doi.org/10.1016/S1093-0191\(01\)00054-5](https://doi.org/10.1016/S1093-0191(01)00054-5)

ANEXOS

ANEXO 1

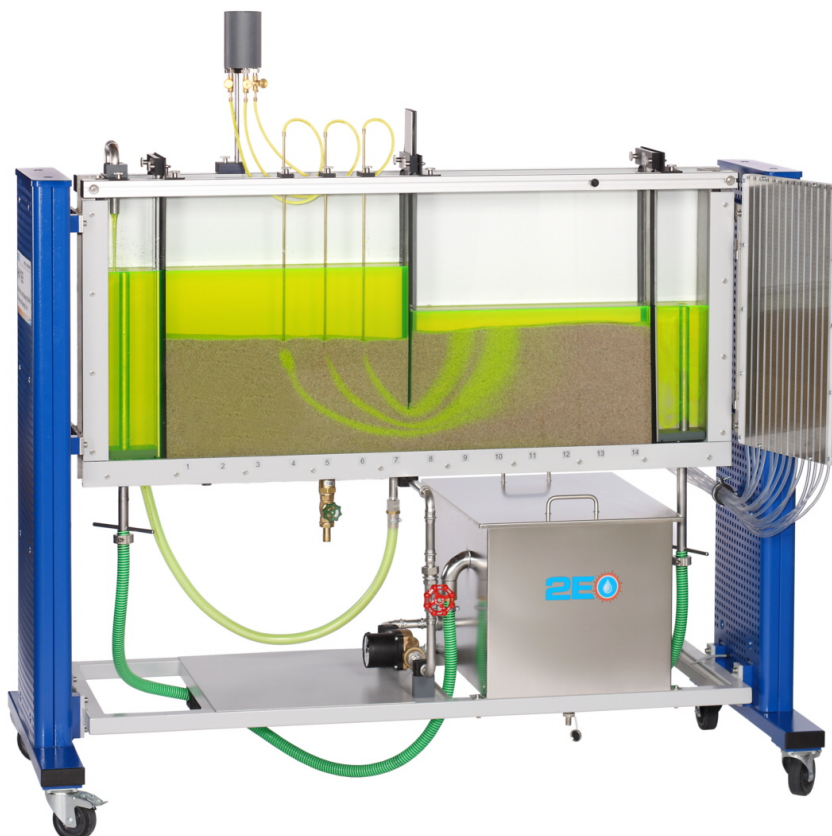
Manual del equipo HM 169 Visualización de corrientes de
infiltración

HM 169

Visualización de corrientes de infiltración

Manual

V 1.5 05/2022 ES



Indice general

1	Introducción	4
2	Seguridad	6
2.1	Uso previsto	6
2.2	Estructura de las indicaciones de seguridad	6
2.3	Indicaciones de seguridad	7
2.4	Condiciones del ambiente para el lugar de funcionamiento y el lugar de almacenamiento	8
3	Descripción del equipo	9
3.1	Componentes del equipo	9
3.2	Colocación y conexión	13
3.3	Requisitos de la arena	13
3.4	Manejo	14
3.4.1	Llenado del depósito de agua	14
3.4.2	Purga de aire de las lanzas de inyección y llenado del depósito de tinte	15
3.4.3	Purga de aire de los tubos manométricos	16
3.5	Puesta fuera de servicio	17
3.5.1	Enjuagar el colorante de la arena	17
3.5.2	Vaciado del depósito de ensayo	17
3.5.3	Vaciado de tubos manométricos	18
3.5.4	Vaciado del depósito de agua y de las mangueras	18
3.5.5	Extracción de la arena del depósito de ensayo	19
3.6	Mantenimiento y cuidado	21
3.6.1	Mantenimiento y cuidado regular	21
3.6.2	Purga de la bomba	22
3.6.3	Solución de problemas si la bomba no funciona	23

4	Ensayos	24
4.1	Zanja de drenaje	25
4.1.1	Objetivo del ensayo	25
4.1.2	Montaje experimental y rendimiento	25
4.1.3	Resultados de los ensayos y evaluación	28
4.2	Presa	30
4.2.1	Objetivo del ensayo	30
4.2.2	Montaje experimental y rendimiento	30
4.2.3	Resultados de los ensayos y evaluación	33
4.3	Pared de tablestacas	34
4.3.1	Objetivo del ensayo	34
4.3.2	Montaje experimental y rendimiento	34
4.3.3	Resultados de los ensayos y evaluación	38
4.4	Muro de contención	41
4.4.1	Objetivo del ensayo	41
4.4.2	Montaje experimental y rendimiento	41
4.4.3	Resultados de los ensayos y evaluación	44
4.5	Fundamento	45
4.5.1	Objetivo del ensayo	45
4.5.2	Montaje experimental y rendimiento	45
4.5.3	Resultados de los ensayos y evaluación	48
5	Anexo	50
5.1	Datos técnicos	50
5.2	Tablas y diagramas	52
5.3	Ficha de trabajo	53

1 Introducción

Se denomina flujo de infiltración al flujo de un fluido, en este caso, el agua, en capas porosas, por ejemplo, la arena. El agua llena más o menos los poros en la zona del suelo anegado y se desplaza a las capas más profundas debido a la fuerza de cizallamiento.

Los flujos de infiltración desempeñan un papel importante en las obras de construcción en estratos acuíferos. Aquí, por un lado, es relevante el flujo de paso y el flujo circundante de las estructuras. Por otro lado, es de interés la presión hidrostática que actúa sobre las estructuras.

Con el banco de ensayos visualización y flujos de infiltración HM 169 se visualizan las líneas de corriente circundante de las estructuras y las curvas de presión de estas.

El banco de ensayos sirve para formar estudiantes de ingeniería civil. Es adecuado para ensayos de laboratorio con estudiantes, así como para ensayos de demostración de los instructores.

Los contenidos didácticos son

- Determinar gráficamente las redes de flujo en medios porosos
 - Red de flujo en una zanja
 - Red de flujo en una presa
 - Red de flujo en una pared de tablestacas

- Determinar la presión de agua en una estructura
 - Desarrollo de la presión de agua en un fundamento
 - Desarrollo de la presión de agua en un muro de contención.

2 Seguridad




2.1 Uso previsto





El equipo se ha previsto exclusivamente para fines didácticos.

2.2 Estructura de las indicaciones de seguridad

Las palabras de señalización PELIGRO, ADVERTENCIA o ATENCIÓN indican la probabilidad y la gravedad posible de las lesiones.

Otro símbolo explica, si procede, el tipo de peligro o un precepto.

Palabra clave	Explicación
 PELIGRO	Señaliza una situación que, si no se evita, causará la muerte o lesiones graves.
 ADVERTENCIA	Señaliza una situación que, si no se evita, puede causar la muerte o lesiones graves.
 ATENCIÓN	Señaliza una situación que, si no se evita, puede causar lesiones leves o de gravedad media.
AVISO	Señaliza una situación que puede causar daños en los equipos o bien informa sobre el manejo del dispositivo.

Símbolo	Explicación
	Tensión eléctrica
	Punto de peligro (general)
	Peligro de resbalones
	Aviso

2.3 Indicaciones de seguridad



⚠ ADVERTENCIA

Cuando la caja de distribución está abierta, las conexiones eléctricas quedan al descubierto.

Peligro de electrocución.

- Antes de abrir la caja de distribución, desconectar el enchufe de red.
- Solo electricistas debidamente formados deben realizar trabajos en el sistema eléctrico.
- Proteger la caja de distribución contra la humedad.



⚠ ADVERTENCIA

El agua estancada a temperaturas entre 25...60°C fomenta el crecimiento de microorganismos, p. ej., la legionela.

La inhalación de agua con legionela en forma de aerosol puede provocar daños graves para la salud o la muerte.

- Semanalmente:
Haga funcionar la bomba durante al menos 30 minutos para que el agua circule.
 - Aprox. cada 3 semanas:
Cambie el agua.
-



AVISO

La bomba puede estropearse por la aspiración de objetos o arena o por el funcionamiento en seco.

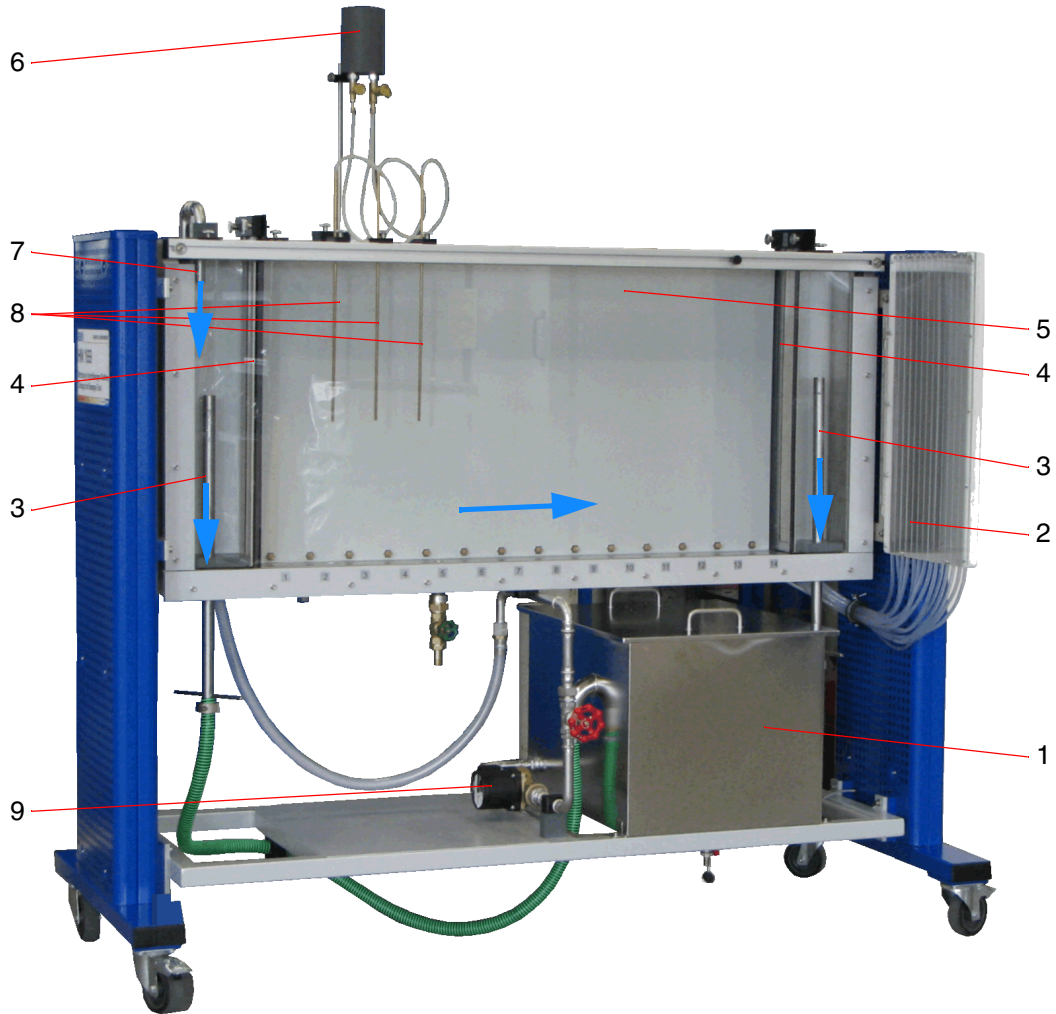
- Asegúrese de que en el depósito de agua no haya cuerpos extraños ni arena.
 - Haga funcionar la bomba únicamente si el depósito de agua está lleno.
-

2.4 Condiciones del ambiente para el lugar de funcionamiento y el lugar de almacenamiento

- Sala cerrada.
- Libre de suciedad y humedad.
- Suelo plano y sólido.
- Protegido contra heladas.

