



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

ESTUDIO EXPERIMENTAL Y NUMÉRICO DE LA FORMACIÓN DE UN LENTE DE
AGUA DULCE EN UNA ISLA BIDIMENSIONAL

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

JOSÉ MANUEL ZOLEZZI LÓPEZ

PROFESOR GUÍA:
PAULO HERRERA RICCI

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ALBERTO DE LA FUENTE STRANGER
FÉLIX PÉREZ SOTO

SANTIAGO DE CHILE
2016

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
POR: José Manuel Zolezzi López
FECHA: OCTUBRE DE 2016
PROF. GUÍA: Sr. Paulo Herrera Ricci

ESTUDIO EXPERIMENTAL Y NUMÉRICO DE LA FORMACIÓN DE UN LENTE DE AGUA DULCE EN UNA ISLA BIDIMENSIONAL

El problema de la intrusión salina en acuíferos costeros de las islas del mundo, se ha convertido en la principal causa de degradación de la calidad del agua en las zonas pobladas cercanas a costas, debido a la instalación de pozos en las cercanías del mar y el desconocimiento de la dinámica de las formaciones acuíferas subterráneas, que son abastecidas únicamente por una recarga producida por las precipitaciones que caen sobre estos cuerpos de tierra. Motivado por esto, el presente trabajo se enfoca en la implementación de un modelo experimental y numérico que simule la formación de un lente de agua dulce en una isla bidimensional, con el fin de estudiar la forma y profundidad de la interfaz de densidad en régimen permanente entre el agua de mar y dulce entrante, y la influencia de la recarga superficial y la conductividad hidráulica sobre este proceso, para analizar la validez de las soluciones analíticas existentes para las dimensiones del montaje y la relevancia de los parámetros hidrogeológicos sobre la dinámica de la formación de acuíferos costeros.

Para esto, se diseñó y construyó un montaje experimental que simula las condiciones de nivel de mar en la costa y recarga superficial uniforme sobre la superficie de la isla. Se realizaron seis experimentos de laboratorio, considerando tres recargas superficiales de agua dulce teñida con colorante y dos conductividades hidráulicas distintas, que fueron caracterizadas por ensayos de permeámetro de carga constante. Se tomó registro de cada experiencia mediante fotografías de la evolución del fenómeno hasta alcanzar el estado estacionario. Mediante el análisis de imágenes de los experimentos, se logró identificar la interfaz y el alcance de la parte central para distintos tiempos.

El modelo numérico fue construido en el paquete computacional COMSOL, utilizando un modelo de flujo de dos fases en medios permeables. El problema se modeló como flujo de dos fases miscibles y los parámetros relevantes se asignaron de acuerdo a las propiedades del suelo y las condiciones de borde e inicial según lo observado en el montaje experimental. Los resultados fueron comparados cualitativa y cuantitativamente con lo encontrado mediante el análisis de imágenes de los experimentos y las soluciones teóricas. Además, se aplicó una de las soluciones analíticas estudiadas al caso de la Isla de Pascua, con el fin de estimar la profundidad de la interfaz y el nivel freático.

Se obtuvo que el montaje experimental fue capaz de reproducir la forma y evolución de la interfaz en el tiempo, validando las soluciones analíticas existentes para una razón de aspecto límite entre la profundidad máxima del lente y el ancho de la isla de 1:5, ratificando lo obtenido por [Dose et al. \(2014\)](#). Por otro lado, el modelo numérico arrojó buenos resultados para la granulometría más gruesa. Se encontró también, que la conductividad hidráulica es el parámetro que condiciona prioritariamente el alcance del lente de agua dulce, mientras la recarga sólo tiene una influencia menor en el inicio del proceso transiente del acuífero en formación.

*Dedicado a
Julieta y Julia, mis destellos: uno en la tierra y el otro en el cielo.*

Agradecimientos

Primero que todo quiero agradecer a mi familia. A mi madre Julieta y mi abuela Julia, que sin duda son las personas más maravillosas que la vida me pudo entregar. Gracias por su incondicionalidad en todo momento, por apoyarme y protegerme cuando fue necesario, por darme la oportunidad siempre de elegir mi camino y por entregarme alegría, afecto, risas, retos y lecciones. Este camino lo iniciamos y terminamos juntos, los tres. Agradecerle también a mis tíos y primos, por acompañarme todos estos años, en especial a Viviana, Sebastián y Alejandro, por estar siempre dispuestos a ayudarme en lo que necesité. A la familia Valenzuela, por hacerme sentir siempre como un primo más.

A la Facultad, por permitirme crecer en un ambiente grato y ameno, a pesar del rigor académico. Cada clase, charla, seminario o asamblea me sirvió para construir mi visión de la ingeniería en la sociedad y el rol de cambio que debemos cumplir.

A Paulo, por haber creído y confiado en mí y motivarme a ir un poco más allá siempre. Le deseo lo mejor. A Beto y Félix, por sus correcciones y buenos consejos. A los Profes de Hidráulica, por su continuo apoyo en mi formación, en especial a los profes Katherine, Marcelo y James, por haberme permitido ser su auxiliar. Al CEGA por facilitarme COMSOL para mi memoria.

A la gente de Hidráulica. A la Jacque, por ser nuestra protectora y darte el tiempo de conocerme. A la Vivi, por tu alegría y ayuda en todo lo que necesité. A JD por ser un crack, por tu confianza y por las onces en el laboratorio. A Geovanni, por esas conversaciones necesarias en medio de la soledad del laboratorio. A Manuel, Paty y Álvaro T., por ayudarme siempre que se los pedí.

A mis amigos de la Universidad. A los de Plan Común: Checo, Chela, Chino, Jaime, Chico, Diego, Yoshi, Pelao, porque siempre es grato verlos y ver que el tiempo no pasa. A CiBilis, por las jornadas de jarana bien vividas y el aguante codo a codo. A los Hidráulicos: Arturo, Jaque, Pacheco, Pauli, Javier, Jesús, Rorro, Michelle, Enzo, Soto, Caichá, Pino, Gerald, Alex y Edi (Gracias por los consejos y ayuda en el lab), en especial con los que compartí en la 339, por su calidez humana y aguante!. Al Seba y la Coni, por ser una dupla de oro. A Felipe y Emilio, por todo lo vivido juntos, los quiero mucho. A mi gran equipo de Topo: Feñita, Jaime V., Jones y Chalo, por su cariño.

A l@s amig@s que la vida me entregó. A Claudio, Sergio y Constanza T., por ser los hermanos que nunca tuve. A Hugo, Iván, Mono, Hermo, Mau, Harold y Willy, por conocernos y crecer juntos al amparo del Roble. A Claudio D., Chio, Cochi, Comegato y José T., son grandes cabr@s.

A los Diablos de Ingeniería, por acogerme durante toda mi etapa universitaria en el equipo, por enseñarme este maravilloso deporte que es el Rugby y por permitirme vivir la lealtad, fraternidad, compañerismo y superación. Son un tremendo grupo humano. ¡Qué bonita es la amistad!

A mi Tropa Quitracollán, por ser mi cable a tierra cuando el rigor universitario me alejaba de lo sencillo e importante, por ser motores de cambio y por permitirme guiarlos durante este año con sencillez y mucho cariño. Siempre será mi segunda casa el Roble de Fuego.

A Coni, por brindarme tu cariño y amor durante la última etapa de este camino. Por estar ahí siempre, por entenderme, aguantarme y ser mi polola y amiga. Soy muy feliz y dichoso a tu lado.

Tabla de Contenido

1	Introducción	1
1.1	Motivación	1
1.2	Objetivos	2
1.2.1	General	2
1.2.2	Específicos	2
2	Revisión de antecedentes	3
2.1	Intrusión salina y formación de acuíferos costeros en islas	3
2.1.1	Procesos dispersivos en la zona de mezcla	4
2.1.2	Impacto de fluctuaciones de nivel del mar	5
2.1.3	Procesos hidroquímicos	5
2.2	Caracterización conceptual del problema	5
2.2.1	Teoría de interfaz abrupta	5
2.2.2	Teoría de interfaz dispersa	7
2.2.3	Soluciones analíticas desarrolladas	8
2.2.4	Evolución temporal de un lente de agua dulce	12
2.3	Trabajos experimentales previos	13
2.4	COMSOL Multiphysics	14
3	Metodología	17
3.1	Modelo físico	17
3.2	Diseño del montaje experimental	18
3.2.1	Recipiente principal	18
3.2.2	Sistema de recarga superficial y lateral	19
3.3	Elección y propiedades de los medios permeables	21
3.3.1	Elección de granulometrías	21
3.3.2	Conductividad hidráulica	21
3.3.3	Porosidad	22
3.4	Propiedades del agua de mar	22
3.5	Captura y análisis de imágenes	23
3.6	Construcción del modelo numérico	26
3.6.1	Geometría	26
3.6.2	Construcción de la malla de elementos	27
3.6.3	Parámetros de entrada	28
3.6.4	Condiciones iniciales y de borde	29
3.6.5	Balance de masa	30
3.7	Propagación de errores	31

4	Resultados y Análisis	33
4.1	Descripción de las experiencias	33
4.2	Interfaz de densidad en régimen permanente	35
4.3	Evolución temporal de la profundidad máxima de la interfaz	43
4.4	Validez de las soluciones analíticas en base a las razones de aspecto	50
5	Aplicación de la solución analítica al caso de la isla de Rapa Nui	54
6	Conclusiones y recomendaciones	57
6.1	Montaje experimental	57
6.2	Análisis de imágenes	58
6.3	Modelo numérico	58
6.4	Relevancia de K y R en la profundización de la interfaz	59
	Bibliografía	59
	Anexos	62
	Anexo A Fotografías del montaje experimental	63
	Anexo B Medición de conductividad hidráulica	66
	Anexo C Resultados experimentales en régimen permanente	70
	Anexo D Resultados modelo numérico en régimen permanente	72
	Anexo E Datos de precipitaciones en Rapa Nui, Chile	74
	Anexo F Análisis adimensional del tiempo característico de recarga en islas	75

Índice de tablas

3.1	Comparación resultados permeámetro y Método de Shepherd.	22
3.2	Porosidades obtenidas	22
3.3	Intensidades de filtro	25
3.4	Parámetro de entrada utilizados en el modelo para la matriz de suelo	28
3.5	Parámetros de entrada agua dulce y de mar utilizados en el modelo numérico	29
3.6	Rangos medidos y errores experimentales de instrumentos utilizados	32
3.7	Errores asociados a los parámetros relevante del montaje	32
4.1	Experiencias de laboratorio y simulaciones realizadas.	33
4.2	Transformación o escala de pixeles a cm según cada experiencia realizada	34
4.3	Balance de masa de cada simulación realizada.	38
4.4	Resumen profundidad máxima alcanzada.	38
4.5	Resumen profundidad de inicio de bordes de la interfaz	39
4.6	Comparación longitud l_e experimental y teórica	40
4.7	Comparación de tiempos a estado estacionario.	50
4.8	Resumen de errores relativos de las observaciones experimentales respecto a las soluciones analíticas y resultados numéricos de la profundidad máxima en régimen permanente.	51
4.9	Relaciones de aspecto entre la profundidad máxima de la interfaz en régimen permanente y el ancho total del montaje, para los resultados experimentales y teóricas.	53
B.1	Datos medición conductividad hidráulica	67
B.2	Resumen K calculados.	68
E.1	Precipitación media anual en Rapa Nui periodo 1983 - 2015.	74
F.1	Tiempos de recarga para cada zona de permeabilidad según el nivel de infiltración.	76

Índice de figuras

2.1	a) Antes de los bombeos excesivos; b) Después del bombeo excesivo de varios pozos. Elaboración propia.	4
2.2	Mecanismo generación zona de mezcla. Modificada de (García-Huidobro Covarrubias, 2007)	4
2.3	Corte vertical de un acuífero costero. Modificado de (Todd & Mays, 2005)	6
2.4	Carga hidráulica en agua de densidad variable, donde <i>FW</i> representa agua dulce, <i>DW</i> agua difusa de mezcla y <i>SW</i> agua salada. Modificado de (Luszczynski, 1961)	7
2.5	Volumen de control. Modificado de (Fetter, 1972)	9
2.6	Diagrama en corte que define el esquema conceptual. Modificado de (Vacher, 1988)	10
2.7	Esquema conceptual modificado del planteamiento de Van der Veer (1977).	12
2.8	Esquema del modelo físico utilizado en sus experimentos. Modificado de Stoeckl & Houben (2012).	13
2.9	Interfaz gráfica COMSOL.	16
3.1	Modelo físico a simular.	17
3.2	Esquema recipiente prismático.	18
3.3	Esquema montaje inicial.	19
3.4	Sistema de distribución de caudal.	20
3.5	(a) Densímetro marca Ambrus Gamma; (b) Medidor multiparámetro W340i	23
3.6	(a) Comparación de intensidades de color en un perfil vertical para una experiencia con Granulometría 1; (b) Comparación de intensidades de color en un perfil vertical para una experiencia con Granulometría 2. Notar que para ambos casos la línea negra segmentada representa la posición de la interfaz de densidad en los perfiles.	24
3.7	(a) Imagen binaria sin suavizado; (b) Imagen binaria con suavizado; (c) Interfaz detectada originalmente y luego filtrada de la imagen (b).	25
3.8	Geometría modelo numérico. Se especifica los taludes y el origen del sistema de referencia.	27
3.9	Distribución de la malla de elementos en la geometría.	28
3.10	(a) Condiciones de borde de no flujo (rojo), recarga (azul) y carga constante de nivel del mar (verde); (b) Área de salida del flujo de agua dulce	30
3.11	Interfaz de COMSOL para calcular el balance. A la izquierda el menú del modelo, a su lado, primero la zona de entrada de agua dulce, luego, la zona de salida a los costados, destacadas en azul en la parte superior y a la derecha la superficie del modelo donde se calcula el almacenamiento.	31

4.1	Imagen estado inicial de experimento 3, se destaca el sistema de referencia utilizado y se enmarca la zona de análisis de las imágenes.	34
4.2	(a) Captura del estado permanente de la experiencia 5 a los 240 [min]; (b) Distribución de la densidad promedio dentro del dominio de modelación. La solución corresponde al régimen permanente de la experiencia 5. La barra de color representa la densidad promedio en la matriz de suelo.	35
4.3	(a) Forma de la interfaz en régimen permanente para K_1R_1 ; (b) Forma de la interfaz en régimen permanente para K_1R_2 ; (c) Forma de la interfaz en régimen permanente para K_1R_3	36
4.4	(a) Forma de la interfaz en régimen permanente para K_2R_1 ; (b) Forma de la interfaz en régimen permanente para K_2R_2 ; (c) Forma de la interfaz en régimen permanente para K_2R_3	37
4.5	Relación entre el ancho l_e experimental y el cociente R/K	40
4.6	(a) Resultados experimentales régimen permanente para la granulometría 1; (b) Resultados experimentales régimen permanente para la granulometría 2.	41
4.7	Interfaz a partir de análisis de imágenes (líneas continuas) y solución analítica de Fetter (1972) (líneas segmentadas) para (a) $R = 1.85[m/d]$; (b) $R = 1.38[m/d]$; (c) $R = 0.92[m/d]$	42
4.8	(a) 2 [min] Experiencia 2; (b) 30 [min] Experiencia 2.	43
4.9	(a) 120 [min] Experiencia 2; (b) 240 [min] Experiencia 2.	44
4.10	(a) Solución numérica 2 [min] Experiencia 2; (b) Solución numérica 30 [min] Experiencia 2.	44
4.11	(a) Solución numérica 120 [min] Experiencia 2; (b) Solución numérica 240 [min] Experiencia 2.	44
4.12	(a) Profundidad máxima Experiencia 1; (b) Profundidad máxima Experiencia 2; (c) Profundidad máxima Experiencia 3.	46
4.13	(a) Profundidad máxima Experiencia 4; (b) Profundidad máxima Experiencia 5; (c) Profundidad máxima Experiencia 6.	47
4.14	(a) Observaciones experimentales del régimen impermanente Granulometría 1;(b) Observaciones experimentales del régimen impermanente Granulometría 2.	48
4.15	(a) Comparación régimen impermanente para $R = 1.85[m/d]$;(b) Comparación régimen impermanente para $R = 1.32[m/d]$; (c) Comparación régimen impermanente para $R = 0.92[m/d]$	49
4.16	(a) Granulometría 1; (b) Granulometría 2.	51
4.17	Comparación de la diferencia de profundidades máximas en régimen permanente de cada granulometría según recarga.	52
4.18	Relación de los adimensionales relevantes del montaje experimental.	53
5.1	Sección de estudio. Se señalan los pozos que poseen información de niveles cerca de la zona de análisis a partir del informe de (Errol L. Montgomery, inc, 2011).	55

5.2	Forma de la interfaz y nivel freático estimada para Rapa Nui sin bombeos. $x = 0$ corresponde al centro de la sección de análisis.	56
A.1	Montaje experimental.	63
A.2	(a) Bomba conectada a agua dulce y salada; (b) Bomba conectada sólo a agua dulce	64
A.3	Sistema de recarga superficial.	65
B.0	(a) Permeámetro de carga constante; (b) Equipo utilizado: permeámetro conectado a piezómetro, abastecido por el flujo de una bomba peristáltica.	67
B.1	Ajuste para obtención de K según granulometría.	68
B.2	Relación tamaño medio del grano y conductividad hidráulica (Shepherd,1989).	69
C.0	(a) Estado permanente Experiencia 1; (b) Estado permanente Experiencia 2; (c) Estado permanente Experiencia 3; (d) Estado permanente Experiencia 4; (e) Estado permanente Experiencia 5; (f) Estado permanente Experiencia 6.	71
D.0	(a) Estado permanente Experiencia 1; (b) Estado permanente Experiencia 2; (c) Estado permanente Experiencia 3; (d) Estado permanente Experiencia 4; (e) Estado permanente Experiencia 5; (f) Estado permanente Experiencia 6.	73
F.1	Relación entre $\frac{Z_t}{Z_\infty}$ y $\frac{t}{T}$. Notar que el comportamiento tiende a una relación logarítmica.	76

Capítulo 1

Introducción

1.1 Motivación

En las zonas costeras del mundo se genera la acumulación de agua dulce en acuíferos a causa de fenómenos como la infiltración de las precipitaciones o fuertes gradientes regionales que llevan el agua subterránea del continente a la costa. Dada la cercanía con el mar, ocurre el proceso de intrusión salina natural en el que agua salada proveniente del mar penetra hacia el continente generando cambios de densidad e interacciones difusivas y de mezcla, entre el agua dulce acumulada en los acuíferos costeros y el agua salada que ingresa. Junto a esto, se manifiesta un proceso contrario, el cual induce un flujo de agua dulce hacia el mar, que en el largo plazo genera una interfaz de densidad entre ambos fluidos estabilizando el fenómeno y delimitando el tamaño del acuífero costero.

En ese sentido, la intrusión salina se asocia a variaciones prolongadas en los niveles freáticos en la zona costera debido a bombeos, cambios en el uso de la tierra, alteraciones climáticas y fluctuaciones en los niveles de la marea. Por ello, los acuíferos costeros son complejos sistemas caracterizados por niveles transientes de carga, salinidad variable y distribución heterogénea de densidad y de propiedades hidráulicas.