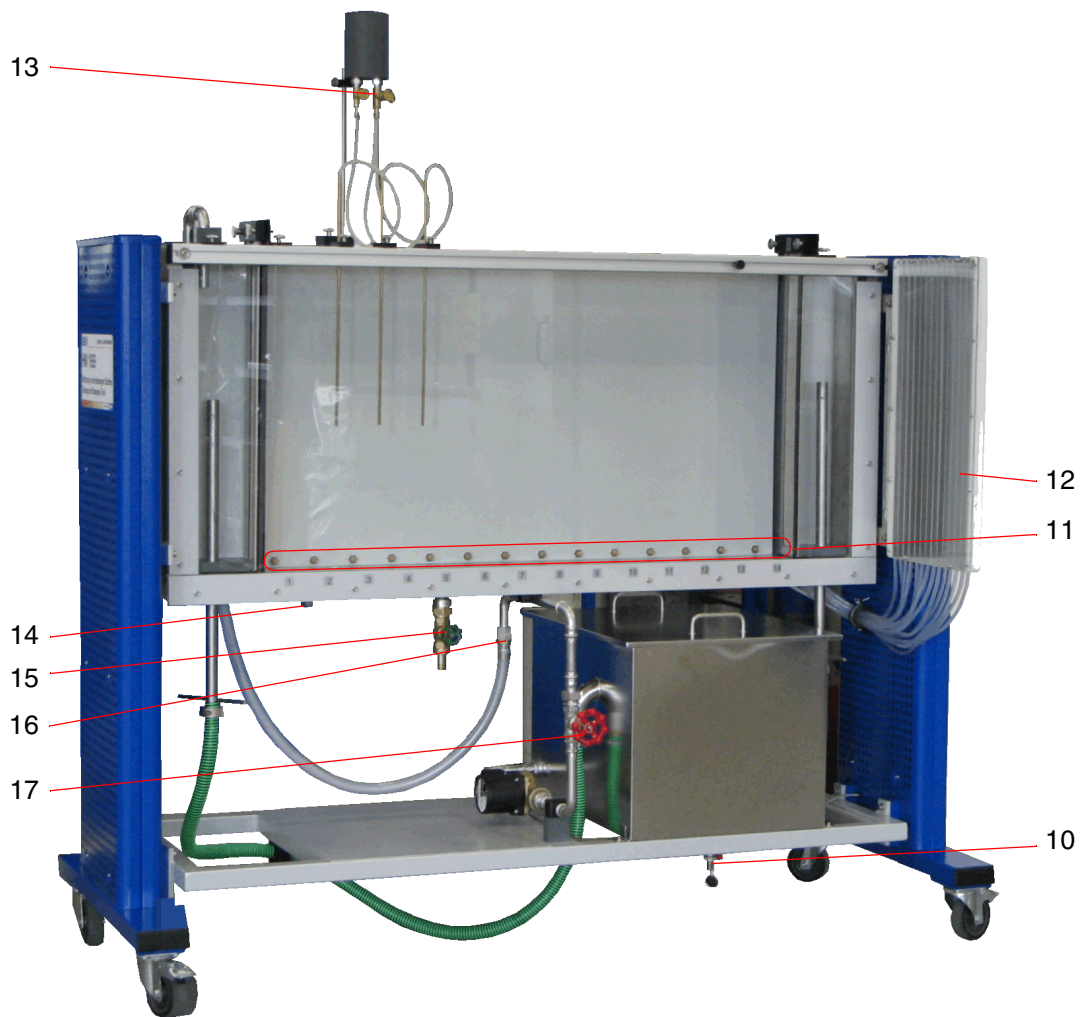
3 Descripción del equipo

3.1 Componentes del equipo



1	Depósito de agua	6	Depósito de colorante
2	Panel de manómetros con 14 tubos manométricos	7	Alimentación
3	Tubo de rebosadero	8	Lanzas de inyección de colorante
4	Placa perforada	9	Bomba
5	Depósito de ensayo		

Fig. 3.1 Componentes principales



10	Llave de desagüe del depósito de agua	14	Tapa para retirar la arena
11	Puntos de medición de presión de 1 a 14	15	Válvula de descarga del depósito de ensayo
12	Interruptor de la bomba (oculto)	16	Válvula de retención
13	3 válvulas del depósito de colorante	17	Válvula de entrada

Fig. 3.2 Elementos de manejo e indicación

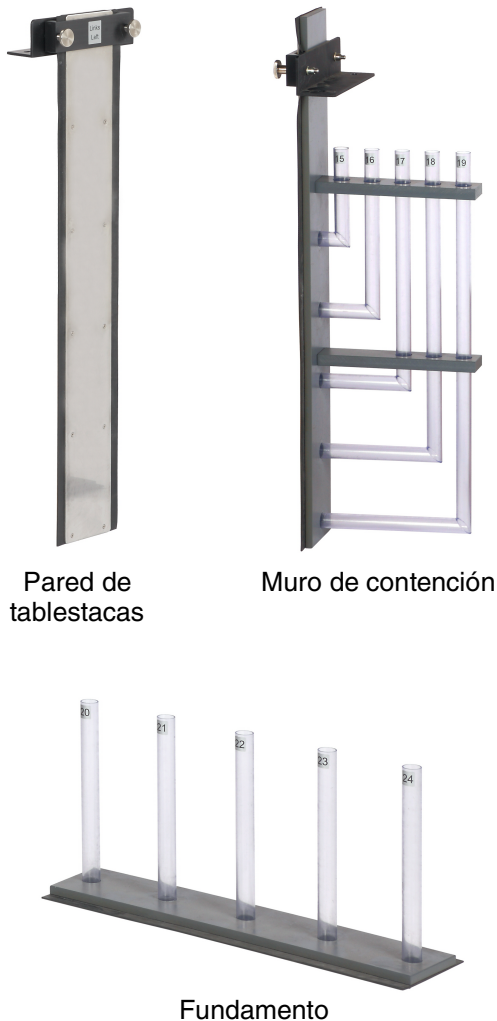
La bomba suministra agua desde el depósito de agua a través de la alimentación en el depósito de ensayo. Una válvula de retención impide que el agua vuelva a fluir desde la alimentación al depósito de agua. El caudal se ajusta a través de la válvula de alimentación. La altura de agua en el depósito de ensayo se ajusta con dos tubos de rebosadero que guían el agua de vuelta al depósito de agua. Se utilizan dos placas de cribado para separar dos cámaras en el depósito de ensayo y mantenerlas libres de arena.

En la base del depósito de ensayo hay 14 puntos de medición de la presión que evitan la penetración de arena por medio de un filtro de metal sinterizado. Los puntos de medición de la presión están conectados por medio de tuberías con un panel de manómetros. Los 14 tubos manométricos indican la presión de agua en los puntos de medición de la presión.

El colorante fluye desde el depósito de colorante a través de mangueras hacia 3 lanzas de inyección. La alimentación se regula a través de 3 válvulas del depósito de colorante. Las lanzas de inyección se clavan en la arena para que las líneas de corriente sean visibles a través del colorante.

El depósito de agua y el depósito de ensayo se vacían cada uno a través de un accesorio de drenaje.

En la parte inferior del depósito de ensayo de la cubierta protectora del motor se encuentra una tapa. Esta se desenrosca para eliminar la arena.



Se pueden montar 3 modelos en el banco de ensayos:

- Pared de tablestacas
- Muro de contención
- Fundamento.

A partir del lecho de arena y de los modelos se pueden crear diversos montajes experimentales. En ellos se puede variar la altura del lecho de arena y el nivel del agua.

El desarrollo de presión en los 14 puntos de medición de la presión del fondo del depósito de ensayo se muestra en los tubos manométricos.

Las líneas de corriente se hacen visibles con la ayuda del colorante que fluye da partir de las lanzas de inyección.

Con los tubos de medición de la presión en dos modelos, se puede medir la presión de agua que actúa sobre las estructuras.

Fig. 3.3 Modelos

3.2 Colocación y conexión



AVISO

Peligro de daños en el equipo.

- Antes de la conexión al suministro eléctrico: asegúrese de que el suministro eléctrico del laboratorio cumpla lo especificado en la placa de características del equipo.
-

1. Ajuste los rodillos de las dos ruedas delanteras.
2. Conectar el banco de ensayos a la red de suministro eléctrico.

3.3 Requisitos de la arena



AVISO

La arena fina puede pasar a través de las placas perforadas al depósito de agua y causar daños en la bomba.

- Utilice arena lavada con tamaños de grano de 1...2mm.
 - Cantidad necesaria: Aprox. 75L de arena.
 - Tenga en cuenta que la arena no puede penetrar en el depósito de agua ni en las bombas.
-

3.4 Manejo

A continuación se describen diversas actividades que se efectúan durante los ensayos. Los ensayos en sí se describen en el capítulo 4, página 24.

3.4.1 Llenado del depósito de agua

1. Cierre la llave de desagüe del depósito de agua.
2. Cierre la válvula de descarga del depósito de ensayo.
3. Vuelva a llenar el depósito de agua con agua limpia y fresca. El nivel del agua en el depósito de agua debe ser de aproximadamente 270mm.
4. Suelte los tornillos moleteados de la alimentación situados en las guías y retire la alimentación.
5. Mantener la alimentación en el depósito de agua.
6. Conecte la bomba y abra completamente la válvula de alimentación. Espere hasta que el agua fluya completamente por la alimentación.
7. Desconecte la bomba y vuelva a enroscar la alimentación llena de agua en las guías.

3.4.2 Purga de aire de las lanzas de inyección y llenado del depósito de tinte

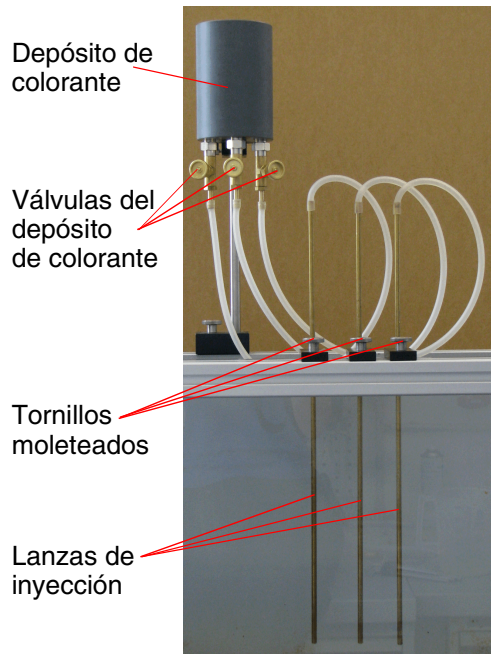


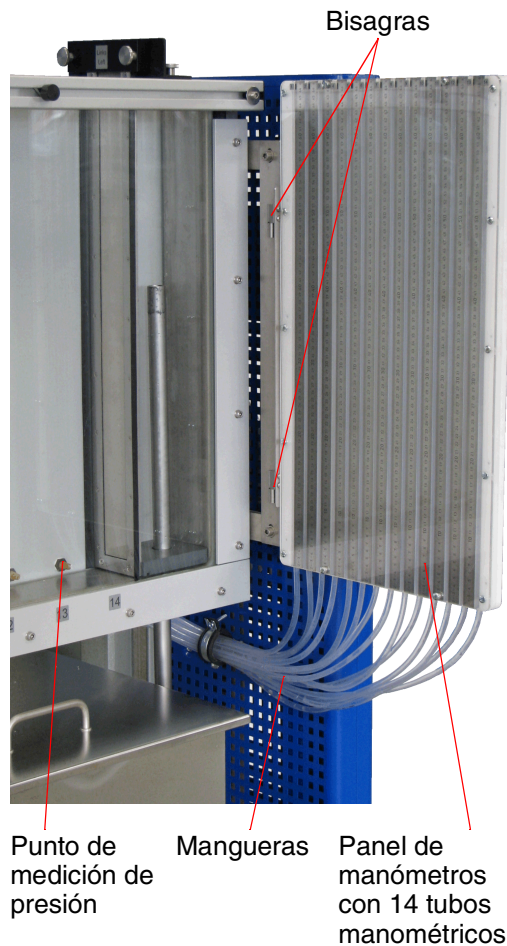
Fig. 3.4 Depósito de colorante con lanzas de inyección

1. Cierre las 3 válvulas del depósito de colorante.
2. Llene aprox. 500mL de agua fresca para proceso en el depósito de colorante.
3. Retire las lanzas de inyección de sus soportes y déjelas colgar de las mangueras delante del depósito de ensayo. Coloque un depósito colector debajo de las lanzas de inyección.
4. Abra las 3 válvulas del depósito de colorante para que el agua fluya de las lanzas de inyección.
5. Cuando todavía haya aprox. 1 cm de agua en el depósito de colorante: Cierre las 3 válvulas del depósito de colorante.
6. Mezcle una punta de espátula de fluoresceína con 500mL de agua y llene esta mezcla en el depósito de colorante.

AVISO

La fluoresceína se utiliza aquí como colorante para hacer visibles las líneas de corriente. La fluoresceína se utiliza, entre otras cosas, como un llamado trazador para determinar el curso de las aguas subterráneas y de los ríos subterráneos.