Existen dos teorías para analizar la interacción entre el agua dulce y el agua salada. La primera, corresponde al supuesto que entre ambos fluidos ocurre una interfaz abrupta, es decir, existe equilibrio hidrostático y la zona de mezcla es de espesor despreciable, por lo que se considera que los fluidos son inmiscibles (Baydon-Ghyben, 1898). La segunda, se basa en una interfaz dispersa, la cual considera la existencia de una zona de mezcla en donde la densidad del fluido de intercambio varía respecto a la profundidad de la cuña salina que ingresa al acuífero (Luszczynski, 1961). La determinación de la zona de mezcla depende del nivel de intercambio de masa entre el acuífero y el mar.

Ante esto, la predicción del comportamiento de este fenómeno, en particular ligado a la formación de lentes de agua dulce y la influencia de la recarga superficial y conductividad hidráulica sobre ésta, se vuelve fundamental en el manejo de los recursos hídricos subterráneos costeros en las islas del mundo, ante la susceptibilidad provocada por la cercanía con el agua de mar y al aumento sostenido del bombeo dada la alta densificación de población en esas zonas. Este hecho, junto con la prevención de la degradación de la calidad del agua, plantea

un desafío interesante en nuestro país dado que cuenta con más de 4000 [km] de costa y un importante territorio insular. Además, este fenómeno ha sido estudiado en escasos lugares y en pocas ocasiones a escala de laboratorio.

Por ello, el estudio experimental de esta memoria, busca verificar la evolución de la formación de un lente de agua dulce en una isla que presenta recarga superficial. Los resultados que arroja el montaje, se complementan con una modelación numérica mediante el paquete computacional COMSOL. Los resultados de las simulaciones se comparan con soluciones analíticas y resultados experimentales con el fin de estudiar la razón de aspecto límite entre la profundidad de la interfaz y el ancho de la sección de estudio que valida las soluciones analíticas. Además, se espera que esta investigación sirva como precedente para trabajos futuros sobre este tema.

1.2 Objetivos

1.2.1 General

El objetivo principal de este estudio es analizar experimental y numéricamente la formación de un lente de agua dulce en un acuífero costero mediante un modelo bidimensional de isla con recarga superficial.

1.2.2 Específicos

Los objetivos específicos del trabajo se detallan a continuación:

1. Construir e implementar un modelo a escala de laboratorio de isla con recarga superficial y diseñar una metodología de trabajo para su implementación.
2. Estudiar experimentalmente el problema considerando distintas granulometrías y tasas de recarga superficial.
3. Construir un modelo numérico que simule la situación experimental, considerando una interfaz abrupta entre fluidos y distintas tasas de recarga.
4. Comparar los resultados experimentales, numéricos y analíticos para comprobar la validez de estos dos últimos y entender la influencia de la recarga y conductividad hidráulica sobre el fenómeno en estudio.

Capítulo 2

Revisión de antecedentes

2.1 Intrusión salina y formación de acuíferos costeros en islas

El fenómeno de intrusión salina en acuíferos costeros consiste en el ingreso de agua de mar hacia los estratos subsuperficiales tanto en costas continentales, como islas en distintos océanos. Al entrar al sistema, el flujo de agua salada se posiciona por debajo del agua dulce debido a diferencias de densidad. De manera paralela, y para conservar el volumen que se puede contener en el acuífero, agua dulce escurre hacia el mar compensando el efecto de entrada desde el mar y generando una zona de transición o mezcla, conocida como interfaz de densidad.

En particular, en el caso de las islas, la única fuente de agua dulce corresponde a las precipitaciones que caen sobre la superficie y que infiltran formando lentes de agua dulce, desplazando el agua salada que se mantiene dentro de las profundidades, generando el intercambio de flujos antes mencionado y provocando la formación de la interfaz.

La interfaz de densidad posee un ancho variable y depende fundamentalmente de la magnitud de los flujos de intercambio entre el mar y el acuífero, de la heterogeneidad del sistema, traducida en la conductividad hidráulica de las distintas formas del relleno sedimentario, variabilidad del nivel de mar, recarga superficial y de la densidad de los fluidos que interactúan; por lo que su espesor varía espacial y temporalmente (Werner *et al.*, 2013).

Este proceso natural puede sufrir cambios debido a efectos naturales o movimientos relativos de la tierra y el mar sólo a largo plazo. Sin embargo, al existir extracciones del recurso hídrico subterráneo que deprimen los niveles, la condición de equilibrio se ve alterada con una velocidad e intensidad mucho mayor a la usual (Figura 2.1), por lo que se genera un efecto de ascensión del agua de mar debido a fuertes gradientes de densidad (Werner *et al.*, 2013), hasta alcanzar un nuevo equilibrio. Esta situación, altera la calidad del agua que captan los pozos de bombeo, provocando procesos de mezcla que contaminan las extracciones, y como consecuencia, problemas para el uso del agua con fines agrícolas o de consumo humano o industrial.

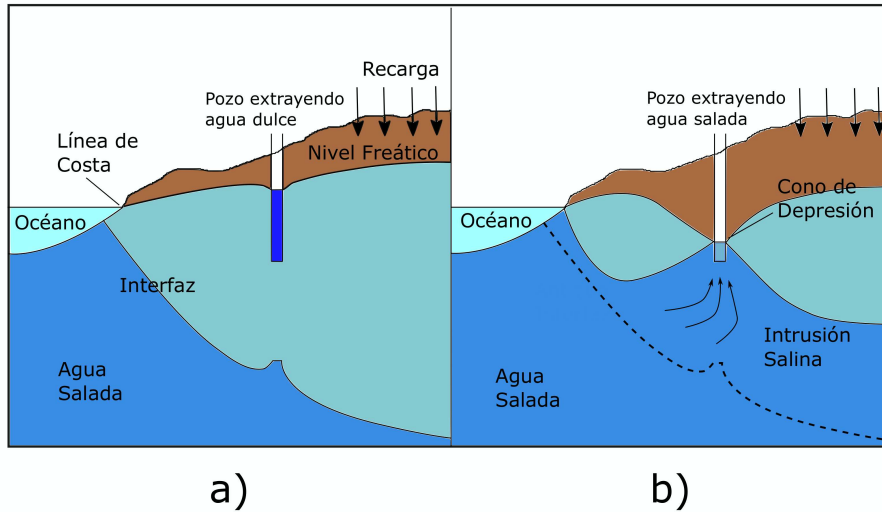


Figura 2.1: a) Antes de los bombeos excesivos; b) Después del bombeo excesivo de varios pozos. Elaboración propia.

Por ello, los acuíferos costeros son complejos sistemas caracterizados por niveles transientes de carga, salinidad variable y distribución heterogénea de densidad y de propiedades hidráulicas.

2.1.1 Procesos dispersivos en la zona de mezcla

La zona de mezcla (Figura 2.2) es un importante factor de la intrusión salina en acuíferos costeros. La variabilidad de la densidad en ésta, se debe principalmente a la dispersión mecánica y difusión molecular, que manejan los flujos de entrada y salida del acuífero, contribuyendo a la circulación convectiva dentro de la cuña (Werner *et al.*, 2013).

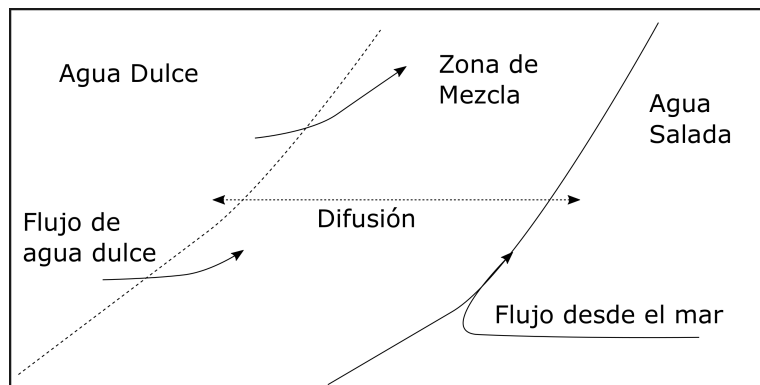


Figura 2.2: Mecanismo generación zona de mezcla. Modificada de (García-Huidobro Covarrubias, 2007)

Por lo tanto, en un acuífero homogéneo en estado estacionario, el espesor de la interfaz entre

otros factores al contraste de densidades entre los fluidos que interactúan, recarga superficial y bombeos existentes. Estos aspectos pueden de una u otra manera afectar los coeficiente de dispersión transversal y longitudinal, haciéndolos más o menos relevantes.

2.1.2 Impacto de fluctuaciones de nivel del mar

La influencia de las fluctuaciones del nivel de mar en los sistemas subterráneos es variada y por ende involucra efectos sobre las propiedades hidráulicas del acuífero, cambios en la pendiente de la playa y la morfología costera, impacto en procesos en la zona capilar y desarrollo de zonas de infiltración en los bordes de la isla (Werner *et al.*, 2013).

Eventos marítimos extremos, como tormentas y tsunamis, también influyen de manera sustancial en la salinización de los acuíferos costeros, incluso a mayor escala que las fluctuaciones de la marea. En ese sentido, la contribución de la marea es prácticamente irrelevante en el movimiento de la interfaz de densidad en comparación con su influencia en el espesor de la zona de transición.

2.1.3 Procesos hidroquímicos

La composición del agua de mar es relativamente constante en el mundo, mientras que la de agua dulce en acuíferos costeros suele ser más variable. En ese sentido, algunas características químicas especiales se forman en algunos acuíferos, debido principalmente a la mezcla que ocurre en la zona de transición entre el agua subterránea, el agua salada que intruye y las formaciones rocosas o sedimentarias, ya que las propiedades geoquímicas de las rocas definen los procesos químicos dominantes (Werner *et al.*, 2013).

Algunas de las reacciones químicas que ocurren dentro de acuíferos son la disolución de carbonatos, intercambio de cationes y reducción de sulfatos.

2.2 Caracterización conceptual del problema

Se han desarrollado dos teorías fundamentadas en distintos supuestos teóricos para analizar la forma y profundidad de la interfaz de densidad en régimen permanente. A continuación se presentan pequeñas descripciones de cada una de ellas junto a algunas soluciones analíticas enfocadas al caso de estudio de este trabajo.

2.2.1 Teoría de interfaz abrupta

Las primeras investigaciones en torno a la relación entre el agua dulce y salada en regiones costeras, fueron realizadas por Baydon-Ghyben (1898) y Herzberg (1901). El planteamiento, se basa en que no existe mezcla alguna entre ambos fluidos en la interfaz, es decir, ambos

líquidos se consideran inmiscibles. Por ende, el cambio de fluido es abrupto, permitiendo que exista equilibrio hidrostático de presiones entre columnas del mismo tamaño de agua dulce y salada y que no ocurran flujos desde el mar hacia el acuífero ni en el otro sentido (Principio de Ghyben - Herzberg). El esquema se muestra en la Figura 2.3.

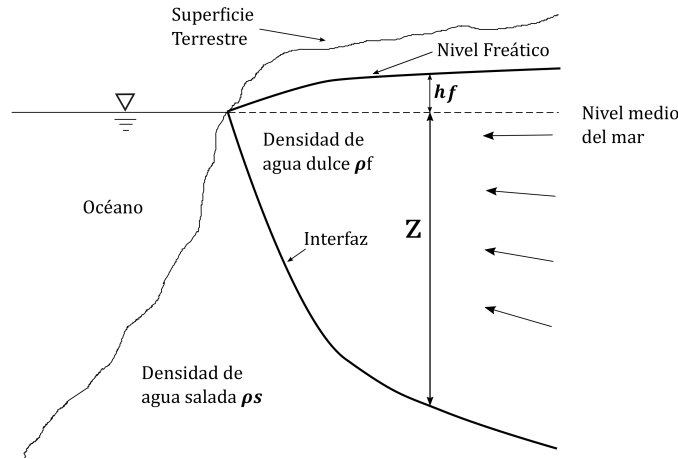


Figura 2.3: Corte vertical de un acuífero costero. Modificado de (Todd & Mays, 2005)

A partir de la Figura 2.3 se puede establecer que en dos puntos que se encuentran a una misma profundidad existe la misma presión hidrostática y como no ocurren flujos de intercambio, no hay pérdida de masa de agua dulce o salada. Considerando esto y definiendo ρ_s como la densidad de agua salada y ρ_f la de agua dulce, z la profundidad de la columna desde el nivel medio del mar y h_f la altura del nivel freático del acuífero sobre el nivel medio del mar, se obtiene la siguiente ecuación:

$$\rho_s g z = \rho_f g (z + h_f) \quad (2.1)$$

$$z = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} h_f = \alpha h_f \quad (2.2)$$

donde α se conoce como el coeficiente de Ghyben - Herzberg que relaciona la profundidad de la interfaz en un punto del acuífero con la diferencia de altura entre el nivel freático y nivel medio del mar. En general, este coeficiente toma valores entre 33 y 50 en función de la densidad del agua de mar, que depende de la temperatura, presión y salinidad (Fofonoff & Millard, 1983), siendo igual a 40 en varias zonas del mundo. Esta deducción, permite entender que la energía de la cuña salina es 40 veces más grande que la del volumen de agua dulce, por ende, al aumentar el bombeo en la zona costera y deprimir un metro el acuífero, la cuña salina ascendería cerca de 40 metros. Este análisis puede ser complementado incluyendo recarga superficial o pozos de bombeo a lo largo del acuífero.

2.2.2 Teoría de interfaz dispersa

La teoría de interfaz dispersa reproduce fielmente los procesos que ocurren en un acuífero costero, ya que consideran flujos desde y hacia el acuífero, por lo que destaca la presencia de una interfaz de espesor variable, donde la densidad del fluido en esa zona depende de la capacidad de mezcla entre el agua dulce y salada, la cuál se estima a partir de la dispersividad y la diferencia de densidad entre las fases. Esta conceptualización, tiene problemas en relación a lo complejo de modelar los fenómenos físicos de densidad variable que ocurren en la zona de transición, junto a otros procesos naturales.

La primera formulación para determinar la zona de mezcla en el caso de existencia de flujos con densidad variable fue planteada por [Luszczynski \(1961\)](#). En su postulado consideró tres definiciones relevantes que se muestran en la Figura [2.4](#).

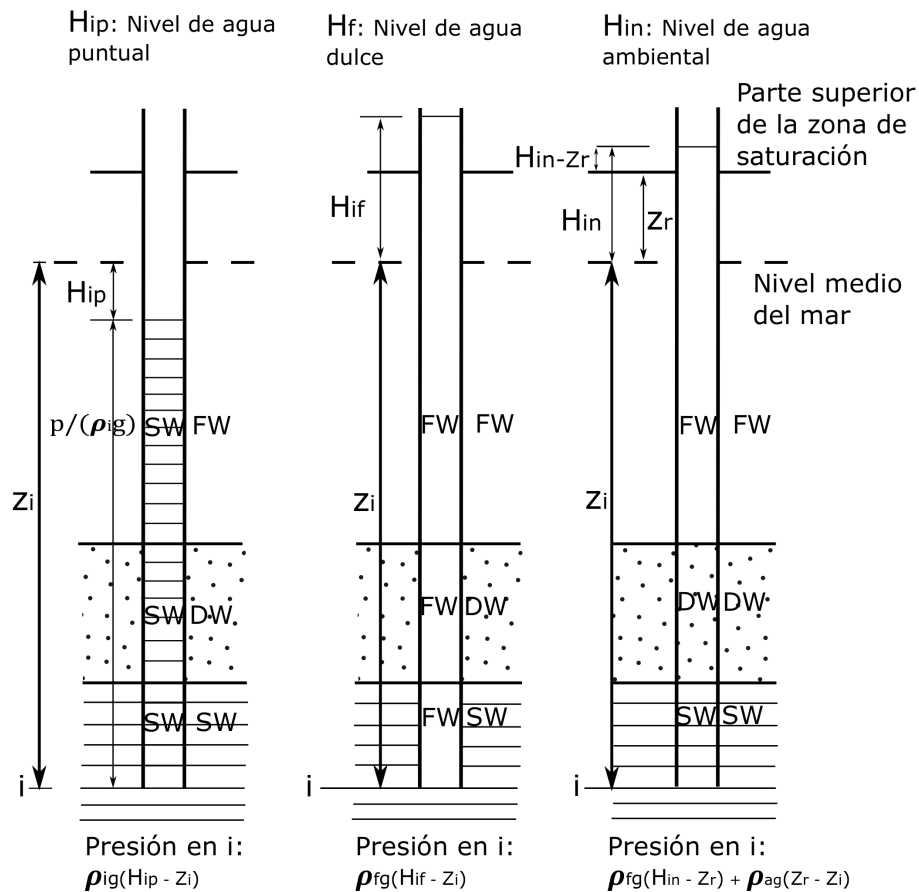


Figura 2.4: Carga hidráulica en agua de densidad variable, donde *FW* representa agua dulce, *DW* agua difusa de mezcla y *SW* agua salada. Modificado de ([Luszczynski, 1961](#))

- Nivel de agua puntual H_{ip} : Nivel de agua referido al nivel del mar, en un pozo ranurado relleno con el tipo de agua existente en i suficiente para balancear la presión en el punto.

- Nivel de agua dulce H_{if} : Nivel de agua referido al nivel del mar, en un pozo ranurado relleno con agua dulce suficiente para balancear la presión en el punto.
- Nivel de agua ambiental H_{in} : Nivel de agua referido al nivel del mar, en un pozo ranurado relleno de agua con densidad variable dependiente del recorrido vertical entre la parte superior de la zona de saturación y el punto i donde se mide.

De estas definiciones y de relaciones entre las columnas de agua puntual, dulce y ambiental se desprende que:

$$\rho_f H_{in} = \rho_f H_{if} - (\rho_f - \rho_a)(Z_i - Z_r) \quad (2.3)$$

$$\rho_a = \frac{1}{Z_r - Z_i} \int_{Z_i}^{Z_r} \rho(z) dz \quad (2.4)$$

donde ρ_a representa la densidad promedio de agua entre Z_i y Z_r , y este último una elevación de referencia donde la densidad promedio del agua al punto i se considera en zona de agua dulce. Esta elevación se mide positivamente hacia arriba y puede ser determinada a partir de la igualdad de presiones entre los niveles de agua ambiental y puntual:

$$\rho_f H_{in} = \rho_i H_{ip} - Z_i(\rho_i - \rho_a) - Z_r(\rho_a - \rho_f) \quad (2.5)$$

Finalmente, de (2.3), (2.4) y (2.5) se tiene un sistema de ecuaciones que se debe resolver iterativamente, dependiendo del punto del acuífero que se quiera analizar. Si se conoce la distribución de la densidad en la vertical, se vuelve más simple y directo el cálculo, y en el caso de conocer la densidad puntual en algunos puntos, es posible establecer cierta distribución aproximada y con ello despejar Z_r .

2.2.3 Soluciones analíticas desarrolladas

Fetter (1972)

La primera solución planteada fue desarrollada por Fetter (1972). Para su deducción, combinó la teoría de interfaz abrupta y el supuesto de Dupuit, que para acuíferos libres, desprecia el flujo vertical asumiendo que sólo existe flujo horizontal, que lleva a que las líneas equipotenciales sean verticales. A su vez, considera sobre la zona costera, una recarga superficial que permite elevar los niveles de agua dulce en el acuífero, simulando el efecto de las precipitaciones sobre el sistema.

Considerando como volumen de control lo expuesto en la Figura 2.5, es decir, una parcela de suelo del acuífero homogéneo saturado con agua dulce, donde la cara superior es el nivel freático, la inferior la interfaz de densidad y el plano $X - Y$ el nivel medio del mar, se pueden escribir los flujos por unidad de ancho de entrada y salida sobre las caras izquierda y derecha como:

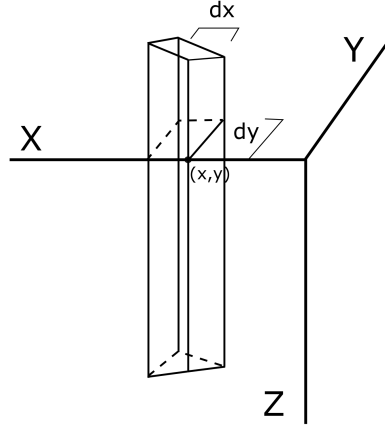


Figura 2.5: Volumen de control. Modificado de (Fetter, 1972)

$$q_{x+dx}dy = -K\left[\langle h \rangle + \frac{\gamma_f}{\gamma_s - \gamma_f} \langle h \rangle \frac{\partial \langle h \rangle}{\partial x}\right]_{x+dx} dy \quad (2.6)$$

$$q_x dy = -K\left[\langle h \rangle + \frac{\gamma_f}{\gamma_s - \gamma_f} \langle h \rangle \frac{\partial \langle h \rangle}{\partial x}\right]_x dy \quad (2.7)$$

donde $\langle h \rangle$ representa el valor promedio de la cota piezométrica sobre el nivel medio del mar a lo largo del eje x para tiempos de largo dy y velocidad u . Aplicando la aproximación de Lagrange y considerando que no existe flujo de intercambio a través de la interfaz, pero sí una recarga superficial R , se obtiene la ecuación de flujo (2.8) que modela el esquema.

$$-2R = K\left(1 + \frac{\gamma_f}{\gamma_s - \gamma_f}\right) \left(\frac{\partial^2 h^2}{\partial x^2}\right) \quad (2.8)$$

Caso sección 2D de una isla de ancho semi-infinito

Considerando una sección 2D de una isla con un ancho suficientemente grande, donde todo el flujo es horizontal y perpendicular al eje Y, la ecuación de continuidad en el acuífero puede ser expresada por:

$$K\left(1 + \frac{\gamma_f}{\gamma_s - \gamma_f}\right) \frac{\partial}{\partial x} \left(h \frac{\partial h}{\partial x}\right) = R \quad (2.9)$$

Si el sistema de referencia se encuentra al centro de la isla, se cumple que las condiciones de borde son $\frac{dh}{dx} = 0$ en $x = 0$ y $h = 0$ en $x = \pm a$, con a la mitad del ancho máximo de la

sección. Por lo tanto, la solución analítica para la posición del nivel freático sobre el nivel medio del mar se puede expresar como:

$$h^2 = \frac{R(a^2 - x^2)}{K[1 + \frac{\gamma_f}{\gamma_s - \gamma_f}]} \quad (2.10)$$

Reemplazando (2.2) en (2.10), se obtiene una expresión para la profundidad de la interfaz de densidad para cualquier punto del acuífero.

$$z^2 = \frac{\alpha^2 R(a^2 - x^2)}{K[1 + \alpha]} \quad (2.11)$$

Vacher (1988)

La segunda solución para la profundidad de la interfaz en acuíferos costeros de islas fue desarrollada por Vacher (1988).

Vacher analizó el problema de la interfaz en una isla de manera global, considerando el esquema de la Figura 2.6, donde existe una recarga superficial R y una divisoria de aguas vertical en el centro de la isla, que indica a partir del supuesto de Dupuit que el flujo es totalmente horizontal.

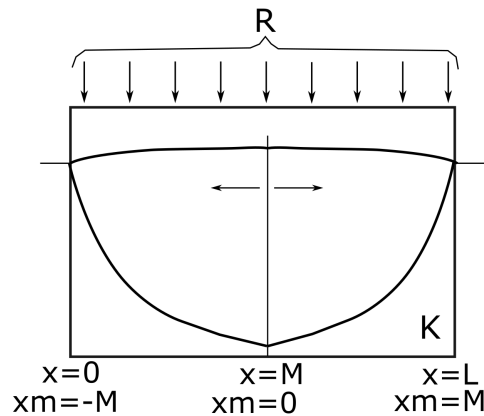


Figura 2.6: Diagrama en corte que define el esquema conceptual. Modificado de (Vacher, 1988)

Considerando el esquema de la Figura 2.6, se define el flujo entrante en la superficie de la isla como:

$$Q = -R(M - x) \quad (2.12)$$

Además por la Ley de Darcy:

$$Q = -KA \frac{dh}{ds} \quad (2.13)$$

donde A es la sección perpendicular al flujo, K la conductividad hidráulica del medio y s la dirección de avance del flujo. Por el supuesto de Dupuit, la sección A puede ser reemplazada por $z + h$ y $\frac{dh}{ds}$ aproximarse a $\frac{dh}{dx}$. A su vez, por el principio de Ghyben - Herzberg, $z + h$ se reescribe como $(\alpha + 1)h$. De esta manera, sustituyendo (2.12) en (2.13):

$$h \frac{dh}{dx} = \frac{R(M - x)}{K(\alpha + 1)} \quad (2.14)$$

Resolviendo (2.14) considerando que $h = 0$ en $x = 0$ y llevando el sistema de referencia de la costa al centro de la isla, la expresión anterior queda:

$$h^2 = \frac{R(M^2 - x_m^2)}{K(\alpha + 1)} \quad (2.15)$$

Finalmente, la expresión para la profundidad de la interfaz en régimen permanente tomando como referencia el nivel del mar corresponde a:

$$z^2 = \frac{R(\alpha + 1)(M^2 - x_m^2)}{K} \quad (2.16)$$

Van der Veer (1977)

A diferencia de los dos autores anteriores, Van der Veer plantea el problema considerando el flujo de salida de agua dulce que ocurre en la realidad. En ese sentido, la condición de borde que aplica Fetter (1972), es decir, que el nivel freático del acuífero que forma la recarga que infiltra, coincide con la interfaz de densidad en el borde de costa, es decir, $h = 0$ en $x = \pm a$ donde a es la mitad del ancho de la isla y h se considera positivo desde el nivel del mar. Esta situación es físicamente imposible, ya que para que exista flujo de agua dulce de salida constante en régimen permanente debe existir una distancia l_e que separa el inicio de la interfaz y el punto donde el nivel del acuífero es igual al nivel del mar. La Figura 2.7 muestra un esquema de l_e , la cual se define como:

$$l_e = \frac{q^*}{R} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{R}{K} \right) \frac{1 - [\alpha + \frac{R}{K}]}{1 - \frac{R}{K}[\alpha + \frac{R}{K}]}} \right] \quad (2.17)$$

donde q^* se define como

$$q^* = q + Rl_e \quad (2.18)$$

Siendo q el flujo de agua dulce que evacúa desde la isla hacia el mar, que en régimen permanente equivale a $q = R(B - l_e)$, donde B es el ancho máximo de la isla. De esta manera es posible estimar de manera aproximada, el flujo que escapa del acuífero y el ancho de la zona de salida.

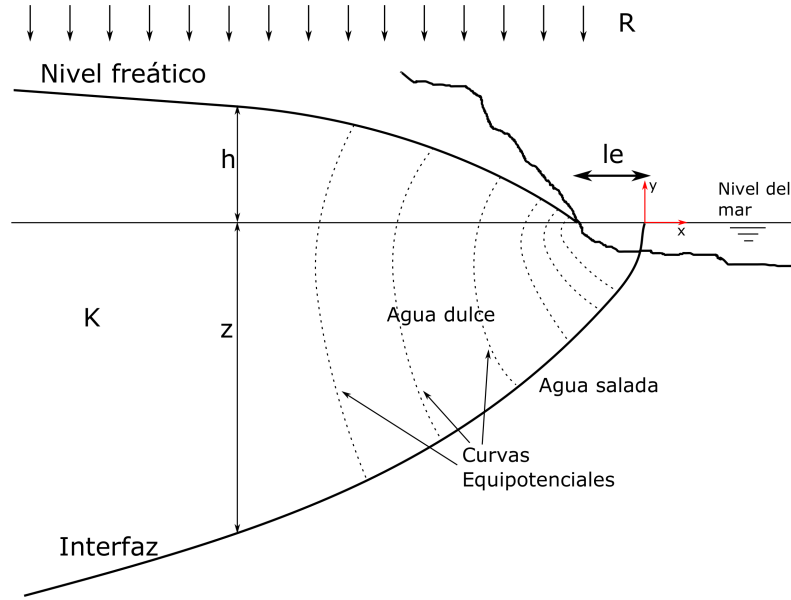


Figura 2.7: Esquema conceptual modificado del planteamiento de [Van der Veer \(1977\)](#).

2.2.4 Evolución temporal de un lente de agua dulce

La evolución en régimen transiente de la profundidad máxima de un lente de agua en una isla, dada la presencia de una recarga superficial homogénea y constante fue estudiado por [Stuyfzand & Bruggeman \(1994\)](#). Ellos se basaron en trabajos anteriores para definir la Ecuación [2.19](#), que permite calcular el tiempo que se demora el lente de agua dulce en llegar a cierta profundidad, según las condiciones ya descritas.

$$t = \frac{f_1 f_2}{2} \left[\frac{4RK(\rho_s - \rho_f)}{(n_e B)^2 \rho_s} \right]^{-0.5} \ln \left(\frac{1 + \frac{Z_t}{Z_\infty}}{1 - \frac{Z_t}{Z_\infty}} \right) \quad (2.19)$$

donde n_e es la porosidad efectiva del material, B el ancho de la isla, Z_∞ la profundidad máxima estimada que alcanza el lente (régimen permanente), Z_t la profundidad que tiene el lente para el tiempo t , f_1 factor de corrección relacionado al incremento de volumen de agua dulce debido a la anisotropía del medio poroso ([Stuyfzand & Bruggeman, 1994](#)) y f_2 factor de corrección para lograr un ajuste más preciso, desarrollado numéricamente por [Bakker \(1981\)](#) y modificado luego por [Stuyfzand \(1993\)](#), la cual se calcula como:

$$f_2 = 1.48 + 1.5972 \left(\frac{Z_t}{Z_\infty} \right) - 5.5563 \left(\frac{Z_t}{Z_\infty} \right)^2 + 4.645 \left(\frac{Z_t}{Z_\infty} \right)^3 \quad (2.20)$$

2.3 Trabajos experimentales previos

Los estudios experimentales existentes de la formación de la interfaz de densidad hasta alcanzar el régimen permanente en modelos de isla ideal son bastante recientes siendo los más destacados los desarrollados por [Stoeckl & Houben \(2012\)](#) y [Dose *et al.* \(2014\)](#).

[Stoeckl & Houben \(2012\)](#) estudiaron la validez de las soluciones analíticas de [Fetter \(1972\)](#) y [Vacher \(1988\)](#) para una razón de aspecto de 1:5 entre la profundidad que alcanza el lente de agua dulce y el ancho del modelo experimental, que se muestra en la Figura 2.8. Para ello, analizaron como se comportaba la profundidad máxima del lente en el tiempo y en función de la recarga, la manera en que se desarrolla el flujo dentro del lente, mediante la visualización de los patrones de flujo y cálculo de los tiempos de viaje, la estratificación del agua dulce entrante dentro del acuífero mediante la utilización de distintos trazadores y el efecto de la operación de pozos verticales y horizontales en el acuífero homogéneo.

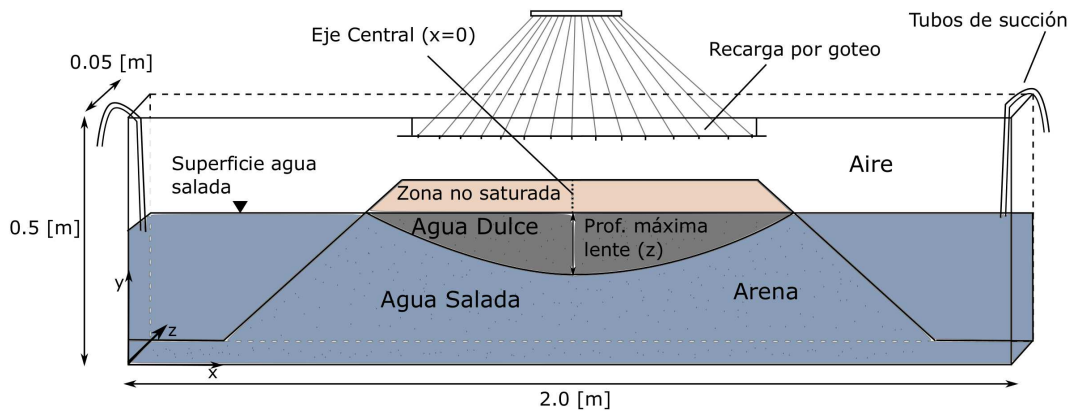


Figura 2.8: Esquema del modelo físico utilizado en sus experimentos. Modificado de [Stoeckl & Houben \(2012\)](#).

Encontraron que los lentes de agua dulce no deben ser considerados como acuíferos bien mezclados, ya que obtuvieron distintos tiempos de residencia del agua extraída en los pozos que instalaron dentro del tanque y que la posición y profundidad de los pozos es relevante para el tipo de agua extraída, ya que cerca de la costa existe mayor mezcla y en las partes más altas hay agua con tiempos de residencia menores. Además identificaron que hay agua dulce en contacto en todo momento con la zona de descarga hasta ser evacuada y mezclada lejos de la costa por la difusión y dispersión. En ese sentido, sus resultados tienen aplicaciones en la creación de zonas de restricción, análisis de avances de plumas de contaminantes y manejo sustentable del recurso hídrico para acuíferos de las características experimentadas.

Por otro lado, [Dose *et al.* \(2014\)](#) analizaron la forma de la interfaz en régimen permanente para acuíferos estratificados, tanto de forma horizontal como vertical o en presencia de algún

estrato impermeable, considerando cambios en la tasa de recarga superficial utilizando el mismo montaje experimental mostrado en la Figura 2.8.

Dentro de sus resultados determinaron que las soluciones de Fetter (1972) y Vacher (1988) son válidas para reproducir la forma de la interfaz de densidad para razones de aspecto del orden de 1:5, hecho que es relevante ya que esta proporción en casos reales alcanza desde 1:20 a 1:300 (Vacher, 1988). Sin embargo, las soluciones no son muy precisas en las condiciones de costa ubicadas en los bordes, ya que no consideran zonas de descarga de agua dulce en el análisis. Por ello, los modelos analíticos tienen un mejor ajuste para acuíferos en que el área de descarga de agua dulce es insignificante en comparación con el tamaño del lente de agua dulce.

Junto con lo anterior, determinaron que pequeñas fluctuaciones en la tasa de recarga durante el experimento no afectan la forma de la interfaz, pero sí el ancho de la zona de flujo de salida hacia el mar. A pesar de esto, los modelos experimentales son útiles y valiosos como punto de referencia para estudiar la formación de estas estructuras hidrogeológicas.

2.4 COMSOL Multiphysics

COMSOL Multiphysics corresponde a un poderoso paquete computacional desarrollado inicialmente por dos estudiantes de la Universidad Tecnológica Real de Estocolmo, Suecia. El software fue diseñado para modelar y resolver distintos problemas científicos o ingenieriles a través del método de elementos finitos (FEM), acoplando la resolución iterativa de ecuaciones diferenciales ordinarias y parciales.

La plataforma posee como gran ventaja la capacidad de extender modelos enfocados en un tipo de física, a modelos multifísicos que resuelven los fenómenos en estudio de manera simultánea y con un entorno e interfaz fácil de utilizar para el usuario. Además de esto, permite definir distintas cantidades físicas relevantes, como propiedades de materiales, fuentes y flujos de masa o energía entrantes o salientes, condiciones de borde de concentración o flujo, campos de velocidad, entre otras.

Dentro de los fenómenos físicos que se pueden simular se encuentran problemas ligados a electricidad, electromagnetismo, acústica, transferencia de calor, estructuras materiales no lineales, fatigas de material, flujo multifásico en superficie y en medios permeables, transporte de especies diluidas en flujos superficiales y medios permeables, entre otros. Además, cuenta con módulos para generar modelos a partir de ecuaciones diferenciales parciales (EDP's) ingresadas por el usuario, análisis de sensibilidad, y mallas de geometría deformable o transportable a medida que las simulaciones corren.

Usando los distintos módulos incluidos, permite construir modelos estacionarios o transientes,

lineales o no lineales y de respuesta de frecuencia, modal o de valor propio según sea el objetivo de cada simulación.

Módulo Ley de Darcy para dos fases

Para este trabajo, el módulo a utilizar corresponde al que implementa la Ley de Darcy para dos fases, diseñado para resolver y simular situaciones relacionadas a la interacción entre dos fluidos a través de algún medio permeable. Para esto, el módulo resuelve una serie de EDP's para cada uno de los componentes del modelo. Para el caso de la matriz de suelo, COMSOL resuelve las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\partial(\epsilon\rho)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (2.21)$$

$$u = -\frac{k}{\mu} \cdot \nabla p \quad (2.22)$$

$$\rho = s_1\rho_1 + s_2\rho_2 \quad (2.23)$$

$$\frac{1}{\mu} = s_1 \frac{k_{r1}}{\mu_1} + s_2 \frac{k_{r2}}{\mu_2} \quad (2.24)$$

$$s_1 + s_2 = 1 \quad (2.25)$$

$$\frac{\partial(\epsilon c_1)}{\partial t} + \nabla \cdot (c_1 u) = \nabla \cdot (D_c \nabla c_1) \quad (2.26)$$

$$c_1 = s_1\rho_1 \quad (2.27)$$

donde ϵ es la porosidad, k la permeabilidad de la matriz de suelo, μ_i la viscosidad dinámica en el medio permeable de cada fluido, k_{r_i} la permeabilidad relativa de cada fluido, s_i y ρ_i la saturación y densidad de cada fluido, D_c la difusión capilar y u la velocidad del flujo dentro del medio.

Como se observa en el set de ecuaciones anterior, el módulo resuelve simultáneamente la conservación de masa dentro de la matriz (Ecuación 2.21), a partir de la definición de densidad promedio expuesta en la Ecuación 2.23, que básicamente es la suma de las densidades de los fluidos que interactúan ponderadas por sus saturaciones, que por continuidad deben sumar 1 en el modelo (Ecuación 2.25). Además, soluciona la Ley de Darcy (Ecuación 2.22) considerando una viscosidad dinámica promedio calculada según la Ecuación 2.24. Por último, acopla la conservación de masa de un fluido c_1 dentro del dominio (Ecuación 2.26), y la resuelve a partir de su saturación y densidad.