3.4.3 Purga de aire de los tubos manométricos



Si hay burbujas de aire en las mangueras entre los puntos de medición de la presión y los tubos manométricos, hay que enjuagarlas.

1. Llene el depósito de ensayos con agua como mínimo con 10cm de nivel. Todos los puntos de medición de la presión deben estar por debajo del nivel del agua.
2. Levante el panel de manómetros de sus bisagras e inclínelo sobre un desagüe en el suelo hasta que el agua salga de todos los tubos manométricos.

Fig. 3.5 Purga de aire de los manómetros



⚠ ADVERTENCIA

Agua en el suelo.

Peligro de resbalones.

- Limpie inmediatamente el agua que salpique.

3.5 Puesta fuera de servicio

3.5.1 Enjuagar el colorante de la arena

1. Abra las 3 válvulas del depósito de colorante para que el resto de colorante fluya del depósito de colorante.
2. Llene aprox. 500mL de agua fresca para proceso en el depósito de colorante para enjuagar las lanzas de inyección.
3. Vuelva a llenar el depósito de agua con agua limpia y fresca.
4. Ajuste el tubo de rebosadero izquierdo de manera que su borde superior esté nivelado con el borde superior del lecho de arena.
5. Ajuste el tubo de rebosadero derecho de manera que su borde superior esté en el fondo del depósito de ensayo.
6. Enciende la bomba y deje que el agua fluya por la arena. El colorante fluye con el agua hacia el depósito de agua.

3.5.2 Vaciado del depósito de ensayo

1. Ajuste ambos tubos de rebosadero de manera que los bordes superiores estén en el fondo del depósito de ensayo.
2. Conecte una manguera a la válvula de descarga del depósito de ensayo e introduzca el extremo de la manguera en un desagüe.
3. Abra la válvula de descarga del depósito de ensayo y espere hasta que esté vacío.

3.5.3 Vaciado de tubos manométricos

Levante el panel de manómetros de sus bisagras e inclínelo sobre un desagüe en el suelo hasta que el agua salga de todos los tubos manométricos.



⚠ ADVERTENCIA

Agua en el suelo.

Peligro de resbalones.

- Limpie inmediatamente el agua que salpique.

3.5.4 Vaciado del depósito de agua y de las mangueras

1. Conecte una manguera a la llave de desagüe del depósito de agua e introduzca el extremo de la manguera en un desagüe.
2. Abra la llave de desagüe del depósito de agua y espere hasta que el depósito de agua esté vacío.
3. Tire de los dos tubos de rebosadero hacia abajo del depósito de ensayo y vacíe los tubos.
4. Desenrosque la alimentación y vacíe la manguera.
5. Vuelva a montar los dos tubos de rebosadero y la alimentación.

3.5.5 Extracción de la arena del depósito de ensayo

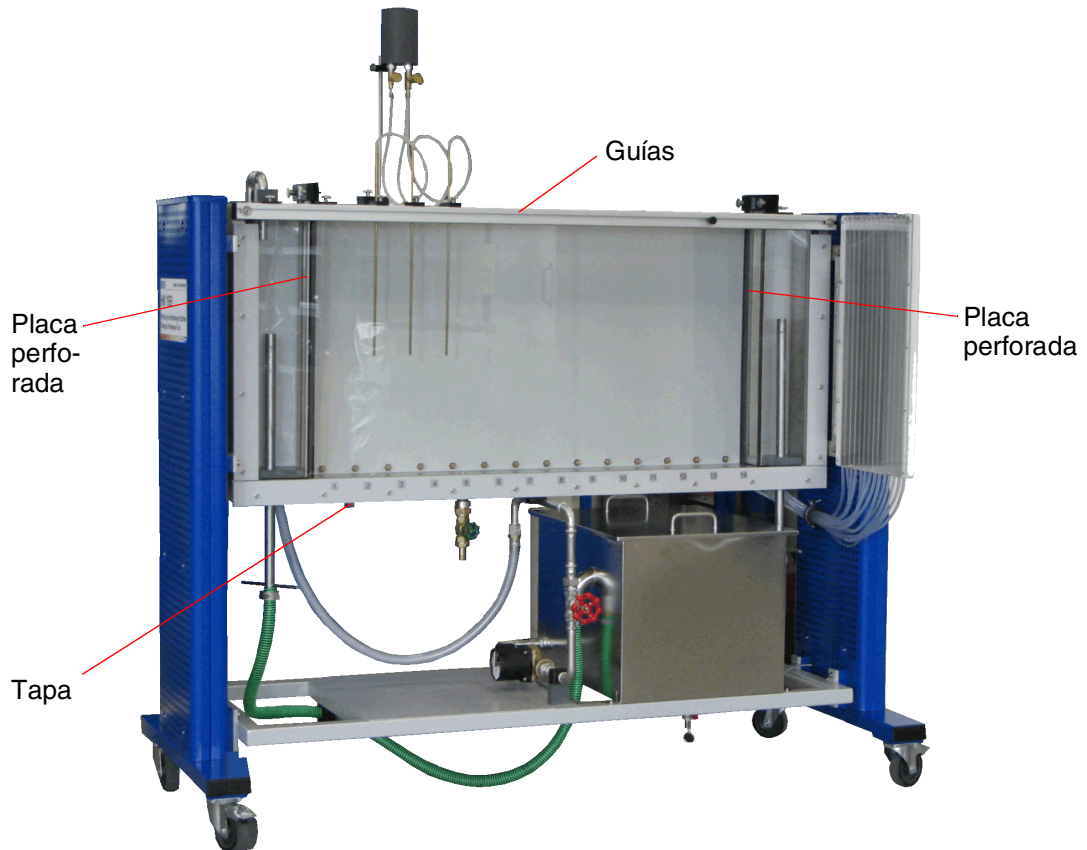


Fig. 3.6 Componentes

1. Retire todos los modelos del banco de ensayos. Las dos placas perforadas permanecen instaladas.
2. Selle las guías, por ejemplo, con cinta adhesiva, para que no caiga arena en ellas.
3. Tome con una pala de plástico o un vaso de plástico tanta arena como le sea posible desde arriba y extráigala del depósito de ensayo.

4. Coloque el depósito debajo de la tapa en la parte inferior del depósito de ensayo.

Seleccione el volumen del depósito para que pueda contener la arena restante del depósito de ensayo.

5. Desenrosque la tapa situada en la parte inferior del depósito de ensayo (véase la Fig. 3.2, página 10) con la llave de boca suministrada (entre caras de 24). La arena cae en el depósito.



AVISO

La junta puede salirse de la tapa.

- Saque la arena de la tapa y de la junta.
-

6. Enjuague la arena restante del depósito de ensayo.

Utilice para ello una manguera del laboratorio o la alimentación.

7. Coloque la junta en la tapa y atornille la tapa al fondo del depósito de ensayo.
8. Almacene la arena de tal forma que se pueda secar. La arena se puede utilizar para otros ensayos.

3.6 Mantenimiento y cuidado

3.6.1 Mantenimiento y cuidado regular

- Tubos de rebosadero

Si los tubos de rebosadero se desplazan con dificultad en altura: Lubrique el exterior de los tubos de rebosadero con un lubricante, p. ej., vaselina.

- Colorante

El colorante debe enjuagarse de arena después de cada prueba (véase capítulo 3.5.1, página 17).

- Agua

No es necesario sustituir el agua en el depósito de ensayo después de cada ensayo. Aunque el agua tenga un colorante ligeramente verdoso debido al uso del colorante, puede utilizarse para otros ensayos.

El agua debe drenarse del depósito de ensayo a diario al final del ensayo para protegerlo de la luz solar.

- Arena

La arena puede quedar en el depósito de ensayo entre ensayo y ensayo. Solo debe retirarse si el banco de ensayos no se utiliza durante un período de tiempo prolongado (véase el capítulo 3.5.5, página 19).

3.6.2 Purga de la bomba

Si el caudal de la bomba es bajo, se debe purgar del modo siguiente.

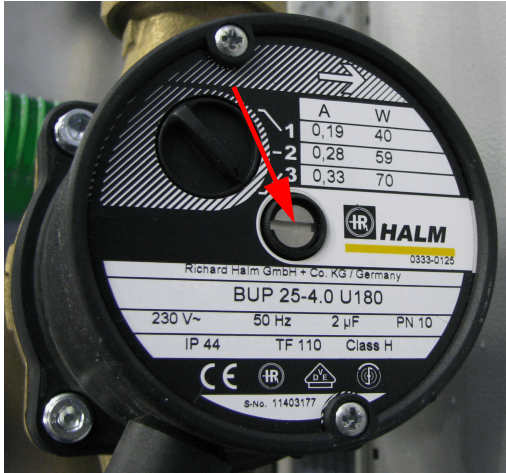


Fig. 3.7 Tornillo de purga de aire

Posibilidad 1:

1. Conecte la bomba y abra completamente la válvula de alimentación.
2. Afloje el tornillo de purga, espere a que salga agua y vuelva a apretar el tornillo de purga.

Posibilidad 2:

1. Suelte los tornillos moleteados de la alimentación situados en las guías y retire la alimentación. Coloque la alimentación sobre un desagüe del suelo.
2. Conecte la bomba y abra completamente la válvula de alimentación. Espere hasta que el agua fluya completamente por la alimentación.
3. Cierre la válvula de alimentación y vuelva a enroscar la alimentación llena de agua en las guías.
4. Abra la válvula de alimentación.

3.6.3 Solución de problemas si la bomba no funciona

Si la bomba no funciona, compruebe las causas eléctricas y mecánicas del modo siguiente.

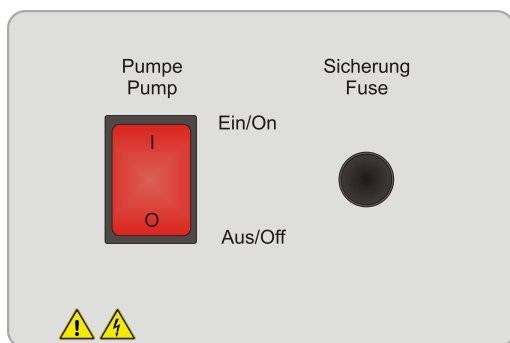


Fig. 3.8 Interruptor y fusible de la bomba

1. Conecte el equipo a la alimentación eléctrica.
2. Active el interruptor de la bomba.
3. Si el interruptor de la bomba no se ilumina: Compruebe el fusible y sustitúyalo si es necesario.

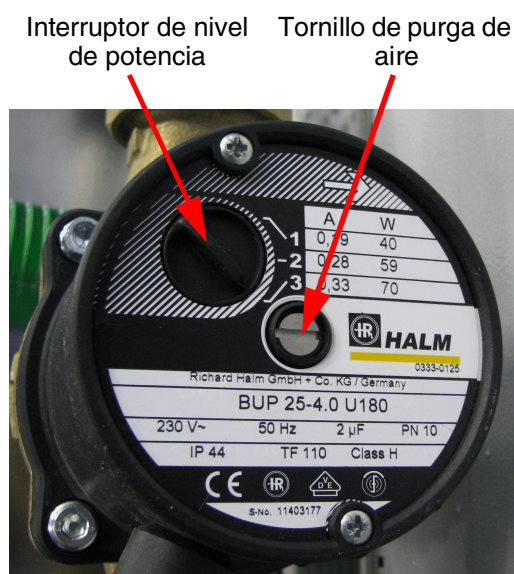


Fig. 3.9 Bomba

4. Gire el interruptor de nivel de potencia de la bomba a la etapa 1 – 2 – 3 sucesivamente. La alta potencia puede hacer que la bomba se suelte.
5. Coloque el interruptor de nivel de potencia de la bomba en la etapa 1.
6. Cuando el interruptor de la bomba está encendido: Retire el tornillo de purga.
7. Gire con cuidado el árbol con un destornillador hasta que se afloje.
8. Apague la bomba.
9. Apriete nuevamente el tornillo de purga.

4 Ensayos

La selección de ensayos no pretende ser exhaustiva, sino que más bien se trata de una sugerencia para crear ensayos propios.

Los resultados citados deben considerarse sólo a título orientativo. En función de la ejecución de los distintos componentes, de la habilidad en el campo de la técnica de ensayo y de las condiciones del entorno, pueden presentarse divergencias en el experimento propio. No obstante, se pueden demostrar claramente las leyes de la física.

Los resultados de los ensayos dependen de la repartición granulométrica de la arena.

Utilice la hoja de trabajo (capítulo 5.3, página 53) para registrar los resultados de los ensayos.

4.1 Zanja de drenaje

4.1.1 Objetivo del ensayo

- Familiarícese con el drenaje a través de una zanja.
- Determine el curso de las líneas de corriente en una zanja de drenaje.
- Desarrolle una red de flujo.

4.1.2 Montaje experimental y rendimiento

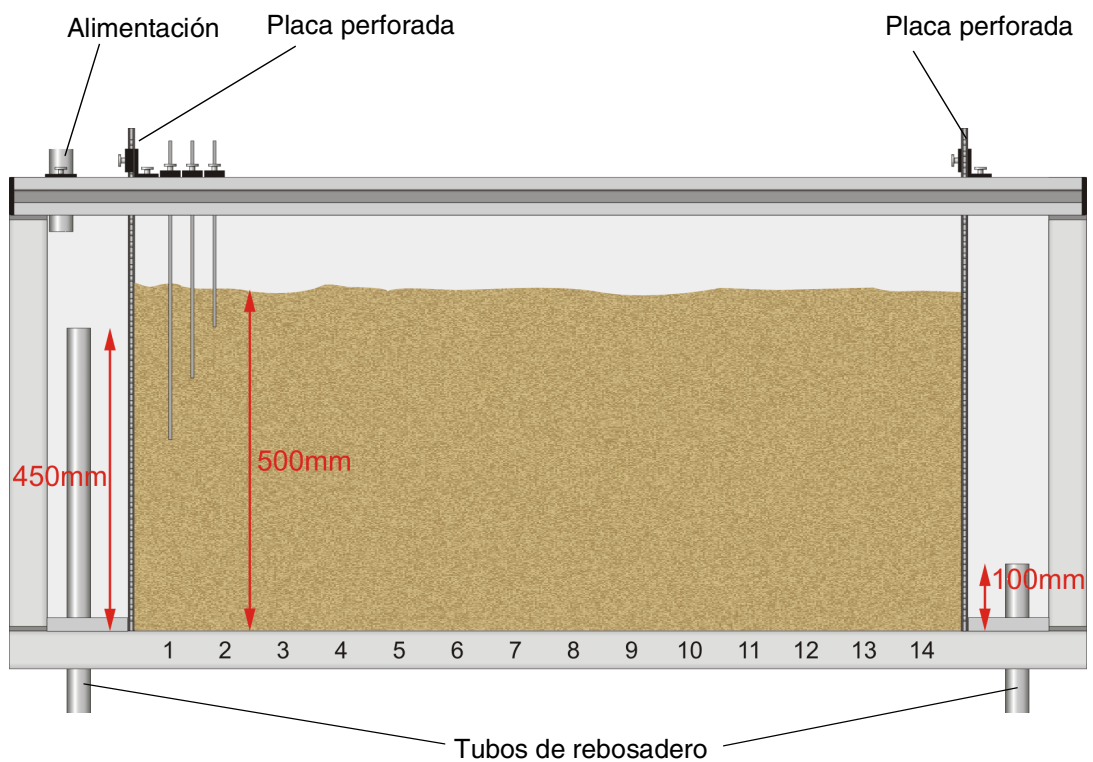


Fig. 4.1 Zanja de drenaje: Montaje experimental

Llenado de arena

1. Introduzca las placas perforadas, doblando las juntas **hacia la arena**.
2. Selle las guías, por ejemplo, con cinta adhesiva, para que no caiga arena en ellas.

Rellene con arena el depósito de ensayo o distribuya la arena existente. Debe haber aprox. 500mm de arena por encima del fondo del depósito de ensayo.

3. Ajuste el tubo de rebosadero izquierdo de manera que su borde superior esté aprox. 450mm por encima del fondo del depósito de ensayo.
4. Ajuste el tubo de rebosadero derecho de manera que su borde superior esté aprox. 100mm por encima del fondo del depósito de ensayo.

Colocación de lanzas de inyección

5. Purgue el aire de las lanzas de inyección y llene el depósito de colorante, véase el capítulo 3.4.2, página 15.
6. Introduzca las lanzas de inyección como se indica en la Fig. 4.1, página 25 en la arena.

Llenado de agua

7. Encienda la bomba y deje que el agua fluya **lentamente** por depósito de ensayo.

Ajuste el caudal con la válvula de alimentación para conseguir un nivel de agua constante.

8. Si es necesario, purgue los tubos manométricos (véase el capítulo 3.4.3, página 16).

Observación de ensayos

9. Abra ligeramente las 3 válvulas del depósito de colorante y espere hasta que el colorante salga de las lanzas de inyección y las líneas de corriente se hagan visibles.
 - Si las líneas de corriente son demasiado anchas: Cierre ligeramente las válvulas del depósito de colorante.
 - Pierde muy poco o nada de colorante: Abra más las válvulas del depósito de colorante.
10. Observe y documente las líneas de corrientes.
 - Coloque el papel de calco en la plancha de vidrio y utilice un lápiz para pasar el contorno del lecho de arena y las líneas de corriente al papel de calco.
 - O haga una foto del ensayo.
11. Desarrolle una red de flujo a partir de las líneas de corriente del papel de calco o de la foto impresa.

4.1.3 Resultados de los ensayos y evaluación

La Fig. 4.2 muestra las líneas de corriente que se producen con este montaje experimental. Es evidente que el flujo de infiltración sigue el gradiente hidráulico entre los niveles de agua de ambos tubos de rebosadero.

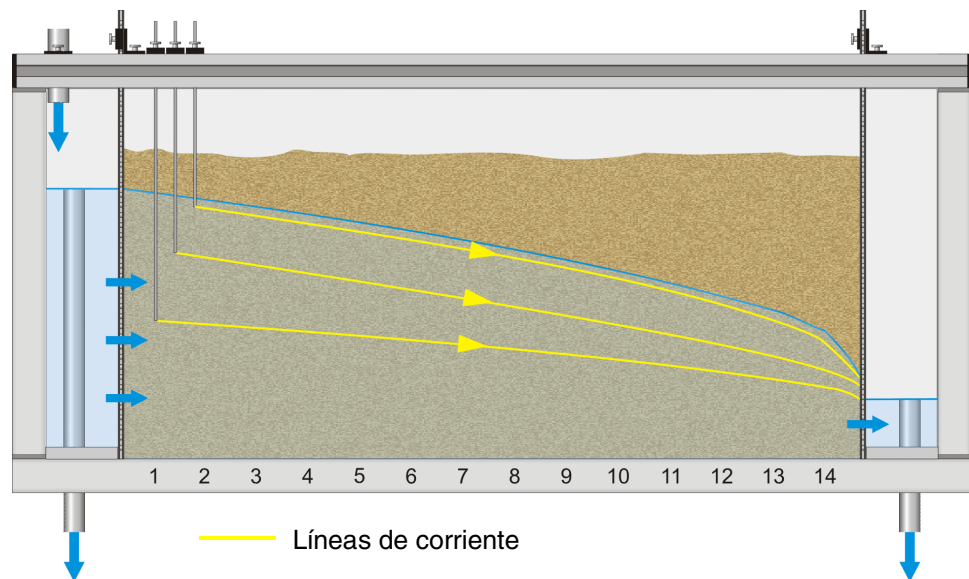


Fig. 4.2 Pared de tablestacas: Líneas de corriente

A partir de las líneas de corriente se ha desarrollado una red de flujo. Esto también representa las líneas equipotenciales, líneas que conectan dos puntos del mismo potencial de diferentes líneas de corriente. Las líneas equipotenciales son siempre perpendiculares a las líneas de corriente. La red de flujo está representada en la Fig. 4.3.

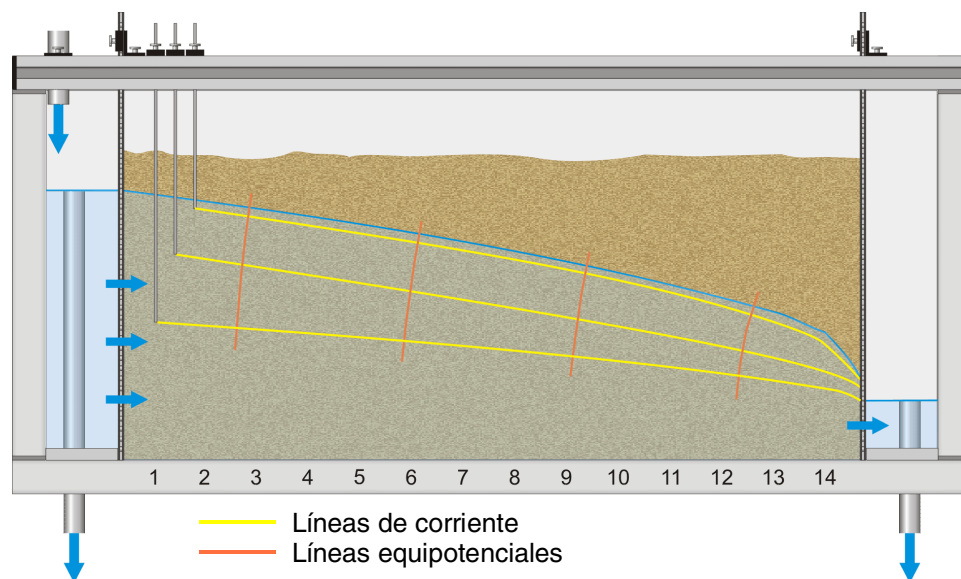


Fig. 4.3 Pared de tablestacas: Red de flujo

4.2 Presa

4.2.1 Objetivo del ensayo

- Determine el desarrollo de las líneas de corriente a través de una presa.
- Desarrolle una red de flujo.

4.2.2 Montaje experimental y rendimiento

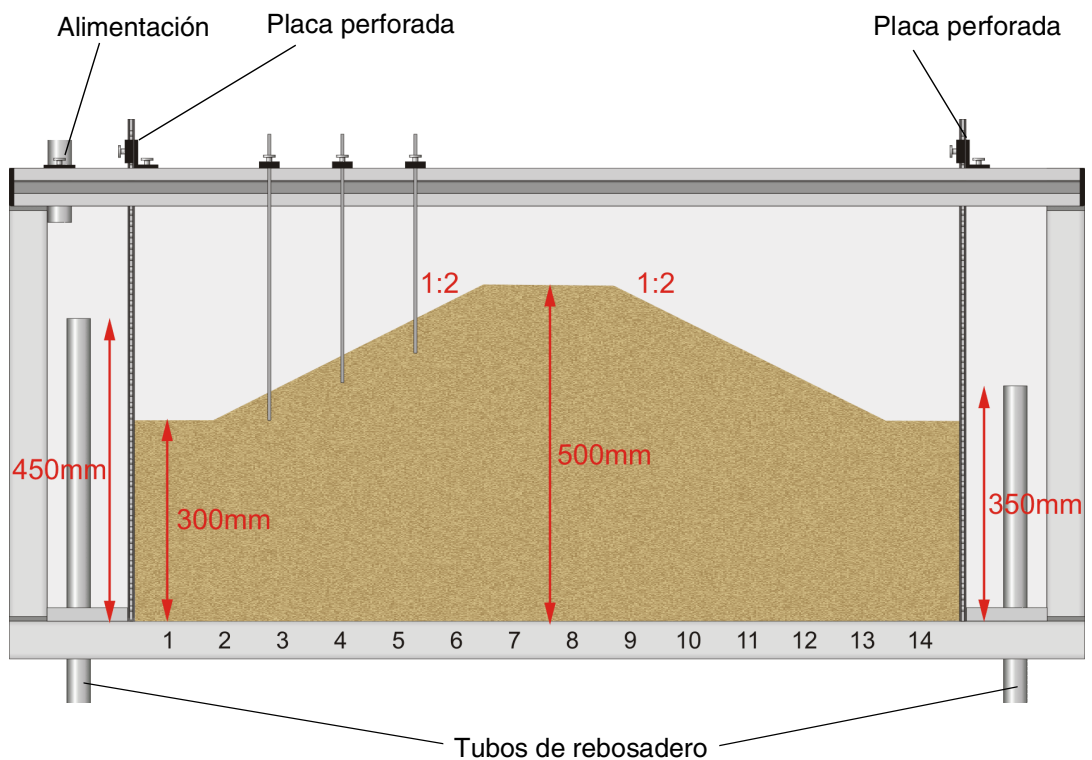


Fig. 4.4 Presa: Montaje experimental

Llenado de arena

1. Introduzca las placas perforadas, doblando las juntas **hacia la arena**.
2. Selle las guías, por ejemplo, con cinta adhesiva, para que no caiga arena en ellas.

Rellene con arena el depósito de ensayo o distribuya la arena existente. Debe haber aprox. 300mm de arena por encima del fondo del depósito de ensayo.