Una de las principales ventajas de COMSOL, es que incorpora una interfaz gráfica del programa (Figura 2.9) que permite definir la geometría, componentes, condiciones de borde e iniciales, propiedades del medio permeable, la malla de elementos del modelo numérico y el tipo de estudio que se quiera realizar.

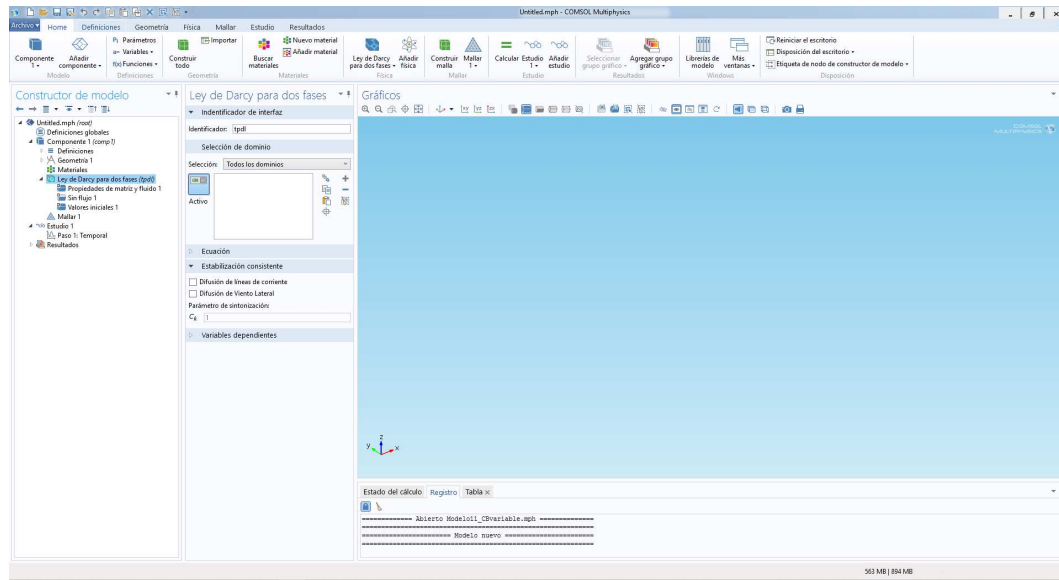


Figura 2.9: Interfaz gráfica COMSOL.

Capítulo 3

Metodología

3.1 Modelo físico

El modelo físico a simular en este trabajo corresponde al de la Figura 3.1. Este considera el esquema de una sección transversal de una isla ideal, rodeada por agua de mar, de espesor despreciable y ancho considerable respecto a la profundidad de la isla. Esta configuración recoge el supuesto de isla infinita horizontalmente planteado por Fetter (1972) y Vacher (1988). Como condición inicial, se tiene un acuífero homogéneo e isotrópico saturado hasta un nivel dado con agua salada, lo cual representa el nivel del mar.

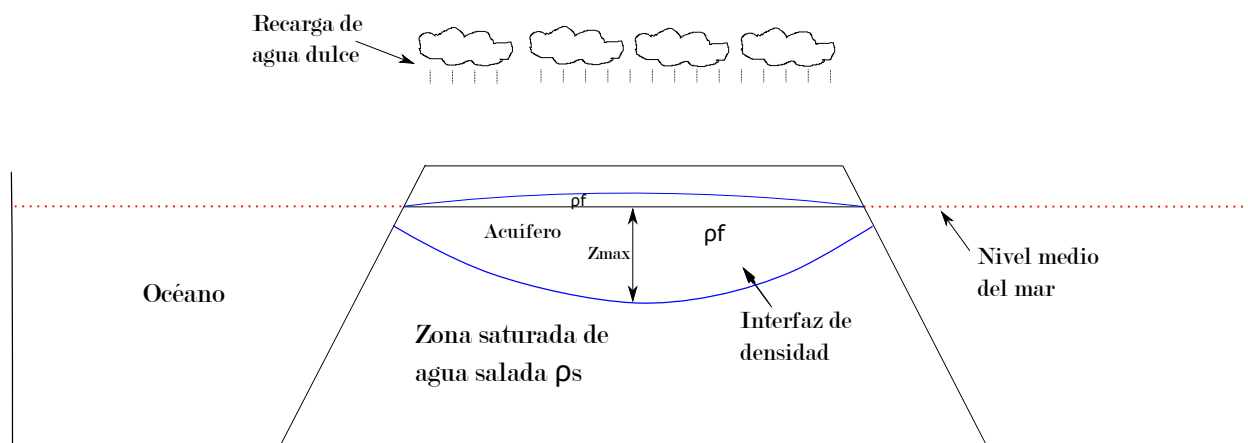


Figura 3.1: Modelo físico a simular.

En un tiempo t comienza a caer agua dulce mediante una recarga superficial que simula la lluvia y que se reparte uniformemente sobre toda la superficie de la isla, provocando un desplazamiento del agua salada alojada en el acuífero debido al ingreso de agua dulce hasta que el sistema tiende al equilibrio, formándose una interfaz de densidad que separa ambos fluidos dentro del medio permeable y que representa la zona de igualdad de presiones entre las columnas de agua dulce y salada.

3.2 Diseño del montaje experimental

3.2.1 Recipiente principal

El recipiente corresponde a un tanque de arena prismático de 80 [cm] de ancho, 55 [cm] de alto y 3 [cm] de espesor, que posee a una distancia de 10 cm de cada borde externo dos vertederos de carga constante de 43 [cm] de alto, que permiten mantener un nivel de agua constante en el sistema sin producir flujo preferencial en algún sentido, siempre que el sistema esté completamente horizontal. El tanque cuenta además, con una zona central de 60 [cm] de ancho, separada de los vertederos mediante dos acrílicos perforados con orificios protegidos con malla # 200, lo que evita el transporte de partículas de suelo albergadas en la zona central, pero posibilita el paso de agua por las barreras. Un esquema básico del equipo se presenta en la Figura [3.2](#).

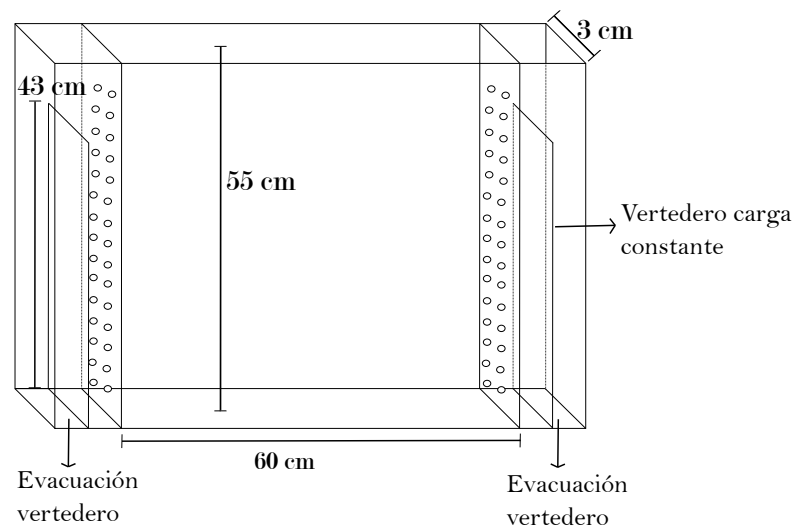


Figura 3.2: Esquema recipiente prismático.

En términos prácticos, la zona central del recipiente almacena el suelo saturado de agua salada inicialmente hasta el nivel de los vertederos y recibe el agua dulce proveniente de la recarga, evacuando el agua salada y dulce hacia los vertederos, permitiendo mantener la condición de borde de carga constante, salvo por la presencia de una pequeña película de agua dulce con colorante de espesor despreciable, por sobre la columna de agua salada.

La geometría de la matriz de suelo dentro de la zona central viene dada por un un rectángulo de 60 [cm] de ancho y 41.5 [cm] de alto, y encima de éste un trapecio de bases 60 y 50 [cm] de largo y una altura de 3 [cm]. El trapecio asemeja la pendiente de playa que ocurre en la mayoría de las islas del mundo y posee un talud con un ángulo cercano al de reposo de arenas gruesas, igual a 30° . Un esquema frontal del montaje se encuentra en la Figura [3.3](#).



Figura 3.3: Esquema montaje inicial.

Como el nivel de carga de los vertederos alcanza los 43 [cm], sobre éste queda una zona no saturada que es parte del trapecio antes mencionado, y que para efectos del montaje no es relevante, ya que su efecto es despreciable en la formación del lente de agua dulce (Stoeckl & Houben, 2012).

3.2.2 Sistema de recarga superficial y lateral

La recarga superficial se simula mediante una tubería de PVC de 54 cm de largo, abastecida mediante 6 canales conectados a mangueras de diámetro 14 mm y separados por 8 cm entre ellos. Estos canales conducen agua con trazador Blue Brilliant (BB), con una concentración de 0,15 [mg/L] desde dos estanques, debido a la acción de dos bombas peristálticas marca Masterflex, modelo L/S Drive Standard, que controlan el flujo de entrada a la tubería proveyendo caudales de bajas magnitudes.

Para apoyar el efecto del vertedero de evacuar el agua dulce que sale de la matriz de suelo y que se posiciona por sobre el agua salada de los costados, se utilizan dos canales adicionales de una de las bombas para inyectar agua salada desde otro recipiente y elevar aún más el agua dulce para que derrame por encima de los vertederos. Un esquema de esto y del sistema de recarga superficial se encuentra en la Figura 3.4.

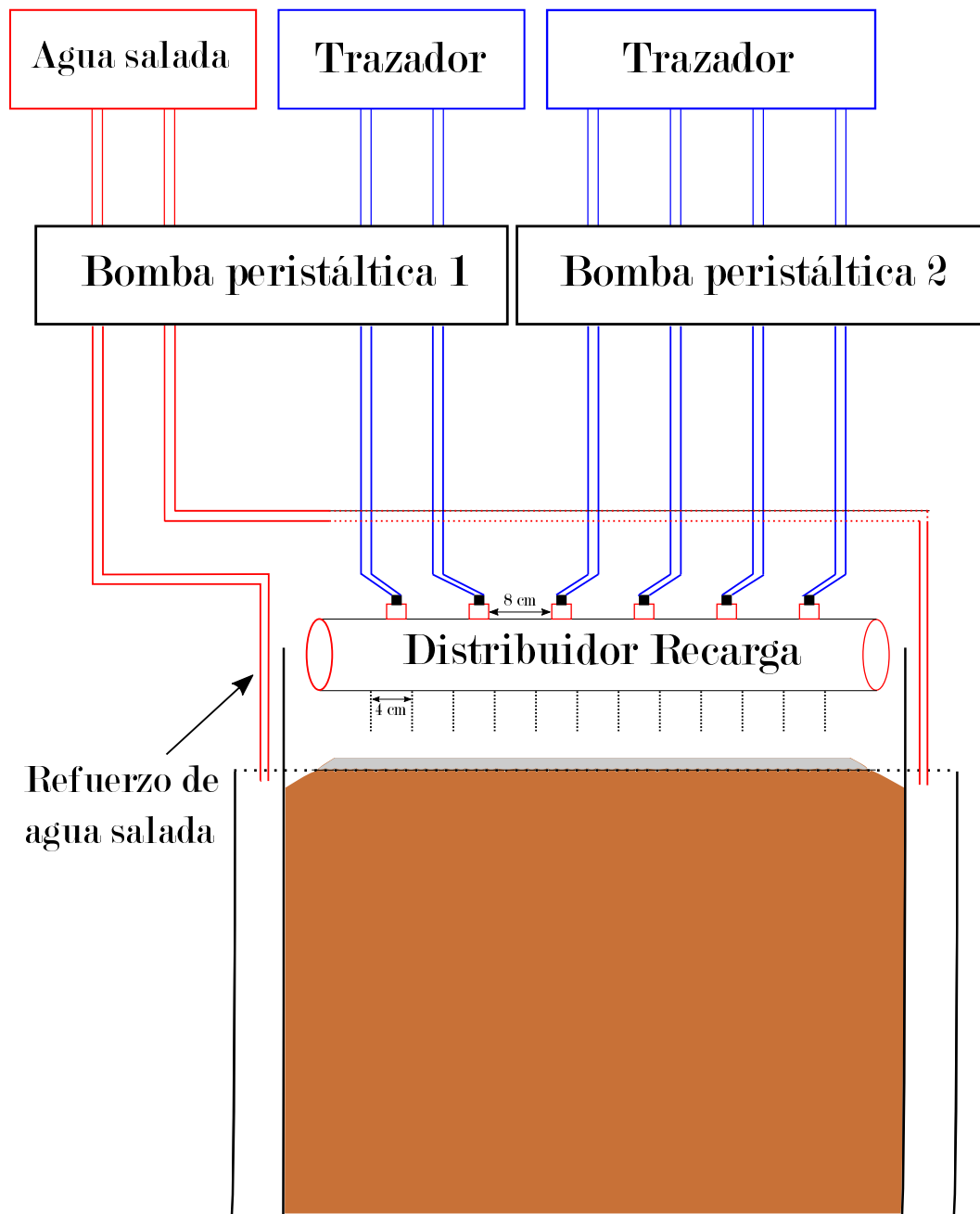


Figura 3.4: Sistema de distribución de caudal.

Para la salida del caudal, se hicieron 12 orificios de 0,6 mm de diámetro debajo de los canales de entrada, que inducen caída por goteo del trazador y que se encuentran separadas en pares, de tal forma que un canal de entrada abastece a dos orificios de salida. De esta manera se asegura que un caudal relativamente similar fluya por cada orificio.

Además, este sistema se sostiene mediante dos piezas de acrílico que se acoplan a la parte

superior del recipiente prismático y que aseguran que la tubería se nivele junto al estanque. En el Anexo A se adjuntan imágenes de los equipos utilizados en el montaje experimental.

3.3 Elección y propiedades de los medios permeables

3.3.1 Elección de granulometrías

A partir de un análisis cuantitativo del alcance de la interfaz de densidad según la Ecuación 2.11 y la razón de aspecto a cumplir según lo propuesto por Dose *et al.* (2014) se seleccionaron las siguientes granulometrías:

- Granulometría 1: De 1,18 a 2 [mm].
- Granulometría 2: De 0,8 a 1,18 [mm].

3.3.2 Conductividad hidráulica

Se midió la conductividad hidráulica de cada granulometría mediante un permeámetro de carga constante para obtener uno de los factores relevantes del montaje experimental. El permeámetro de carga constante utilizado para la medición corresponde a un cilindro de 30 cm de largo y 23 cm de distancia entre cada punto de medición de carga hidráulica, y que posee entradas en su parte superior e inferior para permitir el paso del flujo de agua. Para asegurar un caudal constante para la medición, se utilizó una bomba peristáltica, que debido a su giro continuo, permite entregar un caudal definido por abajo, y a su vez extraer por la parte superior el mismo, evitando que aumente el volumen de agua en el sistema. En el Anexo B se muestran imágenes del montaje para medir la conductividad hidráulica.

Para cada granulometría se midió la diferencia de carga hidráulica para tres caudales distintos, ajustando una curva para obtener el valor de K representativo a partir de la Ley de Darcy (Ecuación 3.1).

$$q = -K \cdot i \quad (3.1)$$

donde q es la velocidad de Darcy [LT^{-1}], K la conductividad hidráulica [LT^{-1}] e i el gradiente hidráulico.

En la Tabla 3.1, se detallan los valores encontrados mediante el permeámetro de carga constante y se comparan con los obtenidos al aplicar la Ecuación 3.2 (Shepherd, 1989), que utiliza el diámetro medio de cada granulometría y el coeficiente C , que para granulometrías irregulares y sedimentos consolidados equivale a 100 y j a 1.5 según lo indicado en la Figura B.2.

$$K = C \cdot d_{50}^j \quad (3.2)$$

Tabla 3.1: Comparación resultados permeámetro y Método de Shepherd.

Granulometría	d_{50} [mm]	K_{Darcy} [cm/s]	$K_{Sheperd}$ [cm/s]	Error Porcentual
1	1,6	0,816	0,761	6,69%
2	1,0	0,353	0,374	5,99%

Tal como se indica en la Tabla 3.1, los resultados estimados mediante el Método de Sheperd se encuentran en el mismo orden que los obtenidos en laboratorio, por lo tanto se descartan errores considerables en los valores de K y se validan para su utilización.

3.3.3 Porosidad

La porosidad de cada granulometría fue estimada mediante lo planteado por Kozeny-Carmen (Ecuación 3.3), considerando el diámetro medio y conductividad hidráulica de cada muestra. Los resultados se muestran en la Tabla 3.2

$$K = \left(\frac{\rho_w g}{\mu} \right) \left(\frac{n^3}{(1-n)^2} \right) \left(\frac{d_{50}^2}{180} \right) \quad (3.3)$$

Tabla 3.2: Porosidades obtenidas

Granulometría	n [-]
1	0,32
2	0,33

Cabe destacar que la porosidad depende fuertemente de la compactación, por ello se estimó indirectamente la porosidad a través de la Ecuación 3.3 y no se realizó en laboratorio.

3.4 Propiedades del agua de mar

La densidad de agua de mar o de los océanos, varía alrededor del mundo debido a las distintas condiciones ambientales que existen en el planeta. En particular, son la temperatura, salinidad y presión los factores más importantes. Para determinar la densidad del agua de mar se utiliza la ecuación propuesta por Fofonoff & Millard (1983):

$$\rho(t, s, p) = \frac{\rho(t, s, 0)}{1 - \frac{p}{K_t(s, t, p)}} \quad (3.4)$$

$$\rho(t, s, 0) = A + Bs + Cs^{1.5} + Ds^2 \quad (3.5)$$

$$K_t(s, t, p) = E + Fs + Gs^{1.5} + (H + Is + Js^{1.5}) \cdot p + (M + Ns) \cdot p^2 \quad (3.6)$$

donde ρ es la densidad del agua en $[kg/m^3]$, s la salinidad en unidades prácticas de salinidad (PSU) o $[g/L]$, p la presión atmosférica en el lugar donde se mide en $[bares]$, t la temperatura del agua en $[^{\circ}C]$ y $A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K, M$ y N son coeficientes del polinomio dependientes de la temperatura. A su vez, la Ecuación 3.6 define el módulo de compresibilidad secante K_t .

Considerando las condiciones del laboratorio donde se realizan las experiencias, es decir, temperatura del agua promedio de $12^{\circ}C$, una salinidad promedio del mar de 35 PSU y una presión atmosférica promedio en el lugar de 0.963 bar, de las ecuaciones 3.4, 3.5 y 3.6 se obtiene una densidad de $1026 [kg/m^3]$. Este resultado sirve como valor de referencia para los montajes experimentales.

A partir de la salinidad del agua de mar, es decir 35 PSU o $[gr/L]$, se determina la cantidad de sal según el volumen a preparar y se agita hasta que todo el soluto se haya disuelto. Una vez lista la solución, se verifican la densidad y salinidad de la mezcla en relación a la estimada mediante 3.4 en el Laboratorio de Calidad de Aguas de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, a través de un densímetro y un medidor multiparámetro, como los que se muestran en la Figura 3.5.