3. Construya una presa de **arena húmeda** como se muestra en la Fig. 4.4, página 30. Los taludes tienen inclinaciones de 1:2. La estabilidad de la presa depende de la distribución granulométrica de la arena. Modifique la pendiente de los taludes si es necesario.
4. Ajuste el tubo de rebosadero izquierdo de manera que su borde superior esté aprox. 450mm por encima del fondo del depósito de ensayo.
5. Ajuste el tubo de rebosadero derecho de manera que su borde superior esté aprox. 350mm por encima del fondo del depósito de ensayo.

Colocación de lanzas de inyección

6. Purgue el aire de las lanzas de inyección y llene el depósito de colorante, véase el capítulo 3.4.2, página 15.
7. Introduzca las lanzas de inyección como se indica en la Fig. 4.4, página 30 en la arena.

Llenado de agua

8. Encienda la bomba y deje que el agua fluya **lentamente** por depósito de ensayo.

Ajuste el caudal con la válvula de alimentación para conseguir un nivel de agua constante.

Observación de ensayos

9. Abra ligeramente las 3 válvulas del depósito de colorante y espere hasta que el colorante salga de las lanzas de inyección y las líneas de corriente se hagan visibles.
 - Si las líneas de corriente son demasiado anchas: Cierre ligeramente las válvulas del depósito de colorante.
 - Pierde muy poco o nada de colorante: Abra más las válvulas del depósito de colorante.
10. Observe y documente las líneas de corrientes.
 - Coloque el papel de calco en la plancha de vidrio y utilice un lápiz para pasar el contorno del lecho de arena y las líneas de corriente al papel de calco.
 - O haga una foto del ensayo.
11. Desarrolle una red de flujo a partir de las líneas de corriente del papel de calco o de la foto impresa.

4.2.3 Resultados de los ensayos y evaluación

Las líneas de corriente se muestran en la Fig. 4.2, la red de flujo, en la Fig. 4.3. La línea de corriente superior representa el nivel de agua en el cuerpo de la presa.

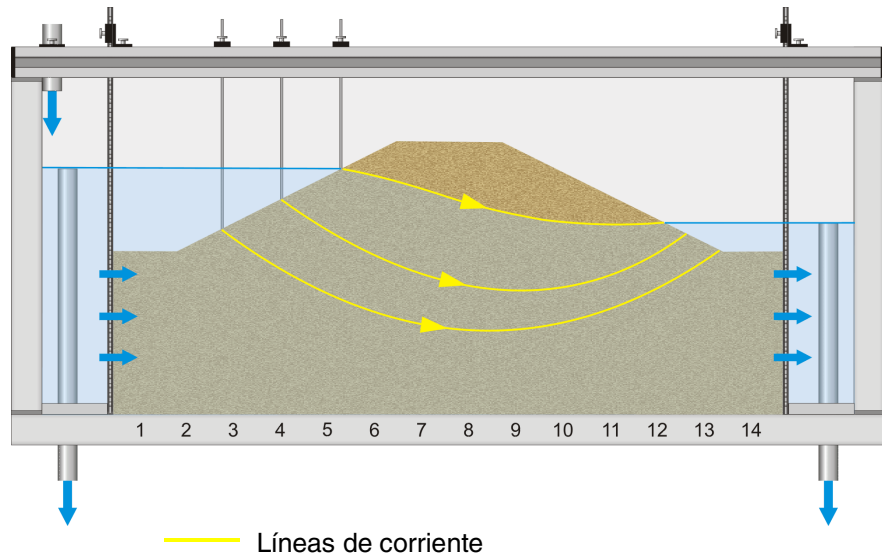


Fig. 4.5 Presa: Líneas de corriente

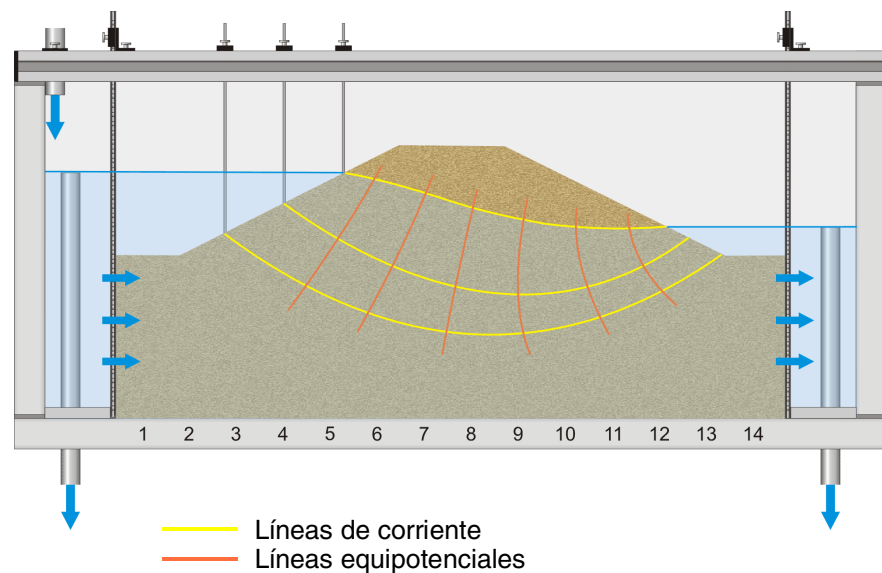


Fig. 4.6 Presa: Red de flujo

4.3 Pared de tablestacas

4.3.1 Objetivo del ensayo

- Determine el curso de las líneas de corriente bajo una pared de tablestacas.
- Desarrolle una red de flujo.
- Determine el desarrollo de presión de agua en el fondo del depósito de ensayo.

4.3.2 Montaje experimental y rendimiento

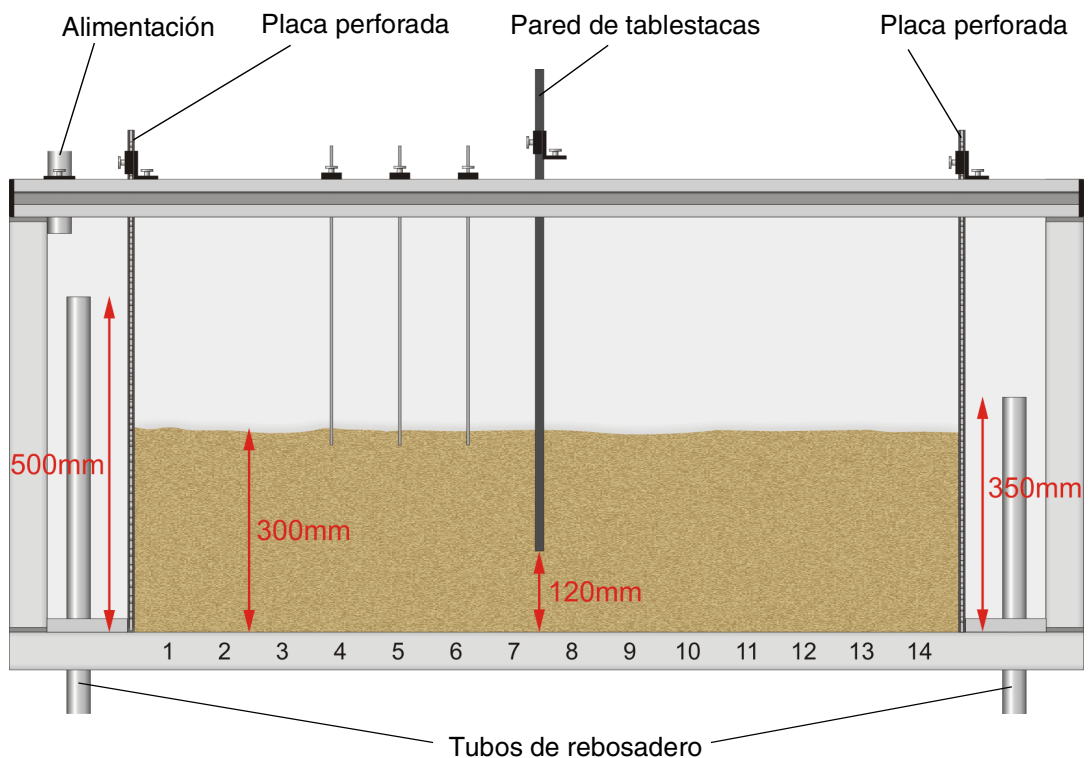


Fig. 4.7 Pared de tablestacas: Montaje experimental

Inserción de la pared de tablestacas y llenado con arena

1. Introduzca las placas perforadas, doblando las juntas **hacia la arena**.
2. Introduzca el modelo de "pared de tablestacas" entre los puntos de medición de la presión 7 y 8, doblando la junta hacia la **izquierda**. Atornille el modelo a las tuercas correderas de las guías.

La pared de tablestacas divide el depósito de ensayo en una cuenca izquierda y otra derecha.

La distancia entre el fondo del depósito de ensayo y el borde inferior de la pared de tablestacas debe ser de aprox. 120mm.

3. Selle las guías, por ejemplo, con cinta adhesiva, para que no caiga arena en ellas.
Rellene con arena el depósito de ensayo o distribuya la arena existente. Debe haber aprox. 300mm de arena por encima del fondo del depósito de ensayo.
4. Ajuste el tubo de rebosadero izquierdo de manera que su borde superior esté aprox. 500mm por encima del fondo del depósito de ensayo.
5. Ajuste el tubo de rebosadero derecho de manera que su borde superior esté aprox. 350mm por encima del fondo del depósito de ensayo.

Colocación de lanzas de inyección

6. Purgue el aire de las lanzas de inyección y llene el depósito de colorante, véase el capítulo 3.4.2, página 15.
7. Introduzca las lanzas de inyección como se indica en la Fig. 4.7, página 34 en la arena.

Llenado de agua

8. Encienda la bomba y deje que el agua fluya **lentamente** hacia el depósito de ensayo hasta que las cuencas izquierda y derecha se llenen hasta la parte superior de los tubos de rebosadero correspondientes.
9. Ajuste el caudal con la válvula de alimentación para conseguir un nivel de agua constante.
10. Si es necesario, purgue los tubos manométricos (véase el capítulo 3.4.3, página 16).

Observación de ensayos

11. Abra ligeramente las 3 válvulas del depósito de colorante y espere hasta que el colorante salga de las lanzas de inyección y las líneas de corriente se hagan visibles.
 - Si las líneas de corriente son demasiado anchas: Cierre ligeramente las válvulas del depósito de colorante.
 - Pierde muy poco o nada de colorante: Abra más las válvulas del depósito de colorante.
12. Observe y documente las líneas de corrientes.
 - Coloque el papel de calco en la plancha de vidrio y utilice un lápiz para pasar el contorno del lecho de arena y las líneas de corriente al papel de calco.
 - O haga una foto del ensayo.
13. Lea los niveles de agua en los tubos manométricos de 1 a 14.
14. Desarrolle una red de flujo a partir de las líneas de corriente del papel de calco o de la foto impresa.

4.3.3 Resultados de los ensayos y evaluación

Las líneas de corriente obtenidas con este montaje experimental se muestran en la Fig. 4.8. La influencia de la constricción bajo la pared de tablestacas en el flujo de infiltración es claramente visible.

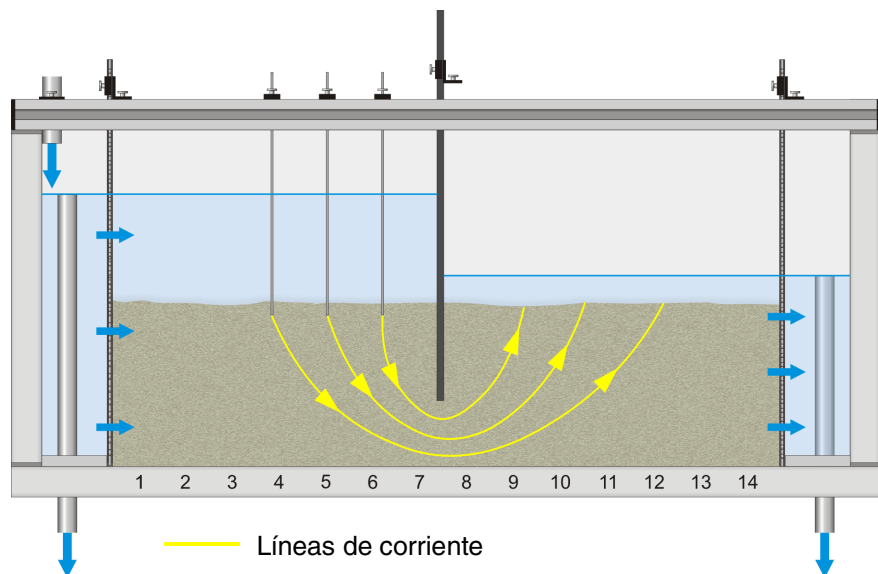


Fig. 4.8 Pared de tablestacas: Líneas de corriente

La Fig. 4.9 muestra la red de flujo desarrollada a partir de las líneas de corriente.

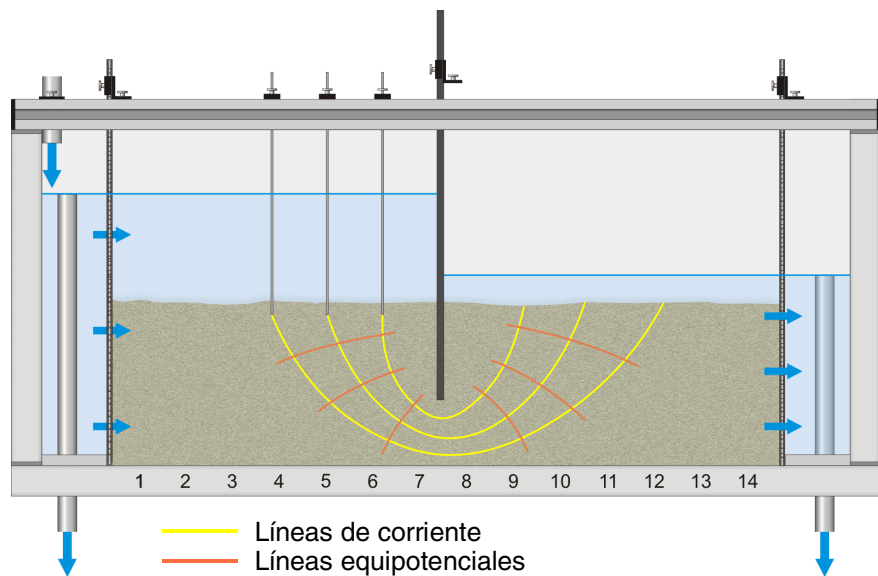


Fig. 4.9 Pared de tablestacas: Red de flujo

Los niveles de agua medidos en los tubos manométricos se enumeran en la Tab. 4.1 y se muestran gráficamente en la Fig. 4.10.

N° de tubo manométrico	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Nivel de agua en mm	513	510	507	500	492	479	461	437	412	396	386	378	373	371

Tab. 4.1 Pared de tablestacas: Niveles de agua en los tubos manométricos

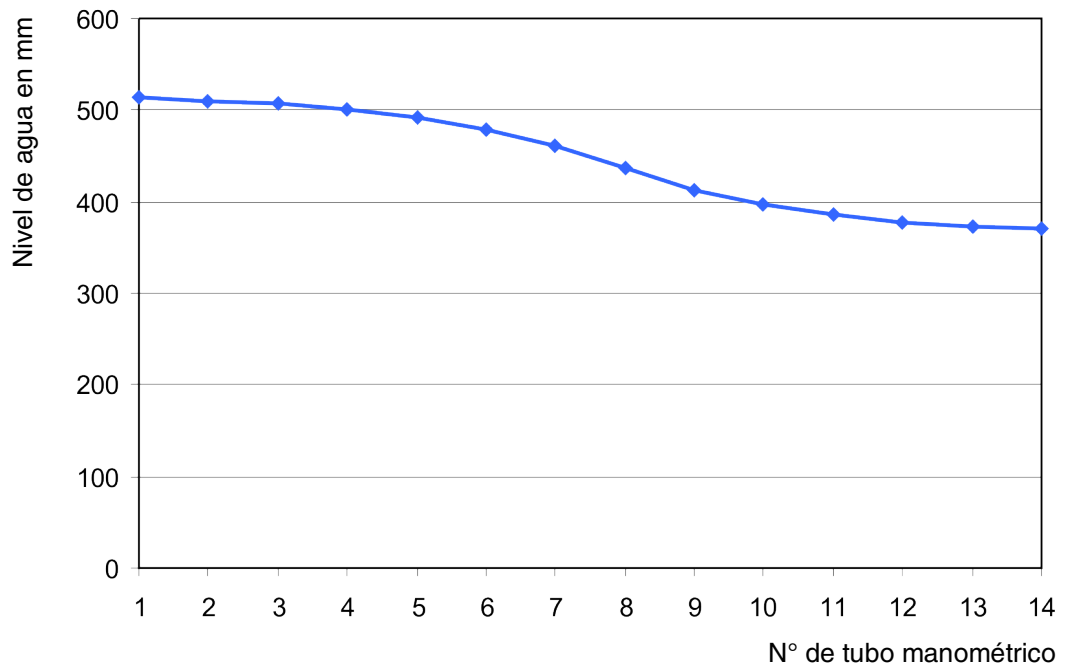


Fig. 4.10 Pared de tablestacas: Niveles de agua en los tubos manométricos

Los niveles de agua en los tubos manométricos muestran que la presión de agua en el fondo del depósito de ensayo disminuye en la dirección del flujo.

4.4 Muro de contención

4.4.1 Objetivo del ensayo

- Determine el desarrollo de presión de agua en un muro de contención.

4.4.2 Montaje experimental y rendimiento

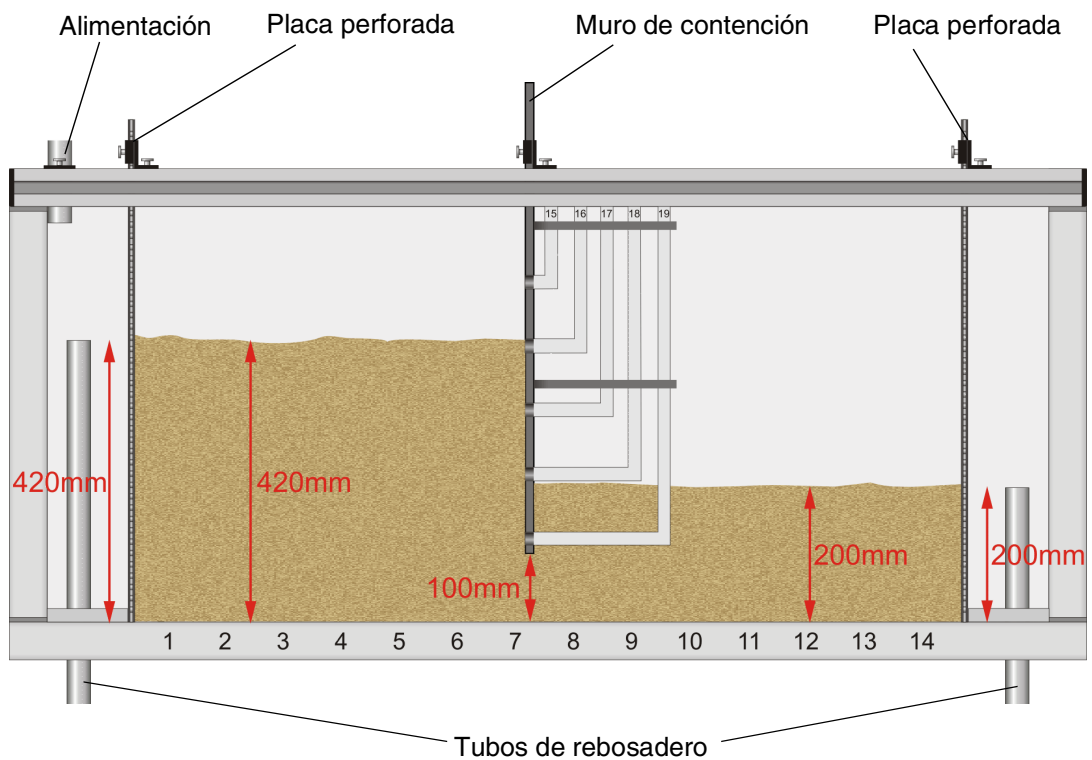


Fig. 4.11 Muro de contención: Montaje experimental

Inserción del muro de contención y llenado con arena

1. Introduzca las placas perforadas, doblando las juntas **hacia la arena**.
2. Introduzca el modelo de "muro de contención" entre los puntos de medición de la presión 7 y 8, doblando la junta hacia la **izquierda**. Atornille el modelo a las tuercas correderas de las guías.

El muro de contención divide el depósito de ensayo en una cuenca izquierda y otra derecha.

La distancia entre el fondo del depósito de ensayo y el borde inferior del muro de contención debe ser de aproximadamente 100mm.

3. Selle las guías, por ejemplo, con cinta adhesiva, para que no caiga arena en ellas.

Rellene con arena el depósito de ensayo o distribuya la arena existente. Debe haber aproximadamente 420mm de arena por encima del fondo del depósito de ensayo en la cuenca izquierda y aproximadamente 200mm de arena por encima del fondo del depósito de ensayo en la cuenca derecha.

4. Ajuste el tubo de rebosadero izquierdo de manera que su borde superior esté aprox. 420mm por encima del fondo del depósito de ensayo.
5. Ajuste el tubo de rebosadero derecho de manera que su borde superior esté aprox. de 200mm por encima del fondo del depósito de ensayo.

Llenado de agua

6. Encienda la bomba y deje que el agua fluya **lentamente** por depósito de ensayo.

Ajuste el caudal con la válvula de alimentación para conseguir un nivel de agua constante.

Observación de ensayos

7. Lea los niveles de agua en los tubos de medición de la presión 15 a 19 del muro de contención.

4.4.3 Resultados de los ensayos y evaluación

Los niveles de agua leídos en los tubos de medición de la presión 15 a 19 del muro de contención se muestran en la Fig. 4.12.

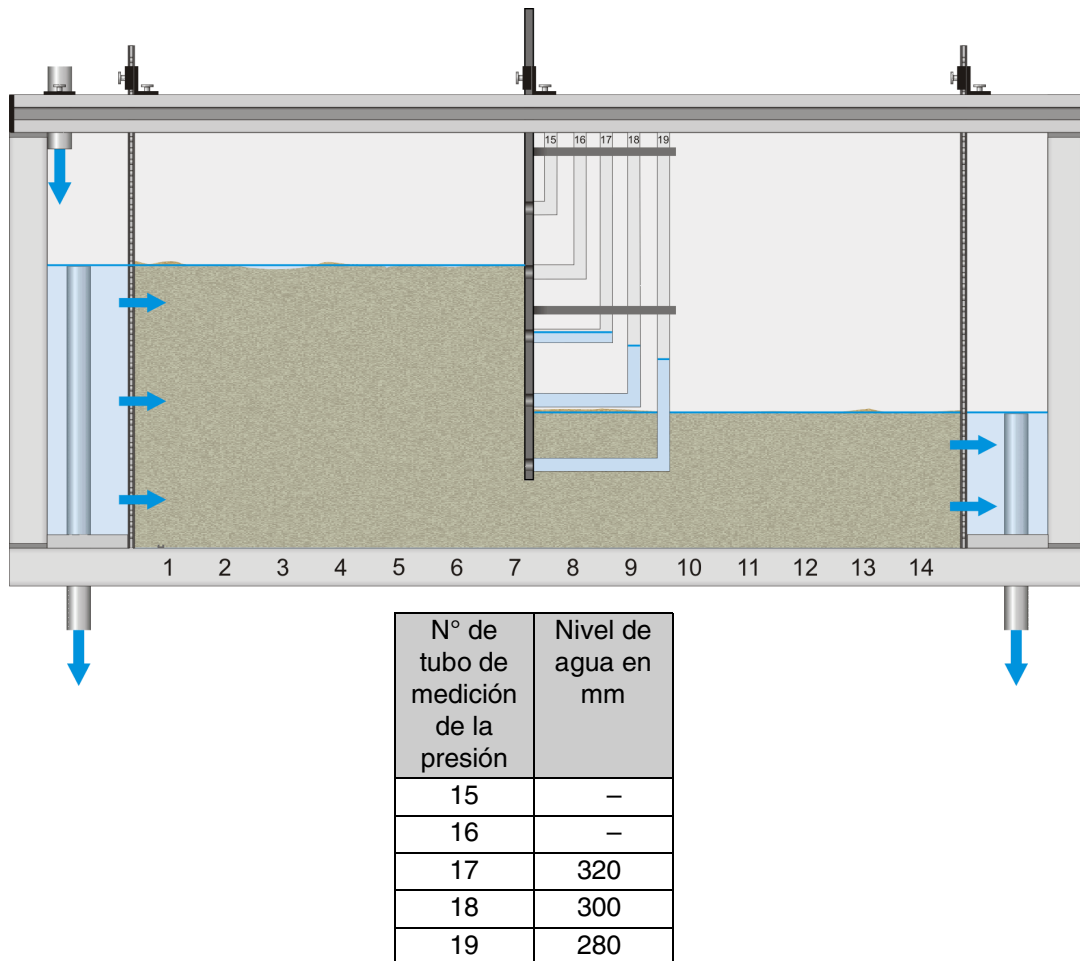


Fig. 4.12 Muro de contención: Niveles de agua en los tubos de medición de la presión

Los resultados de los ensayos muestran que la presión de agua sobre el muro de contención disminuye al aumentar la profundidad.