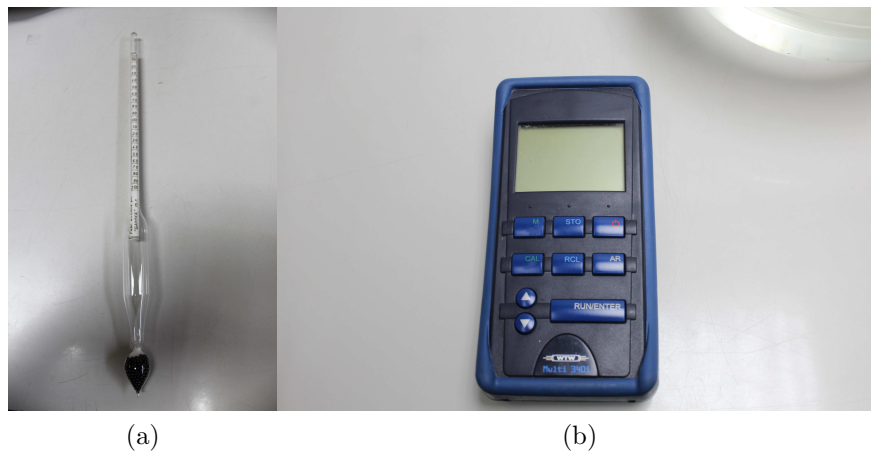


Figura 3.5: (a) Densímetro marca Ambrus Gamma; (b) Medidor multiparámetro W340i .

3.5 Captura y análisis de imágenes

La captura de las imágenes de las experiencias se realizó con una cámara Canon EOS Rebel T3i, con resolución de 18 megapíxeles. Para esto se monta la cámara en un soporte fijo al suelo a una distancia de 1 [m] del tanque, enfocando sólo la zona central, tomando fotografías durante la duración de cada experimento, con un intervalo entre cada captura de dos minutos en el caso de las experiencias 2, 4 y 5 mediante el software de control de la cámara EOS Utility de Canon, y un intervalo de 10 minutos para los experimentos

restantes con control manual. Además de lo anterior, la iluminación del tanque se hizo de forma ambiental, es decir, con la fuente de luz iluminando sobre y por delante del recipiente, ya que permitió obtener mejor contraste entre el agua salada y el trazador BB.

Para el análisis de imágenes, fue necesario en primer lugar discernir que componente del modelo RGB (Red Green Blue) de colores permite visualizar de mejor forma los cambios de intensidad de color asociados al ingreso de agua dulce con BB. Para esto, se analizó un perfil vertical representativo de dos imágenes de distintas experiencias (granulometrías diferentes) para definir el canal de color a utilizar. La Figura 3.6 muestra la intensidad de los tres canales para cada pixel de los perfiles analizados.

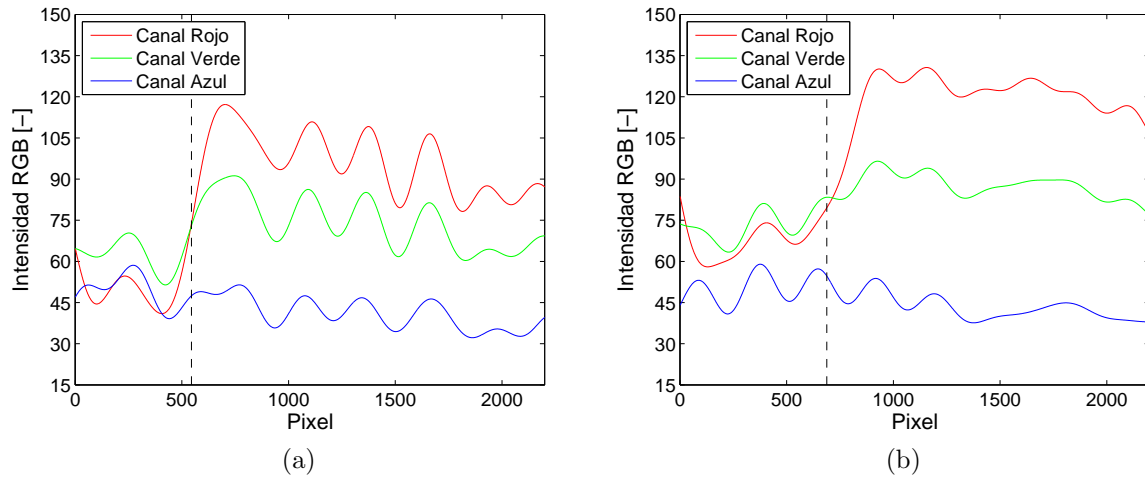


Figura 3.6: (a) Comparación de intensidades de color en un perfil vertical para una experiencia con Granulometría 1; (b) Comparación de intensidades de color en un perfil vertical para una experiencia con Granulometría 2. Notar que para ambos casos la línea negra segmentada representa la posición de la interfaz de densidad en los perfiles.

A partir de la Figura 3.6 se aprecia que en ambos casos el cambio de intensidad captado por la presencia de BB es mucho más notorio en el canal rojo que en el verde y azul, siendo ese el escogido para ser ocupado. Las fluctuaciones de intensidad que se aprecian en la figura, se deben principalmente a la intensidad de luz utilizada para iluminar el estanque y a la heterogeneidad y color de las partículas de cada granulometría, las que generaron ruido en los resultados.

Definido el canal, se transforma la imagen a escala binaria (blanco y negro) a partir de un filtro que determina que intensidades pasan a blanco o negro, según corresponda. El valor del filtro para cada experiencia se detalla en la Tabla 3.3. Posteriormente, se suaviza la imagen binaria para eliminar el ruido restante y se detecta la interfaz encontrando el punto de contraste en cada franja vertical de la imagen. Lo anterior, se muestra en las Figuras 3.7.

Tabla 3.3: Intensidades de filtro

Experiencia	Intensidad del filtro
1	70
2	76
3	72
4	80
5	76
6	77

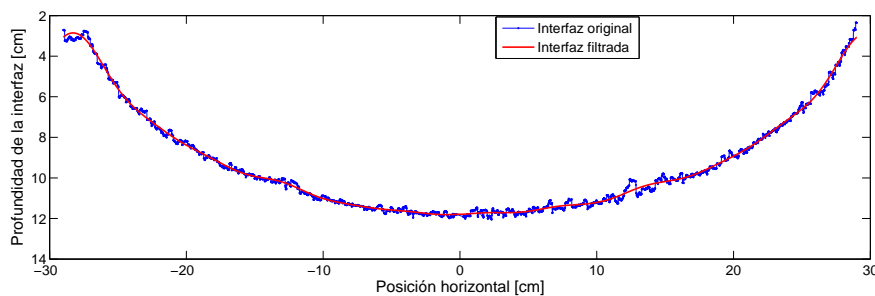
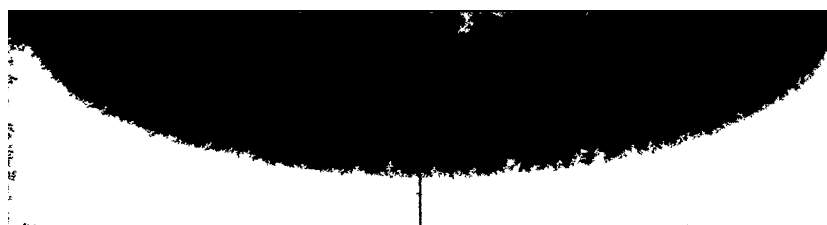
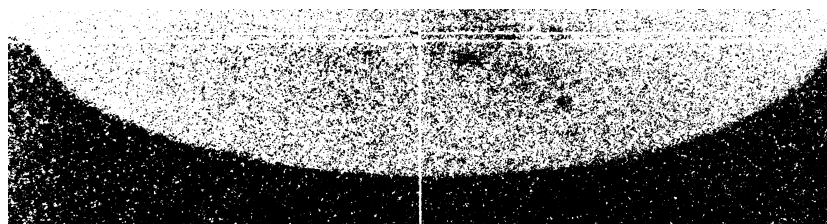


Figura 3.7: (a) Imagen binaria sin suavizado; (b) Imagen binaria con suavizado; (c) Interfaz detectada originalmente y luego filtrada de la imagen (b).

Finalmente, una vez detectada la interfaz de densidad en las imágenes, se aplica un filtro pasa bajo para eliminar las altas frecuencias de la señal y de esta forma eliminar el ruido o

errores aleatorios provenientes de la refracción de la luz o cambio de tonos en las arenas, lo que es ejemplificado en la Figura 3.7c.

3.6 Construcción del modelo numérico

Uno de los objetivos de este trabajo, se relaciona con la construcción de un modelo numérico que simule el comportamiento temporal y espacial de la interfaz de densidad. Para esto, se debe utilizar un software que permita resolver el problema de flujo de densidad variable en un medio permeable. Existen distintos paquetes computacionales que permiten resolver el problema, por un lado están los que se basan en el método de diferencias finitas, como SEAWAT o SUTRA, que resuelven el problema de transporte, acoplándose a MODFLOW que paralelamente actúa sobre el de flujo. Por otro lado, están los modelos de elementos finitos, como FEFLOW o COMSOL, que resuelven conjuntamente ambos procesos.

En este caso, debido a su disponibilidad de uso se trabajó con COMSOL, a través de su módulo "Two phases Darcy law" que permite resolver las ecuaciones de flujo acoplando dos fluidos a densidades distintas relacionándolas a través de su factor de saturación en el medio poroso.

Se definió en virtud de lo anterior, que el agua dulce que ingresa por la superficie del dominio tenga saturación 1, mientras que el agua salada alojada en medio homogéneo tuviese saturación 0.

El modelo recoge las dimensiones del montaje experimental, las condiciones de borde laterales y la recarga superficial, que son los aspectos fundamentales que rigen el alcance de la profundidad de la interfaz de densidad.

3.6.1 Geometría

El modelo numérico se basa en las dimensiones del montaje experimental, fundamentalmente en la forma que adquiere el medio poroso saturado definida por el ancho de la zona central del estanque y por el talud construido en su parte superior. Junto con lo anterior y siguiendo el supuesto analítico, el modelo se construye en 2D, es decir, despreciando el espesor del recipiente.

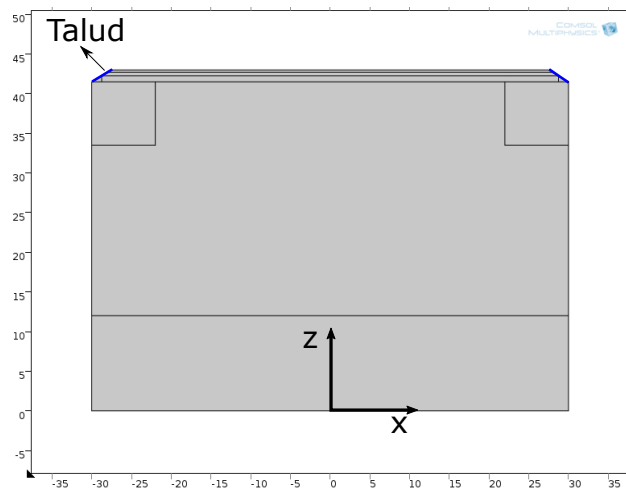


Figura 3.8: Geometría modelo numérico. Se especifica los taludes y el origen del sistema de referencia.

La geometría construida es la que se muestra en la Figura 3.8. Consta de un rectángulo de 60 cm de ancho y 41.5 cm de alto, que simula el cuerpo de la isla, acoplado a un trapecio de 60 cm de base inferior, 57.5 cm de base superior y 1.5 cm de altura, lo que permite alcanzar un ángulo de reposo cercano a 30° en el talud, que ejemplifica la pendiente de playa del modelo de isla ideal. La geometría utilizada simula solo la parte saturada del modelo experimental, es decir, desprecia la parte del montaje que queda sobre el nivel de los vertederos.

3.6.2 Construcción de la malla de elementos

COMSOL utiliza para la resolución de los distintos problemas que es capaz de modelar, una distribución basada en elementos finitos, es decir, la construcción de geometrías (triangulares o cuadradas) de tamaño variable donde se calculan las ecuaciones de flujo, guardando continuidad de las propiedades simuladas en cada uno de los nodos de los elementos. En este caso se utilizaron elementos triangulares, ya que son más estables y recogen de mejor manera los cambios que se producen en el área de simulación.

La malla construida se muestra en la Figura 3.9. Posee 45830 elementos triangulares, distribuidos en 7 secciones dentro de la geometría. En la parte baja del dominio, se construyeron elementos gruesos de un máximo de 6 [cm] de lado para reducir el tiempo de simulación, debido a que la interfaz de densidad no alcanza tanta profundidad en virtud de la razón de aspecto a cumplir entre la profundidad del lente de agua dulce y el ancho de la isla (Stoeckl & Houben, 2012). Por otro lado, en los bordes del talud como en las paredes laterales fue necesario mayor refinamiento alcanzando un tamaño de 0,008 [cm], debido a la aparición de errores numéricos asociados a inestabilidades en el modelo y la presencia de la condición de borde de carga constante de agua salada en varios elementos cercanos de la malla.

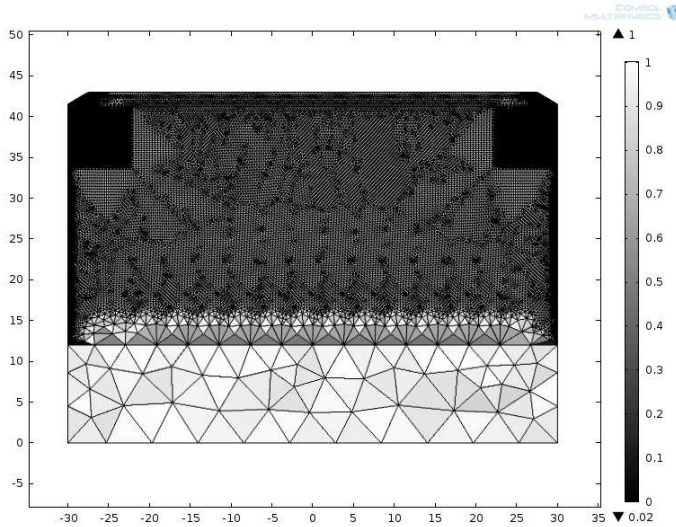


Figura 3.9: Distribución de la malla de elementos en la geometría.

3.6.3 Parámetros de entrada

El módulo utilizado requiere de una serie de parámetros de entrada, relacionados con las ecuaciones que se resuelven iterativamente, y que fueron presentadas en la sección 2.4. Por ello, son específicos tanto para la matriz de suelo, como para cada tipo de fluido (agua dulce o salada).

Los parámetros de entrada del medio poroso se presentan en la Tabla 3.4. La difusión capilar se definió a partir de los valores utilizados por Ghassemi *et al.* (1996), Stoeckl & Houben (2012) y Dose *et al.* (2014) en trabajos anteriores. La porosidad n , fue calculada mediante la Ecuación 3.3 y detallada en la Tabla 3.2, mientras que la densidad del medio, se definió constante y representativa para cada granulometría, ya que todas se encuentra en el rango de arenas gruesas.

Tabla 3.4: Parámetro de entrada utilizados en el modelo para la matriz de suelo

Parámetro	Unidad	Valor
Difusión molecular (D_c)	m^2/s	1,00E-09
Densidad (ρ)	kg/m^3	1450

Las variables de entrada del agua salada y agua dulce se muestran en la Tabla 3.5. En el caso de las densidades de agua dulce y salada, éstas se calcularon a partir de la Ecuación 3.4, considerando salinidad 0 y 35 PSU, respectivamente. Por otro lado, la temperatura de ambos fluidos, se determinó empíricamente en laboratorio y la viscosidad dinámica (μ_i) se calculó a partir de la viscosidad cinemática (ν_i) y la densidad de cada fluido (ρ_i) a la temperatura correspondiente, según $\mu = \nu \cdot \rho$.

Tabla 3.5: Parámetros de entrada agua dulce y de mar utilizados en el modelo numérico

Parámetro	Unidad	Valor
Densidad agua de mar	kg/m^3	1026
Densidad agua dulce	kg/m^3	999,9
Viscosidad dinámica agua de mar	$Pa \cdot s$	1,31E-03
Viscosidad dinámica agua dulce	$Pa \cdot s$	1,39E-03
Temperatura agua de mar	$^{\circ}C$	10
Temperatura agua dulce	$^{\circ}C$	10

3.6.4 Condiciones iniciales y de borde

Condiciones de borde

Las condiciones de borde del problema han sido bien definidas en trabajos anteriores, por ejemplo en [Ghassemi *et al.* \(1996\)](#) y [Stoeckl & Houben \(2012\)](#), y adecuadas a la estructura y funciones que tiene el módulo de flujo subsuperficial utilizado en COMSOL. En particular, el software permite ingresar las siguientes condiciones en los contornos del problema:

- Condición de no flujo: No existe flujo normal al borde, por ende permite simular una pared impermeable, como el borde inferior o base del tanque de arena. En COMSOL se plantea como:

$$-\mathbf{n} \cdot \rho u = 0 \quad (3.7)$$

donde \mathbf{n} es el vector normal a la superficie, ρ la densidad promedio en cada punto de la matriz de suelo y u la velocidad del flujo en el modelo.

- Condición de recarga superficial: Corresponde a una condición de borde de Neumann, ya que existe un flujo normal de agua dulce entrando por la superficie de la isla dentro del tanque de arena. Busca simular el efecto del sistema de recarga superficial sobre el tanque de arena. Se ingresa en el programa como condición de entrada,

$$-\mathbf{n} \cdot \rho u = s_1 \rho_1 U_0 \quad (3.8)$$

donde s_1 es la saturación del agua dulce, en este caso igual a 1 y U_0 la velocidad normal del flujo entrante.

- Condición de nivel del mar: Corresponde a una condición de borde de Dirichet en los bordes laterales del modelo, dado que define el nivel de carga de agua salada constante en los costados izquierdo y derecho de la isla, simulando el nivel del mar. Simula el nivel de columna de agua salada que definen los vertederos del modelo experimental

despreciando el flujo de agua dulce saliente. COMSOL, en este caso, sólo permite ingresarla como condición de presión y saturación, y por ello fue necesario redefinirla como se muestra en la Ecuación 3.9,

$$p = \rho_s g (h_s - z) \quad (3.9)$$

donde p es la distribución de presiones en los bordes verticales laterales del modelo, ρ_s la densidad del agua salada, h_s la carga de agua salada definida por el nivel de mar para el modelo de laboratorio y z la altura definida desde la base del tanque.

Además de lo anterior, se generaron zonas de 6 [mm] en cada talud a partir del tamaño de los elementos en los costados, donde se definió $p = 0$ con saturación de agua dulce, de tal forma que se evacúe el agua dulce del modelo durante la simulación hasta el régimen permanente, similar a lo que ocurre en los bordes del experimento. Cada una de las condiciones y su ubicación se detallan en la Figura 3.10.