4.5 Fundamento

4.5.1 Objetivo del ensayo

- Determine el desarrollo de presión de agua en un fundamento dependiendo de la profundidad de la pared de tablestacas.

4.5.2 Montaje experimental y rendimiento

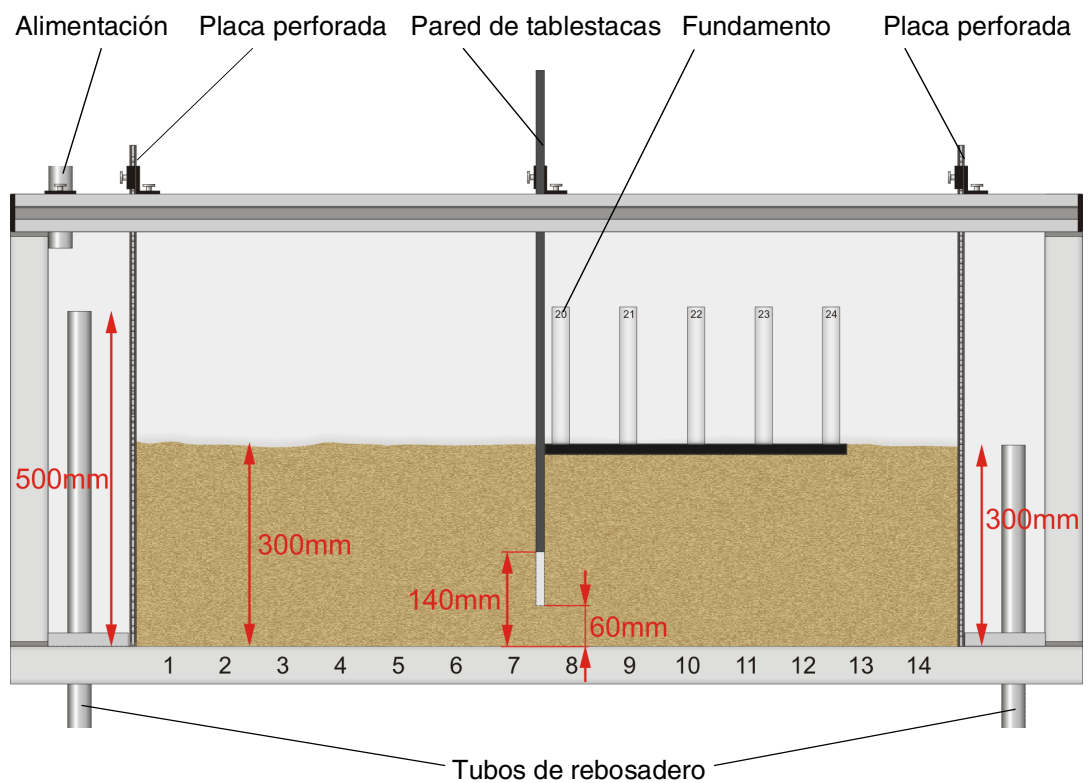


Fig. 4.13 Fundamento: Montaje experimental

Inserción de la pared de tablestacas y fundamento, y llenado con arena

1. Introduzca las placas perforadas, doblando las juntas **hacia la arena**.
2. Introduzca el modelo de "pared de tablestacas" entre los puntos de medición de la presión 7 y 8, doblando la junta hacia la **derecha**. Atornille el modelo a las tuercas correderas de las guías.

La pared de tablestacas divide el depósito de ensayo en una cuenca izquierda y otra derecha.

La distancia entre el fondo del depósito de ensayo y el borde inferior de la pared de tablestacas debe ser de aprox. 60mm.

3. Selle las guías, por ejemplo, con cinta adhesiva, para que no caiga arena en ellas.
Rellene con arena el depósito de ensayo o distribuya la arena existente. Debe haber aprox. 300mm de arena por encima del fondo del depósito de ensayo.
4. Coloque el modelo del "fundamento" en la arena a la derecha de la pared de tablestacas. El fundamento debe estar directamente contra la pared de tablestacas.
5. Ajuste el tubo de rebosadero izquierdo de manera que su borde superior esté aprox. 500mm por encima del fondo del depósito de ensayo.
6. Ajuste el tubo de rebosadero derecho de manera que su borde superior esté a la misma altura que el borde superior de la placa del fundamento (aprox. 300mm).

Llenado de agua

7. Encienda la bomba y deje que el agua fluya **lentamente** por depósito de ensayo.
8. Ajuste el caudal con la válvula de alimentación para conseguir un nivel de agua constante.

Observación de ensayos

9. Lea los niveles de agua en los tubos de medición de la presión 20 a 24 del fundamento.

Ejecución del ensayo con distintas alturas de pared de tablestacas

10. Modifique la altura de la pared de tablestacas de manera que la distancia entre el fondo del recipiente de ensayo y el borde inferior de la pared de tablestacas sea de unos 140mm.

A continuación, repita el ensayo.

4.5.3 Resultados de los ensayos y evaluación

Los niveles de agua leídos en los tubos de medición de la presión 20 a 24 del fundamento se muestran en la Fig. 4.14 y la Fig. 4.15.

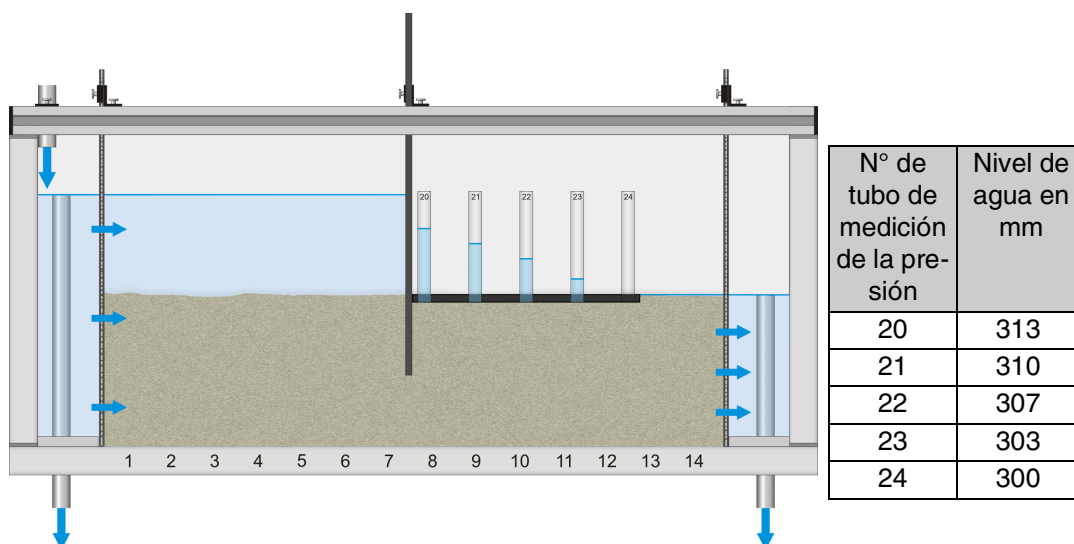


Fig. 4.14 Fundamento: Niveles de agua en los tubos de medición de la presión
El borde inferior de la pared de tablestacas está 140mm por encima del fondo del depósito de ensayo

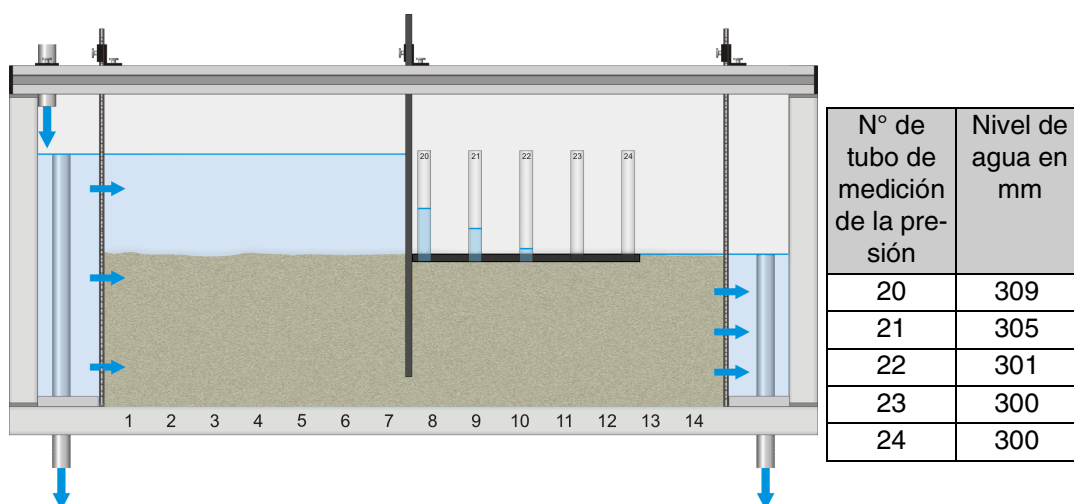


Fig. 4.15 Fundamento: Niveles de agua en los de medición de la presión
El borde inferior de la pared de tablestacas está 60mm sobre el fondo del depósito de ensayo

Los niveles de agua en los tubos de medición de la presión del fundamento muestran: Cuanto más profundo se instale la pared de tablestacas en la arena, menor será la presión de agua en el fundamento.

Si la pared de tablestacas se instala a muy poca profundidad en la arena, la fuerza ascensional del agua es mayor que el peso del suelo que la contrarresta. El agua y el suelo socavan entonces el fundamento. Este caso se denomina "fractura hidráulica". La comprobación para evitar la fractura hidráulica del suelo es uno de los cálculos más importantes para las estructuras en zonas de suelo saturado de agua subterránea.

5 Anexo

5.1 Datos técnicos

Dimensiones

Largo x Ancho x Alto	1870 mm x 790 mm x 1850 mm
Peso	aprox. 220 kg

Alimentación eléctrica

Tensión	230 V
Frecuencia	50 Hz
Fases	1
Consumo nominal (potencia)	0,1 kW
Alternativas opcionales, véase la placa de características	

Bomba

Tipo de construcción	bomba centrífuga
Fabricante	Halm
Tipo	BUP 25-4.0 U180
Caudal	máx. 4 m ³ /h
Altura de elevación	máx. 4 m

Depósito de ensayo

Volumen útil	aprox. 98 L
--------------	-------------

Depósito de agua

Volumen	aprox. 115 L
---------	--------------

Depósito de colorante

Capacidad	500 mL
-----------	--------

Panel de manómetros

Número de tubos manométricos	14
------------------------------	----

Placa perforada

Número	2
Abertura de luz de malla del tamiz	0,315 mm

Modelos

- 1 x "pared de tablestacas"
- 1 x "muro de contención" con 5 tubos de medición de la presión
- 1 x "fundamento" con 5 tubos de medición de la presión

A proporcionar por el cliente

Arena	
Calidad	arena lavada
Cantidad	aprox. 75 L
Tamaño del grano	1...2 mm

5.2 Tablas y diagramas

Unidad	mm ³	cm ³	L	m ³
1 mm ³	1	0,001	0,000001	0,000000001
1 cm ³	1.000	1	0,001	0,000001
1 L	1.000.000	1.000	1	0,001
1 m ³	1.000.000.000	1.000.000	1.000	1

Tab. 5.1 Tabla de conversión para unidades de volumen

Unidad	L/s	L/min	L/h	m ³ /min	m ³ /h
1 L/s	1	60	3.600	0,06	3,6
1 L/min	0,01667	1	60	0,001	0,06
1 L/h	0,000278	0,01667	1	0,00001667	0,001
1 m ³ /min	16,667	1.000	60.000	1	60
1 m ³ /h	0,278	16,667	1.000	0,01667	1

Tab. 5.2 Tabla de conversión para unidades de caudal volumétrico

Unidad	bar	mbar	Pa	kPa
1 bar	1	1.000	100.000	100
1 mbar	0,001	1	100	0,1
1 Pa	0,00001	0,01	1	0,001
1 kPa	0,01	10	1.000	1

Tab. 5.3 Tabla de conversión para unidades de presión

5.3 Ficha de trabajo

Fecha:		N° de ensayo:	
---------------	--	----------------------	--

Montaje experimental	
<input type="checkbox"/> Zanja de drenaje	<input type="checkbox"/> Presa
<input type="checkbox"/> Pared de tablestacas	<input type="checkbox"/> Muro de contención <input type="checkbox"/> Fundamento
Altura del lecho de arena: Unidad _____ mm sobre el suelo del depósito de ensayo Diferente en la cuenca izquierda: _____ mm sobre el suelo del depósito de ensayo en la cuenca derecha: _____ mm sobre el suelo del depósito de ensayo	
Altura del tubo de rebosadero izquierdo: _____ mm sobre el suelo del depósito de	
Altura del tubo de rebosadero derecho: _____ mm sobre el suelo del depósito de	
Posición de la pared de tablestacas / muro de contención: Entre el punto de medición de presión _____ y _____	
Borde inferior de la pared de tablestacas / muro de contención: _____ mm sobre el suelo	

N° de tubo mano-métrico	Nivel de agua en mm
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	
11	
12	
13	
14	

N° de tubo de medición de la	Nivel de agua en mm
Modelo "muro de contención"	
15	
16	
17	
18	
19	
Modelo "fundamento"	
20	
21	
22	
23	
24	

ANEXO 2

Panel fotográfico



Colocación de agua con valde al depósito de agua.