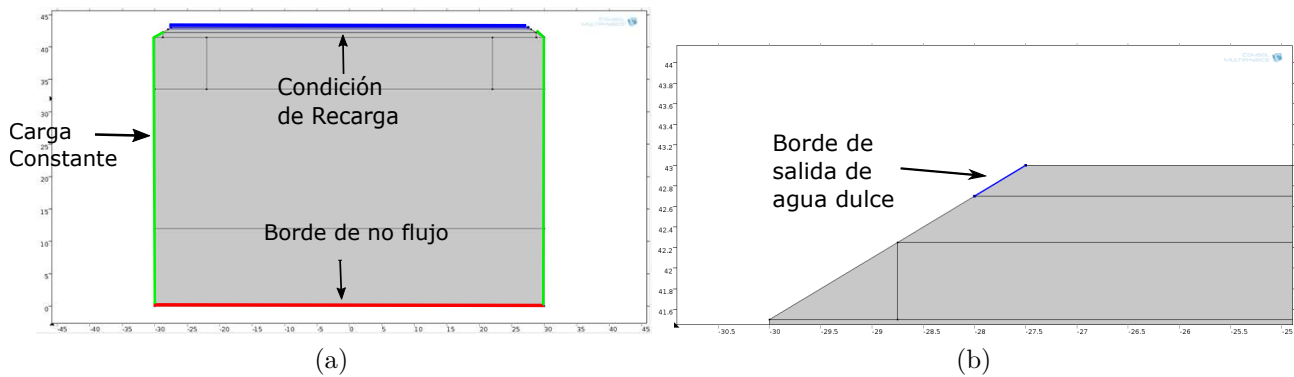


Figura 3.10: (a) Condiciones de borde de no flujo (rojo), recarga (azul) y carga constante de nivel del mar (verde); (b) Área de salida del flujo de agua dulce .

Condición Inicial

La condición inicial del modelo se definió en base a la carga hidráulica inicial en la matriz de suelo, por ello, esta es idéntica a la definida para el nivel de mar, de acuerdo a la Ecuación 3.9.

3.6.5 Balance de masa

El balance de masa dentro del volumen del modelo numérico se define a partir de la Ecuación 2.21. El primer término a la izquierda corresponde a la variación dentro del almacenamiento interno del volumen, y el segundo a los flujos entrantes o salientes por los bordes del modelo.

En COMSOL, para calcular el balance de masa se puede integrar temporalmente los bordes del problema, a partir del resultado ya computado, para estimar los flujos entrantes y salientes

por esas zonas. A su vez, se puede evaluar la variación del almacenamiento en la totalidad de la superficie del modelo calculando el primer término de la Ecuación 2.21. En la Figura 3.11 se presenta como se calculan los términos mencionados en COMSOL. Primero, se designa el borde con el que se trabajará, para luego ingresar la ecuación que uno quiere calcular y así evaluarla temporalmente. En el caso de la variación del almacenamiento interno, la metodología es similar salvo porque en este caso se designa la superficie donde se quiere calcular y la derivada temporal mediante $d(f(t), t)$.

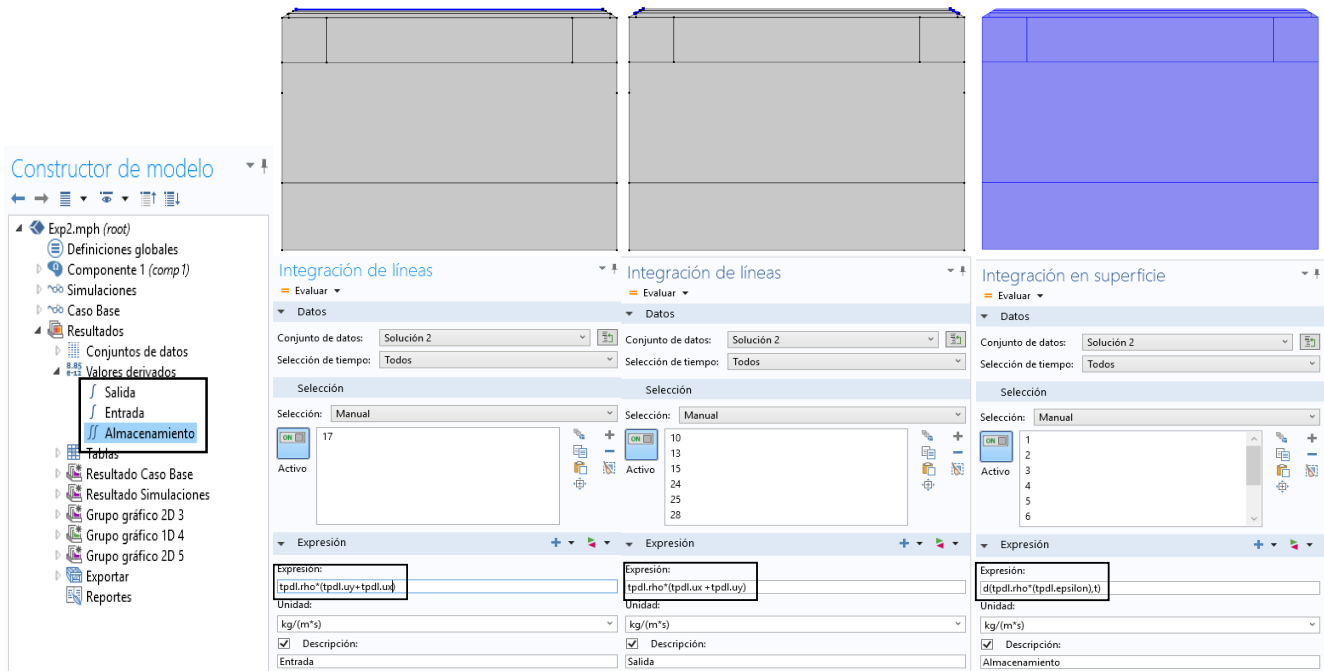


Figura 3.11: Interfaz de COMSOL para calcular el balance. A la izquierda el menú del modelo, a su lado, primero la zona de entrada de agua dulce, luego, la zona de salida a los costados, destacadas en azul en la parte superior y a la derecha la superficie del modelo donde se calcula el almacenamiento.

3.7 Propagación de errores

Los parámetros relevantes de este trabajo han sido medidos de forma directa o indirecta, y por ello están sujetos a errores de medición. Estos errores pueden deberse a imprecisiones en los instrumentos de medición, en la operación de la toma de datos o factores externos relevantes, como la iluminación o temperatura del lugar. Para cuantificar los errores se emplea la propagación de errores, que considera que el error asociado a un parámetro P que depende de n variables se define como:

$$\sigma_P = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\delta P}{\delta x_i} \sigma_{x_i} \right)^2} \quad (3.10)$$

La Tabla 3.6 muestran los errores experimentales conocidos en base a los instrumentos de medición, mientras que la Tabla 3.7 muestra los calculados en base a la Ecuación 3.10.

Tabla 3.6: Rangos medidos y errores experimentales de instrumentos utilizados

Parámetro	Rango medido	Error	Unidad
Resolución de pixeles	640,0 - 1050,0	±0,5	pixeles
Recipiente de aforo de volumen	100 - 200	±1	cm ³
Cronómetro (Tiempo de aforo)	300,0 - 600,0	±0,5	s
Diámetro del permeámetro	4,44	±0,05	cm
Largo del permeámetro	23,00	±0,05	cm
Lectura cota piezométrica	1,10 - 4,55	±0,05	cm
Lectura en el densímetro	1026,0	±0,5	kg/m ³

Tabla 3.7: Errores asociados a los parámetros relevante del montaje

Parámetro	Rango medido	Error	Unidad
Caudal permeámetro	0,60 - 1,05	±0,004	cm ³ /s
Área permeámetro	15,21	±0,35	cm ²
Gradiente hidráulico K1	4,8E-02 - 8,6E-02	±2,18E-03	-
Gradiente hidráulico K2	1,1E-01 - 2,0E-01	±2,20E-03	-
K Granulometría 1	7,94E-03 - 8,5E-03	±2,70E-04	m/s
K Granulometría 2	3,49E-03 - 3,58E-03	±9,81E-05	m/s
Coficiente alpha	38,3	±1,0	-
Recarga 1	2,096E-03	±6,29E-05	cm/s
Recarga 2	1,572E-03	±6,29E-05	cm/s
Recarga 3	1,048E-03	±6,29E-05	cm/s

Capítulo 4

Resultados y Análisis

4.1 Descripción de las experiencias

Se realizaron seis experiencias de laboratorio, para estudiar como se ha mencionado anteriormente, el efecto de la granulometría y recarga sobre la profundización y forma de la interfaz. Los parámetros importantes de cada montaje se presentan en la Tabla [4.1](#).

Tabla 4.1: Experiencias de laboratorio y simulaciones realizadas.

	Abreviación	Conductividad Hidráulica [m/s]	Recarga Superficial [m/d]
Experimento 1	K_1R_1	8,16E-03	1,85
Experimento 2	K_1R_2	8,16E-03	1,38
Experimento 3	K_1R_3	8,16E-03	0,92
Experimento 4	K_2R_1	3,53E-03	1,85
Experimento 5	K_2R_2	3,53E-03	1,38
Experimento 6	K_2R_3	3,53E-03	0,92

Para cada caso, la puesta en marcha consistió primero en la saturación del medio permeable, para esto se vertió agua salada y se depositó la arena en capas de 1 [cm] en el tanque por su parte superior, teniendo cuidado de mantener siempre el nivel de agua al menos 1 [cm] sobre la arena. Además, para evitar el entrapamiento de burbujas se fue compactando y asentando la matriz de suelo con un mazo de goma con el que se golpeaba recurrentemente el recipiente, de tal forma de generar vibraciones que facilitarían la salida de las burbujas de aire atrapadas. Una vez llenado el tanque hasta el nivel de los vertederos, se armó el talud depositando la arena en menores cantidades y, para evitar que el nivel de carga en los costados bajara debido a la succión de la zona no saturada, se fue llenando directamente los vertederos con agua pausadamente hasta que este efecto dejase de ocurrir.

Una vez armada la matriz de suelo, se instaló mediante sus soportes el sistema de recarga superficial y lateral, verificando que los orificios de la tubería que libera el trazador estén apuntando justo al centro del tanque y la tubería bien conectada a las mangueras por donde avanza el agua dulce.

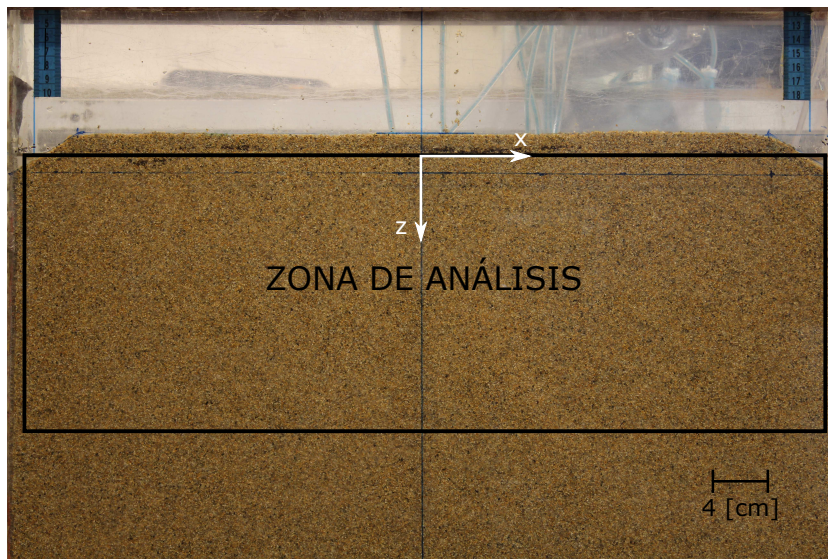


Figura 4.1: Imagen estado inicial de experimento 3, se destaca el sistema de referencia utilizado y se enmarca la zona de análisis de las imágenes.

Para el análisis de imágenes, se instaló la cámara en su soporte y se fijó el lente de tal forma que se captó solo desde la parte superior del tanque hasta alrededor de 30 [cm] por debajo del nivel de carga en la vertical y el ancho de la zona donde se aloja el medio en la horizontal, ya que el objetivo era captar solo la isla, dejando de lado los vertederos, como se muestra en la Figura 4.1. Esta configuración permitió calcular la escala de transformación de píxeles a centímetros de cada montaje, que se presenta en la Tabla 4.2. Estas escalas se obtuvieron a partir de pequeñas regletas colocadas en la parte alta del tanque. En ese sentido, para efectos de la ubicación de la interfaz se analizó una zona delimitada por $x = -29[cm]$ a $x = 29[cm]$ en la horizontal considerando el inicio en el medio del tanque, y de $z = 0[cm]$ a $z = 20[cm]$ donde el origen está ubicado en el nivel de agua a ambos costados. Finalmente una vez listo el montaje, se tomó fotografías del avance del lente hasta que alcanzase el estado permanente.

Tabla 4.2: Transformación o escala de píxeles a cm según cada experiencia realizada

Experiencia	Escala
1	4 [cm] : 350 píxeles
2	3 [cm] : 262 píxeles
3	2 [cm] : 173 píxeles
4	3 [cm] : 263 píxeles
5	3 [cm] : 260 píxeles
6	4 [cm] : 344 píxeles

4.2 Interfaz de densidad en régimen permanente

Como se ha mencionado, este trabajo busca comparar resultados experimentales y simulaciones numéricas con las soluciones analíticas existentes para la posición de la interfaz. Como ejemplo, se muestra en la Figura 4.2 el régimen estacionario de la interfaz de densidad de una de las experiencias en el montaje experimental y modelo numérico. Cabe hacer notar que el modelo numérico idealiza la forma de la matriz de suelo, que sobretodo en la parte del talud no es del todo precisa debido al asentamiento de las partículas. En el Anexo C se resumen las distribuciones de las fases simuladas y en el Anexo D los resultados del modelo en régimen permanente de las seis experiencias.

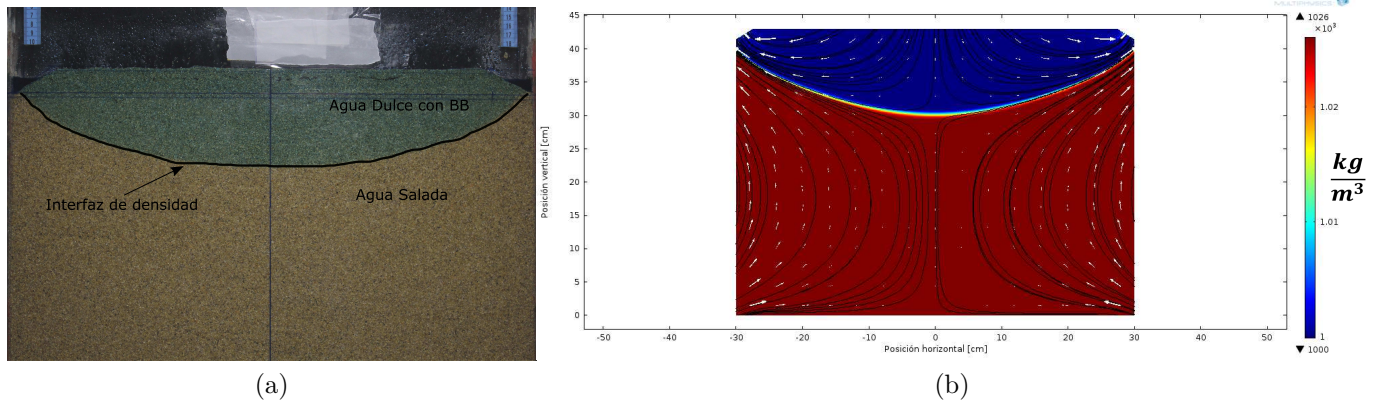
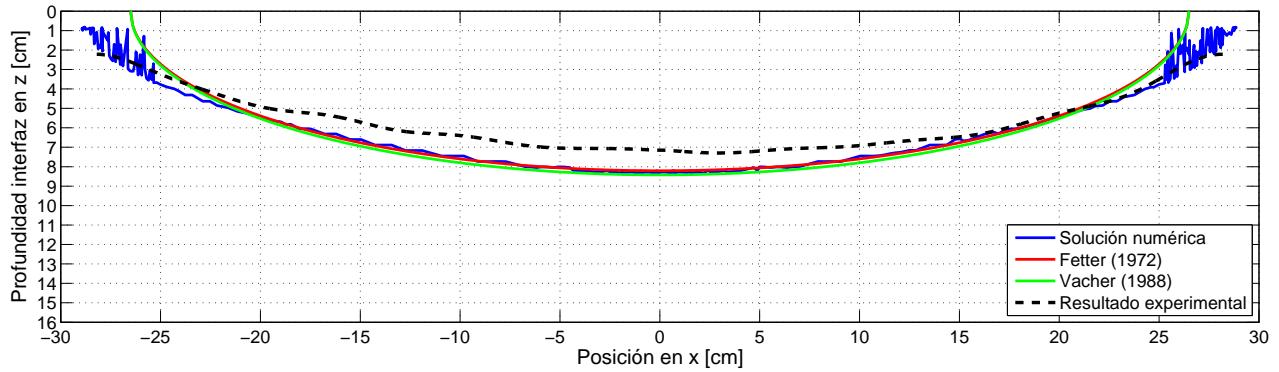


Figura 4.2: (a) Captura del estado permanente de la experiencia 5 a los 240 [min]; (b) Distribución de la densidad promedio dentro del dominio de modelación. La solución corresponde al régimen permanente de la experiencia 5. La barra de color representa la densidad promedio en la matriz de suelo.

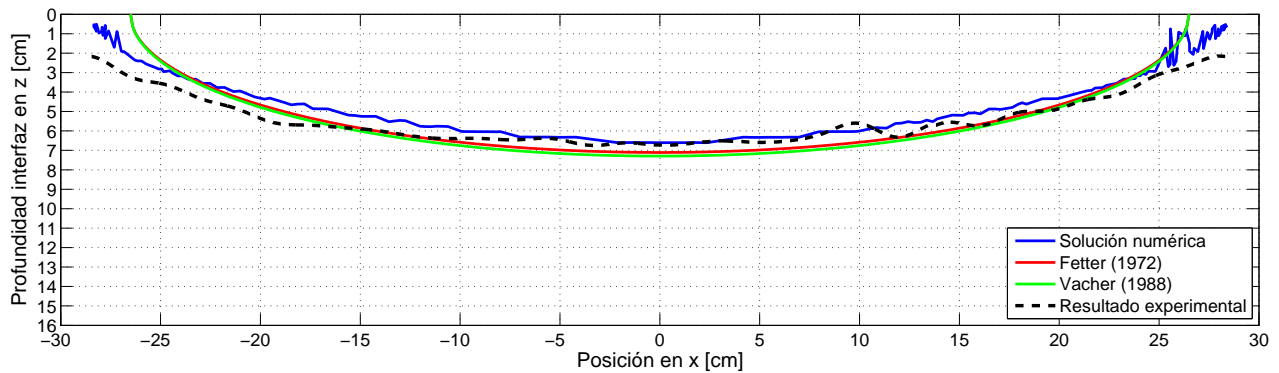
A partir de la metodología detallada en la sección 3.5, se detecta la interfaz de densidad en régimen permanente. A su vez, se calculan las soluciones analíticas de cada caso según las Ecuaciones 2.11 y 2.16, y se comparan estos resultados con lo obtenido mediante la modelación numérica del fenómeno con COMSOL. Las Figuras 4.3 y 4.4 exhiben la forma de la interfaz de densidad según cada solución para las seis experiencias realizadas. Se considera que el origen del sistema de referencia se encuentra al centro de la matriz de suelo y a la altura del nivel de agua salada en los costados.