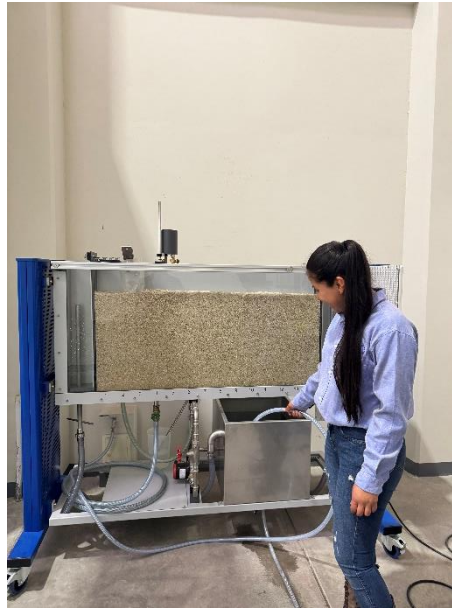
Purga de aire de la bomba.



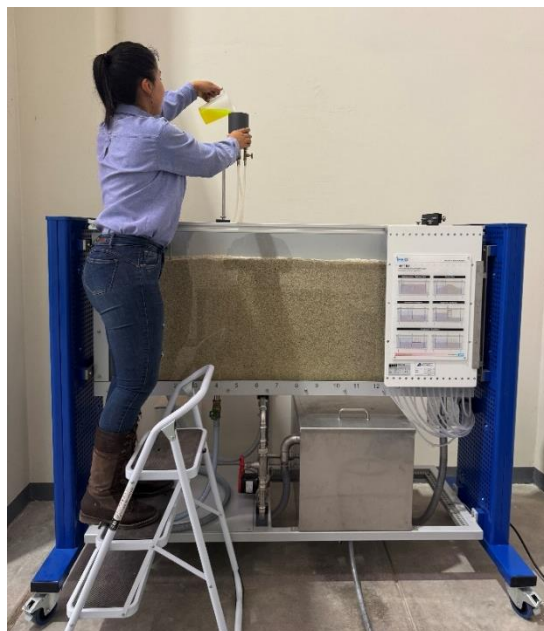
Arena de cuarzo presentación filtersand.



Arena de cuarzo presentación 1/16".



Llenado del agua con manguera.



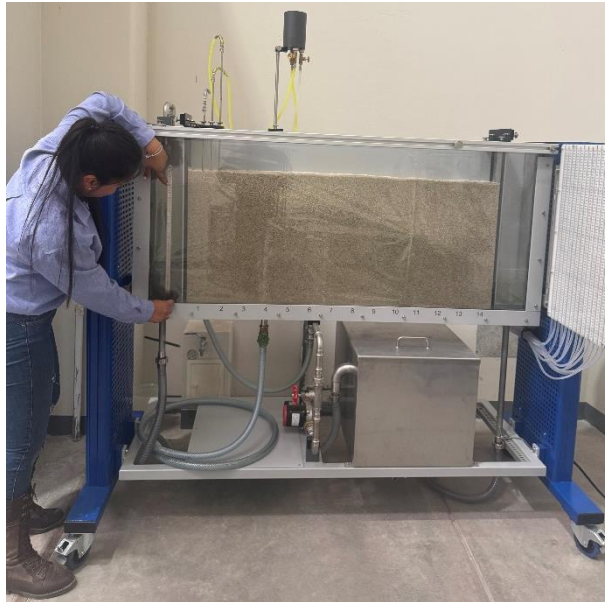
Colocación de la fluorescina mezclada con agua en el depósito de tinta.



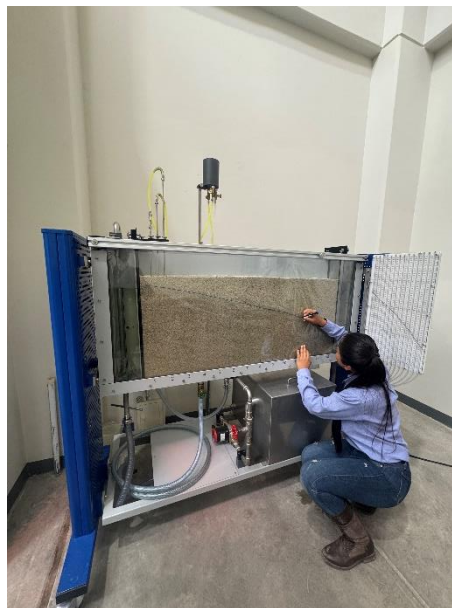
Medición con regla de la altura del tubo rebosadero derecho.



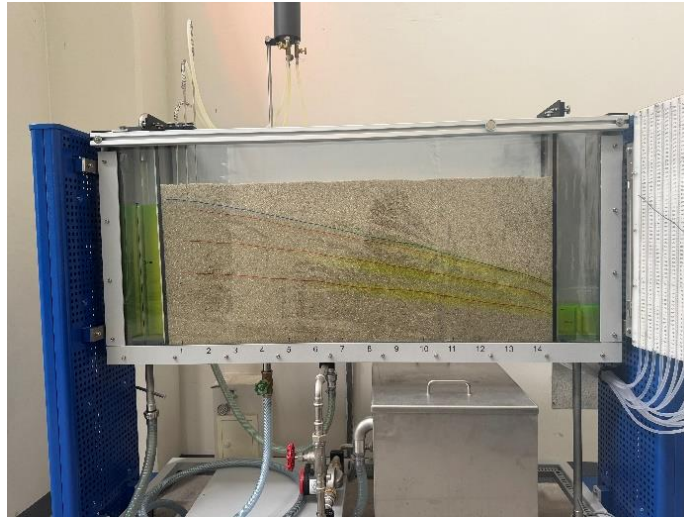
Eliminación del aire con jeringa.



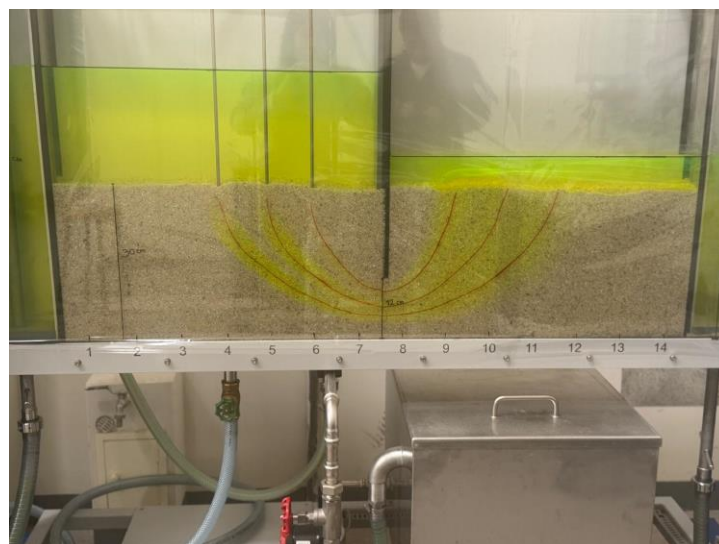
Medición con regla de la altura del tubo rebosadero izquierdo.



Registro de líneas de corriente sobre papel celofán.



Resultado de las líneas de corriente en un medio poroso para ensayo zanja de drenaje.



Resultado de las líneas de corriente en un medio poroso, para pared de tablestaca.



Fluorescina en frasco es un compuesto químico orgánico que se utiliza principalmente como un colorante fluorescente. Se usó para poder registrar el comportamiento del flujo en el medio poroso.



Saco de arena de cuarzo 1/16. Es un mineral que es una forma cristalina del dióxido de silicio (SiO_2). También es un medio filtrante y es un material utilizado en la filtración de agua debido a sus propiedades físicas y químicas.



Una jarra de 2 litros. La cual será de apoyo para poder ingresar y retirar la arena del depósito del ensayo, así como la limpieza de las lanzas de inyección.



Jarra de 500 ml con agua, el tamaño de la jarra permite verter el líquido en el depósito del colorante.



El destornillador es una herramienta manual utilizada para apretar o aflojar tornillos. La parte principal de un desarmador es su mango y una punta metálica que encaja en la ranura del tornillo se utilizará para desajustar y ajustar la bomba para purgar el aire existente.



Tubo de plástico semitransparente. Se usó para suministrar agua al depósito de agua.



Espátula de 3". Se usó para manipular la arena de cuarzo dentro del depósito de ensayo.



Plumones indelebles. Se utilizó para registrar el comportamiento del flujo una vez que las lanzas de inyección se quedaron sin tinta.



Regla metálica. Se utilizó para medir las alturas de la arena a llenar y las alturas de los tubos rebosaderos, tanto del lado izquierdo como del derecho, las cuales se indican en cada uno de los ensayos realizados.



Jeringa de 120 ml. Se utilizó para purgar el aire de los tubos conectados al panel manométrico.

ANEXO 3

Matriz de consistencia

Definición del problema	Objetivos	Hipótesis	Variables e indicadores	Metodología
Problema principal	Objetivo general	Hipótesis general	<u>Variable independiente</u>	<u>Tipo de investigación</u>
¿Cómo analizar el comportamiento numérico y experimental en laboratorio del efecto de un dren sobre un acuífero libre saturado?	Analizar el comportamiento numérico y experimental en un laboratorio del efecto de un dren sobre un acuífero libre saturado.	¿Se podrá analizar el comportamiento numérico y experimental en laboratorio del efecto de un dren sobre un acuífero libre saturado?	Efecto de un dren sobre un acuífero libre saturado. Indicadores de la V.I: Línea de corriente Presión	Aplicada <u>Nivel de investigación</u> Predictivo <u>Método</u> <ul style="list-style-type: none"> • Descriptivo • Inductivo • Experimental

Problemas secundarios	Objetivos específicos	Hipótesis específicas	<u>Variable dependiente</u>
¿El modelo numérico predice el real comportamiento de un dren sobre un acuífero libre saturado?	Identificar el modelo numérico y los parámetros necesarios para el análisis numérico del efecto de un drenaje sobre un acuífero libre saturado.	Se podría identificar el modelo numérico y los parámetros necesarios para el análisis numérico del efecto de un drenaje sobre un acuífero libre saturado.	Análisis comparativo numérico y experimental en laboratorio.
¿Qué parámetros son necesarios para realizar el análisis del comportamiento experimental de un dren sobre un acuífero libre saturado?	Determinar los parámetros esenciales para el análisis experimental del comportamiento de un drenaje en un acuífero libre saturado en el laboratorio.	Se podrá determinar los parámetros esenciales para el análisis experimental del comportamiento de un dren en un acuífero libre saturado en el laboratorio.	Indicadores de la v.d: Permeabilidad Porosidad
¿Cómo se realiza la comparación numérica y experimental?	Comparar los resultados obtenidos experimentalmente con el numérico.	Se podrá comparar los resultados numéricos y experimentales de un dren sobre un acuífero libre saturado.	