Notar que, en el caso de las Figuras 4.3b y 4.3c se observan pequeñas desviaciones de la curva en el resultado experimental, asociadas al tamaño de la granulometría 1, que al ser una arena de gran tamaño la hace propensa a errores en el análisis de imágenes. Independiente de aquello, se aprecia de estos casos que la profundidad alcanzada experimental y numéricamente es sumamente cercana al valor esperado mediante las soluciones analíticas. En el caso de la experiencia 1 (Figura 4.3a), existe una mayor cercanía sólo entre los resultados teóricos y

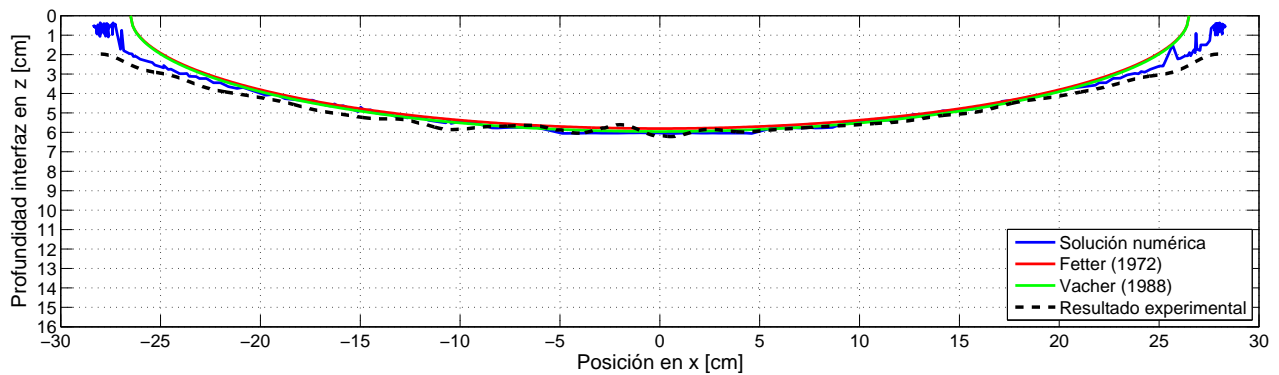
numéricos debido a que seguramente no se alcanzó el régimen estacionario en el momento de interrumpir el montaje.



(a)

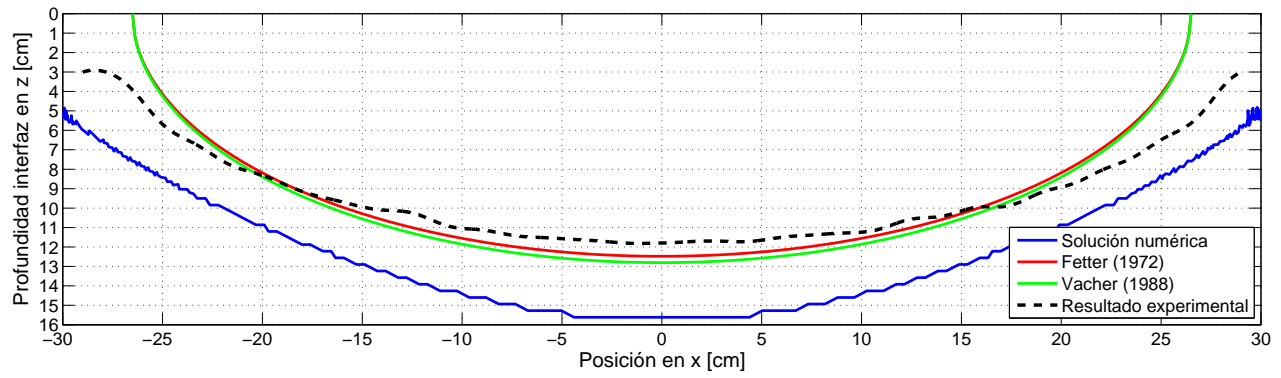


(b)

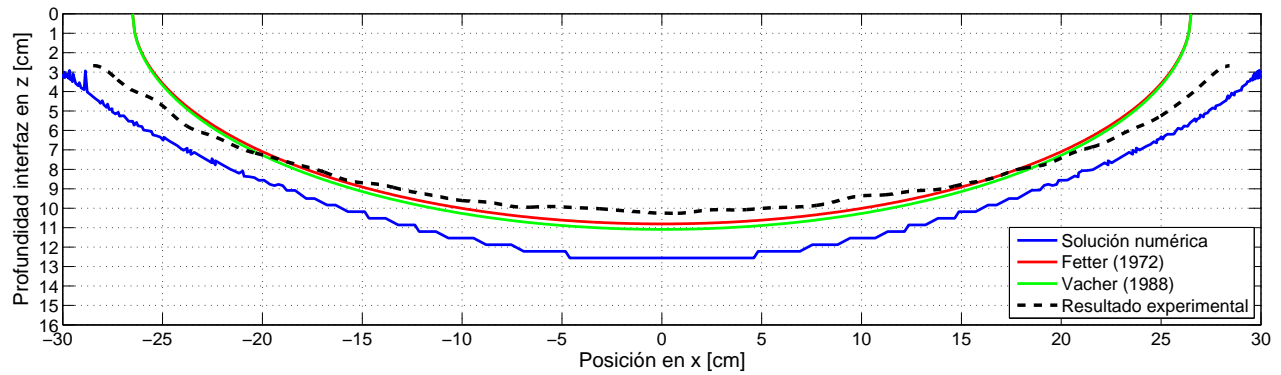


(c)

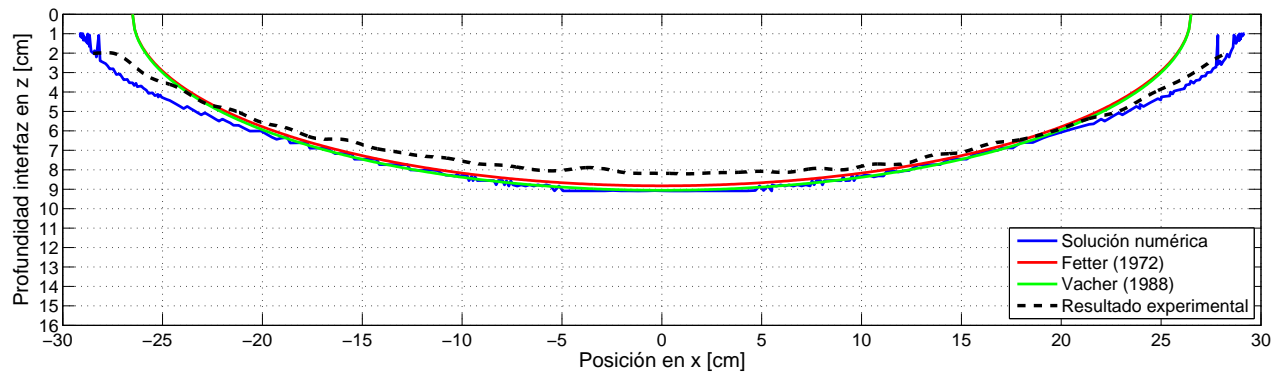
Figura 4.3: (a) Forma de la interfaz en régimen permanente para $K_1 R_1$; (b) Forma de la interfaz en régimen permanente para $K_1 R_2$; (c) Forma de la interfaz en régimen permanente para $K_1 R_3$



(a)



(b)



(c)

Figura 4.4: (a) Forma de la interfaz en régimen permanente para K_2R_1 ; (b) Forma de la interfaz en régimen permanente para K_2R_2 ; (c) Forma de la interfaz en régimen permanente para K_2R_3 .

De la Figura 4.4 es notorio que para los casos K_2R_1 y K_2R_2 el modelo numérico sobreestima exageradamente la profundidad de la interfaz de densidad, tanto en su parte central como en los bordes, donde el inicio de la curva se produce por debajo del talud llevándolo al borde lateral, hecho que en el modelo experimental no ocurre, a pesar que la condición de borde

se aplica en la misma parte. Esta discrepancia se genera principalmente por los problemas de estabilidad del modelo en los bordes, donde la condición no se satisface dado que el área de evacuación de agua dulce desde la matriz de suelo hacia el agua de mar es excesivamente amplia, situación que está ligada al balance de masas del modelo en régimen permanente.

En ese sentido, en la Tabla 4.3, se presenta el balance de masa calculado para cada simulación, mediante la metodología explicada en la sección 3.6.5. Se observa que los flujos de masa son del orden de 10^{-2} a 10^{-3} , mientras que el balance alcanza valores entre 10^{-3} y 10^{-4} en los casos de la granulometría 2, por ello, se verifica que existen problemas en esas simulaciones, lo que concuerda con las diferencias en la profundidad máxima y en los bordes de la interfaz de densidad en las experiencias 4 y 5. Para la granulometría 1, el balance entrega resultados mejores, lo que se condice con el ajuste entre las simulaciones y el montaje en los tres primeros casos.

Tabla 4.3: Balance de masa de cada simulación realizada.

Experiencia	Entrada [kg/(m · s)]	Salida [kg/(m · s)]	Almacenamiento [kg/(m · s)]	Balance [kg/(m · s)]
K_1R_1	1,14E-02	1,09E-02	-1,00E-07	4,62E-04
K_1R_2	8,49E-03	8,35E-03	-5,33E-07	1,34E-04
K_1R_3	5,71E-03	5,64E-03	-1,28E-06	7,38E-05
K_2R_1	1,16E-02	1,02E-02	-7,14E-07	1,33E-03
K_2R_2	8,64E-03	8,06E-03	-1,05E-06	5,74E-04
K_2R_3	5,72E-03	5,22E-03	-9,04E-07	5,00E-04

A su vez, el alcance de los resultados experimentales tiene leves diferencias con las soluciones analíticas tal como la experiencia 1, lo que se debe a que el modelo teórico se basa en condiciones ideales, es decir, medios totalmente homogéneos en compactación y conductividad hidráulica y recarga superficial uniforme. Para simplificar el análisis de los resultados, se presenta en la Tabla 4.4 una comparación de la profundidad máxima alcanzada en el punto central de la interfaz según experiencia y método empleado.

Tabla 4.4: Resumen profundidad máxima alcanzada.

K [m/s]	R [m/d]	Alcance Parte central			
		Fetter (1972) [cm]	Vacher (1988) [cm]	Experimental [cm]	Numérica [cm]
8,16E-03	1,85	8,13 ± 0,31	8,34 ± 0,22	7,24 ± 0,09	8,37 ± 0,30
	1,38	7,04 ± 0,28	7,22 ± 0,21	6,72 ± 0,12	6,61 ± 0,30
	0,92	5,75 ± 0,26	5,89 ± 0,22	6,19 ± 0,16	6,05 ± 0,30
3,53E-03	1,85	12,36 ± 0,45	12,68 ± 0,31	11,79 ± 0,20	15,62 ± 0,30
	1,38	10,7 ± 0,42	10,98 ± 0,31	10,26 ± 0,18	12,56 ± 0,30
	0,92	8,74 ± 0,39	8,97 ± 0,32	8,2 ± 0,11	9,09 ± 0,30

La Tabla 4.4 también indica el error del escalamiento de pixeles a centímetros para el análisis de imágenes, y el error de la incertidumbre de los parámetros utilizados en las soluciones

analíticas para el cálculo de la profundidad de la interfaz a partir de la metodología planteada en la sección 3.7. Se observa que para la granulometría más fina (K_2R_1 , K_2R_2 y K_2R_3) se cumple lo esperado, es decir, que el error de escalamiento de pixeles a centímetros incrementa a mayor recarga para Z_{max} , ya que las profundidades obtenidas son más grandes que para la granulometría 1. En el caso de esta última, el error se comporta de manera contraria debido a la imprecisión de las escalas utilizadas en las experiencias 2 y 3. A pesar de esto, el tamaño de los errores es pequeño en comparación con las profundidades alcanzadas y no generaría grandes variaciones en los resultados experimentales, por lo que se vuelve irrelevante en el análisis. Respecto a la incertidumbre de las soluciones teóricas, en el caso de Fetter (1972) el error aumenta con la recarga, mientras que Vacher (1988) no muestra la misma tendencia, ya que el rango o error para los casos con misma granulometría es prácticamente el mismo. Se interpreta entonces que la solución de Vacher (1988), no propaga linealmente el error de cálculo en función de la recarga superficial.

Tabla 4.5: Resumen profundidad de inicio de bordes de la interfaz

K [m/s]	R [m/d]	Profundidad inicio Borde			
		Fetter (1972) [cm]	Vacher (1988) [cm]	Experimental [cm]	Numérica [cm]
8,16E-03	1,85	0	0	2,22	0,82
	1,38	0	0	2,17	0,52
	0,92	0	0	1,98	0,35
3,53E-03	1,85	0	0	2,96	5,42
	1,38	0	0	2,67	3,12
	0,92	0	0	2,02	1,03

Otro aspecto importante de la forma de la interfaz, es el efecto que ocurre en los bordes. Como lo plantea Van der Veer (1977) existe un flujo de salida de agua dulce en régimen permanente, que mantiene un volumen de acumulación constante de agua en la matriz de suelo de las islas. Este caudal de salida posee una sección constante que posiciona el inicio de la interfaz de densidad a cierta distancia vertical con respecto al nivel del mar, a diferencia del supuesto adoptado por Fetter (1972) y Vacher (1988) en sus trabajos, que se basa en el Principio de Ghyben-Herzberg. Dado lo anterior, la Tabla 4.5 presenta una comparación entre la profundidad de inicio en los costados. Destacar que en el caso del montaje experimental, las profundidades a ambos lados fueron similares, pero no exactamente iguales, debido a inestabilidades en el armado de los taludes y/o la no uniformidad de la recarga superficial. Por ello, se promedió las posiciones de inicio la interfaz en cada experiencia para cuantificar y comparar los resultados.

Por otro lado, existe una correlación ascendente entre la recarga superficial que se utiliza y la profundidad en los bordes, tanto en el alcance experimental como numérico. Sin embargo, y como se aprecia en la Tabla 4.5, los resultados del montaje varían entre 2 y 3 [cm] aproximadamente, lo que se debe puntualmente al efecto de la acumulación de BB en el nivel de agua entre el talud y las barreras laterales, ya que pasado un tiempo prolongado

del montaje el trazador empieza a difundir y comienza a teñir el agua salada en esa zona. De esta forma, el azul intruye en el talud, sobreestimando la profundidad del borde de la interfaz si se aplica simple inspección visual.

Tabla 4.6: Comparación longitud l_e experimental y teórica

K [m/s]	R [m/d]	l_e [cm] teórico	l_e [cm] Experimental
8,16E-03	1,85	0,08	1,20
	1,38	0,06	1,16
	0,92	0,04	1,00
3,53E-03	1,85	0,18	2,35
	1,38	0,13	1,93
	0,92	0,09	1,26

Además de la profundidad en los costados, se estimó la longitud l_e mediante la Ecuación 2.17 y se comparó con el valor experimental extraído del análisis de imágenes para cada experiencia como lo muestra la Tabla 4.6. Se observa que la solución analítica propuesta por Van der Veer (1977) es aplicable con mayor precisión para razones de aspecto de al menos un orden de magnitud superior a las utilizadas en este trabajo (1:50 en adelante), ya que la Tabla 4.6 muestra que existe alrededor de un orden de magnitud de diferencia entre los resultados obtenidos. Además, existe una gran influencia de la dilución del trazador BB en los bordes del talud al igual que en el inicio de la profundidad.

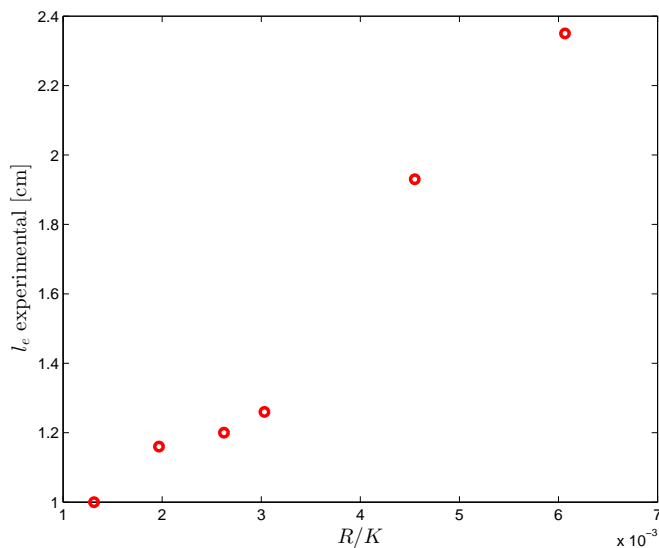
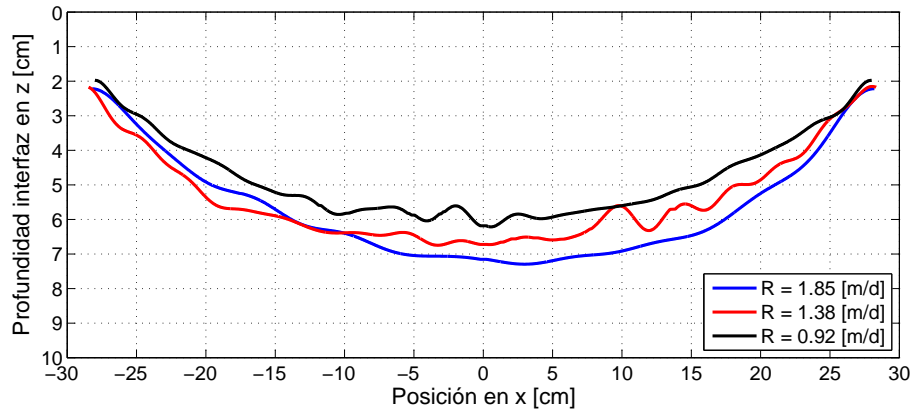


Figura 4.5: Relación entre el ancho l_e experimental y el cociente R/K .

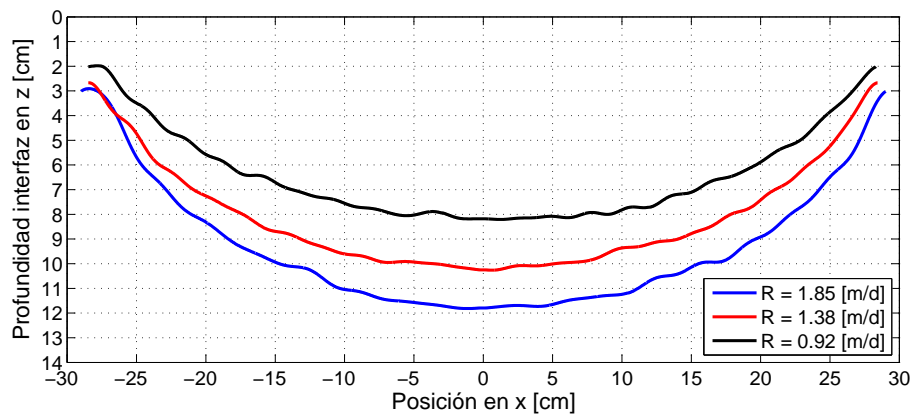
La Figura 4.5 muestra la correlación entre la longitud l_e y el cociente R/K . Se aprecia que

existe una relación ascendente en el crecimiento del ancho de la salida de agua dulce con respecto al aumento de la recarga y la disminución de la conductividad hidráulica, al igual como se comporta la profundidad máxima de la interfaz y de inicio en los bordes.

Ahora en términos cualitativos, la Figura 4.6 presenta una comparación de las profundidades alcanzadas en los montajes según la granulometría utilizada. Cabe destacar que en la Figura 4.6a ocurre una superposición entre las curvas obtenidas para $R = 1.85[m/d]$ y $R = 1.38[m/d]$, hecho que teóricamente no debiese ocurrir, debido a la diferencia de recarga entre ambos casos.

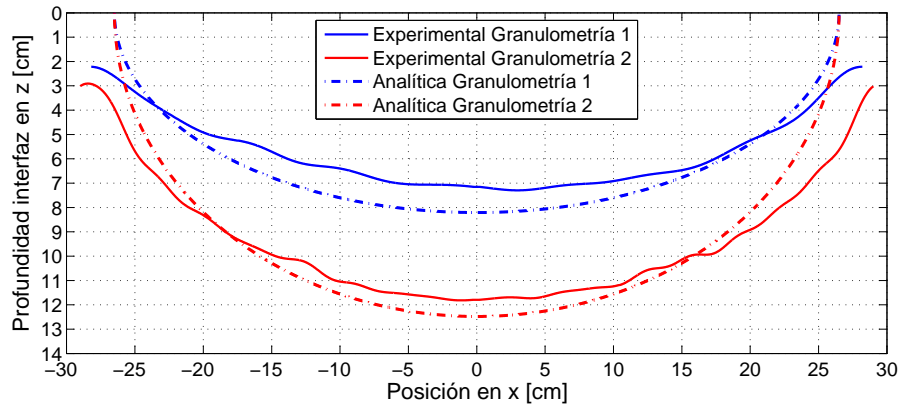


(a)

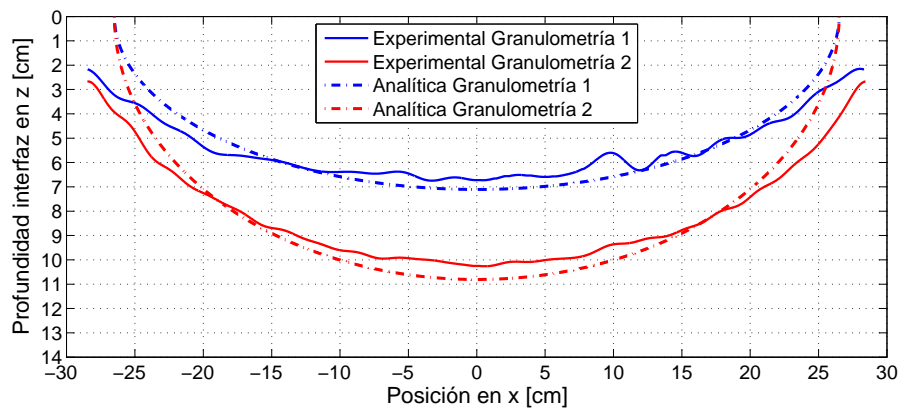


(b)

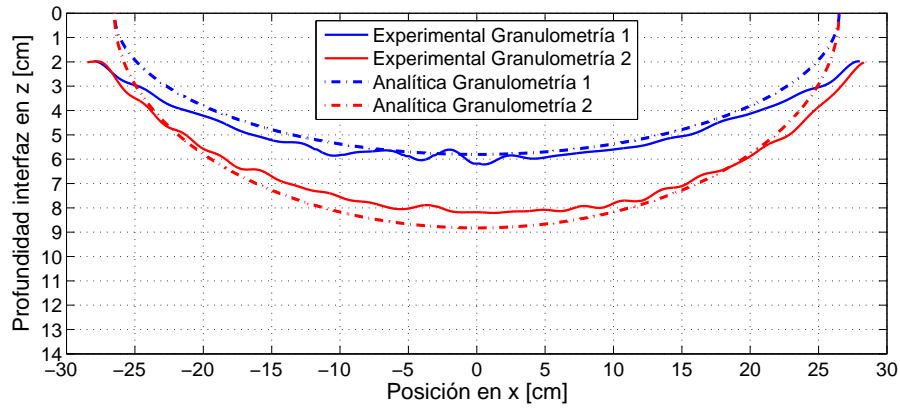
Figura 4.6: (a) Resultados experimentales régimen permanente para la granulometría 1; (b) Resultados experimentales régimen permanente para la granulometría 2.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.7: Interfaz a partir de análisis de imágenes (líneas continuas) y solución analítica de Fetter (1972) (líneas segmentadas) para (a) $R = 1.85[m/d]$; (b) $R = 1.38[m/d]$; (c) $R = 0.92[m/d]$.

La Figura 4.7 muestra los resultados experimentales y teóricos de cada granulometría según

una recarga en particular. Notar que en los bordes de la interfaz no existe sobreposición en ninguno de los casos, salvo la Figura 4.7c, donde la diferencia es ínfima en el lado izquierdo entre las profundidades de inicio de las granulometrías. Además, se aprecia una clara diferencia en los bordes de la interfaz a ambos lados en relación a la solución analítica, lo que indica que las zonas de salida no fueron bien reproducidas por la solución analítica y además exageradas en el montaje, ya que evidentemente se sobreestima su ancho y con ello el inicio de la interfaz en los casos experimentales. Esta situación está relacionada directamente con la dilución del BB en las cercanías del talud en el agua salada, efecto que altera el análisis de imágenes.

Al comparar el efecto de la recarga y la granulometría sobre el alcance de la interfaz, es claro que la conductividad hidráulica afecta visiblemente más que la recarga superficial. Esto se debe principalmente a que la conductividad representa la resistencia al flujo o la capacidad de transmitir agua dada una diferencia de energía, por ello, a una mayor K existen velocidades de flujo de agua dulce más altas y por ello ocurre la salida de mayor cantidad de caudal desde la matriz de suelo por los bordes, lo que se traduce en una menor profundización del lente de agua dulce. En cambio, para una granulometría mas fina, las velocidades son bajas y el agua que infiltra tiende a estancarse dentro del medio permeable acumulándose y aumentando la profundidad de la interfaz y el volumen del lente.

4.3 Evolución temporal de la profundidad máxima de la interfaz

Otro análisis importante se relaciona con la formación temporal del lente de agua dulce en el acuífero, ya que la rapidez de profundización como el tiempo de estabilización de la interfaz dependen preferentemente de la permeabilidad del suelo y de la tasa de recarga superficial que infiltra. Las Figuras 4.8 y 4.9 muestran la evolución de la interfaz de densidad para una de las experiencias montadas, mientras que, las Figuras 4.10 y 4.11, muestran el campo de densidad promedio, líneas de flujo y campo de velocidades para distintos tiempos.

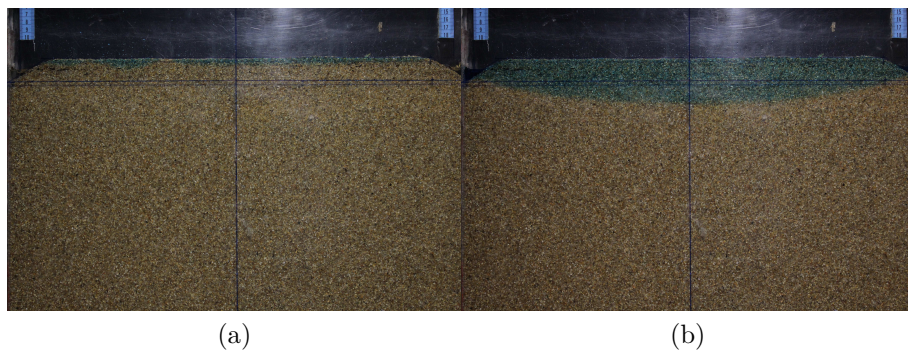


Figura 4.8: (a) 2 [min] Experiencia 2; (b) 30 [min] Experiencia 2.

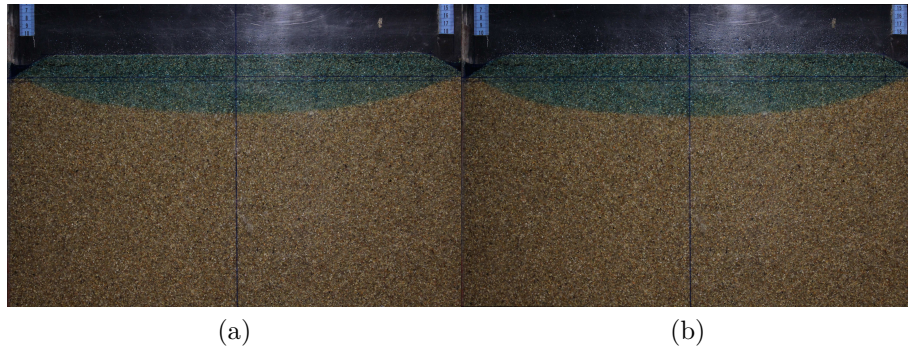


Figura 4.9: (a) 120 [min] Experiencia 2; (b) 240 [min] Experiencia 2.

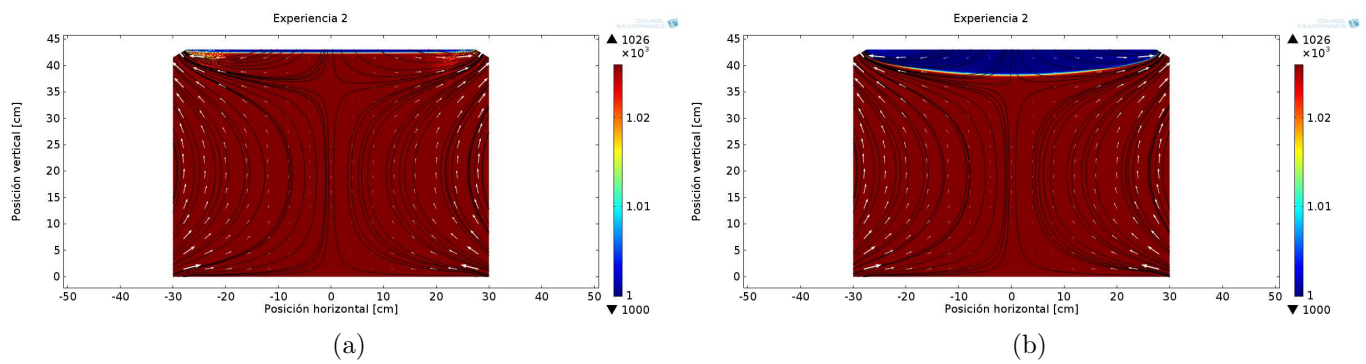


Figura 4.10: (a) Solución numérica 2 [min] Experiencia 2; (b) Solución numérica 30 [min] Experiencia 2.

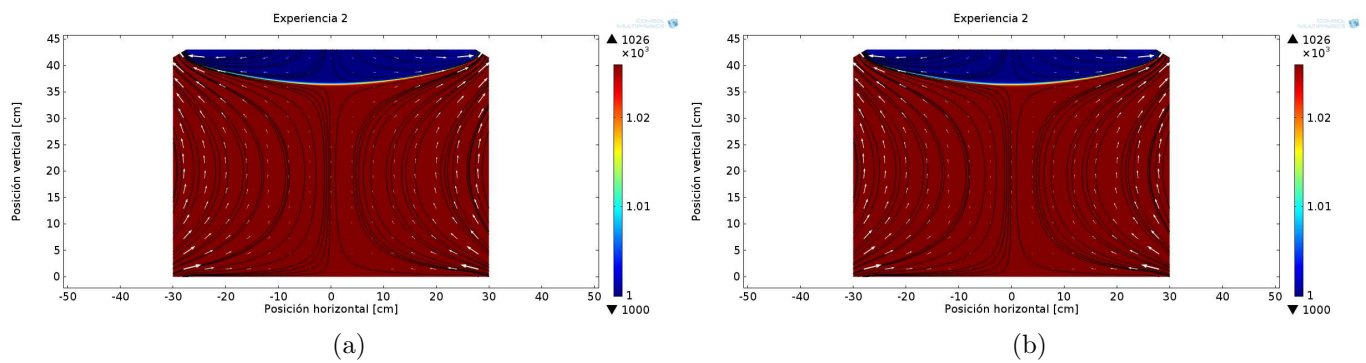
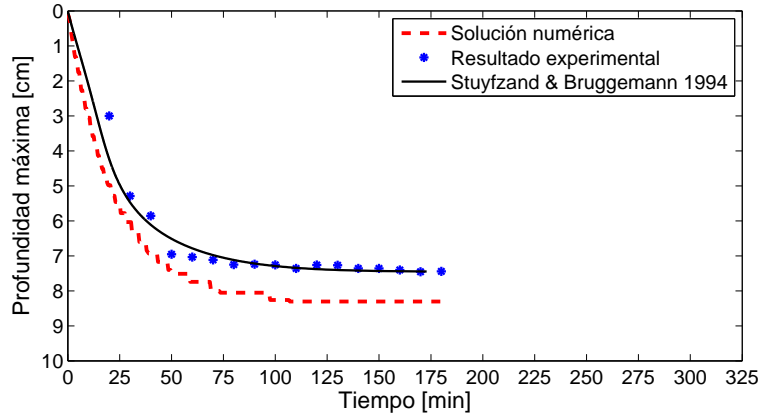


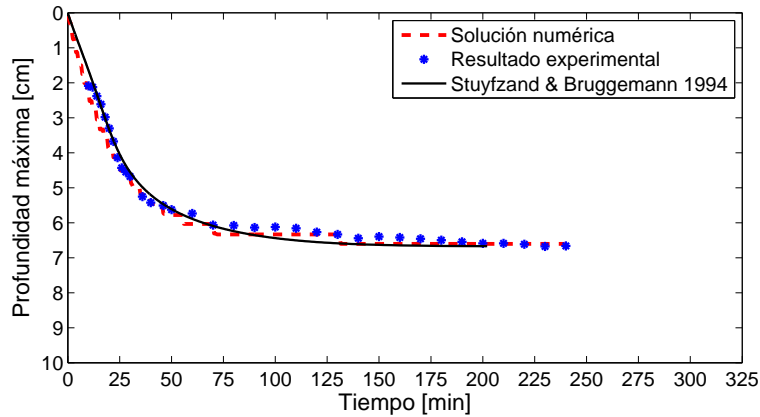
Figura 4.11: (a) Solución numérica 120 [min] Experiencia 2; (b) Solución numérica 240 [min] Experiencia 2.

En las Figuras [4.12](#) y [4.13](#) se presenta la evolución del lente de agua dulce en el centro ($x = 0$) para cada experiencia en base a los resultados del análisis de imágenes de la fotografías

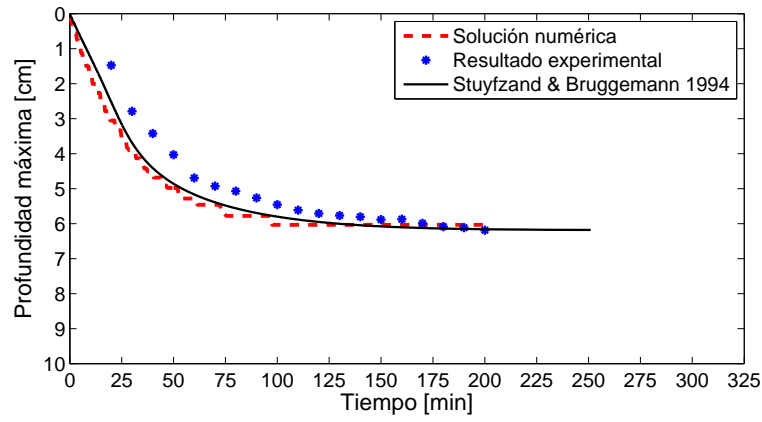
tomadas para distintos tiempos; de la modelación numérica anteriormente detallada y de la aplicación de la Ecuación 2.19 definida para este fenómeno considerando un coeficiente $f_1 = 1$, ya que el medio es homogéneo. También se tiene que n_e igual a los valores de porosidad detallados en la Tabla 3.2 dado que la porosidad efectiva se estima en valores muy cercanos a la porosidad total de los suelos (Bear *et al.*, 1999). Recaltar también, que se consideraron como profundidad en régimen permanente Z_∞ del modelo analítico, los alcances máximos logrados experimentalmente, ya que lo relevante en este caso es verificar si existe una correlación entre el proceso realizado en laboratorio, el modelo numérico y el comportamiento esperado teóricamente.



(a) K_1R_1

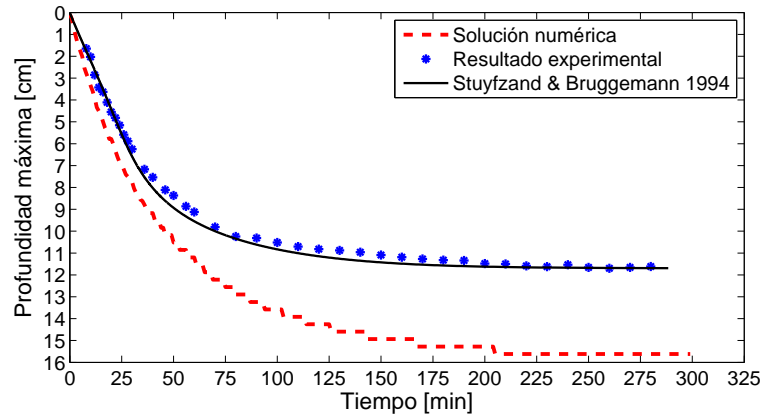


(b) K_1R_2

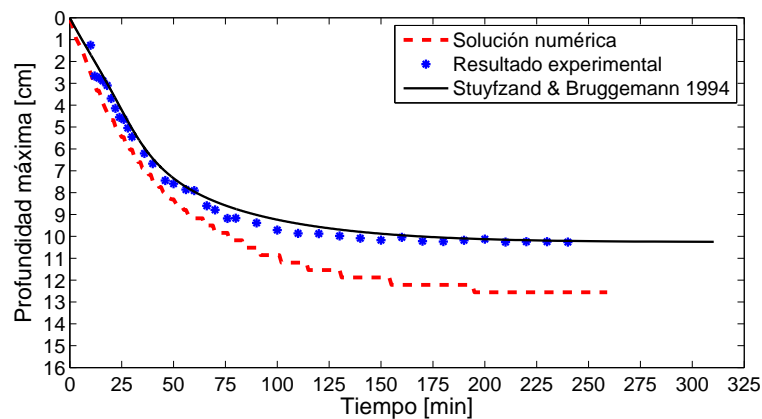


(c) K_1R_3

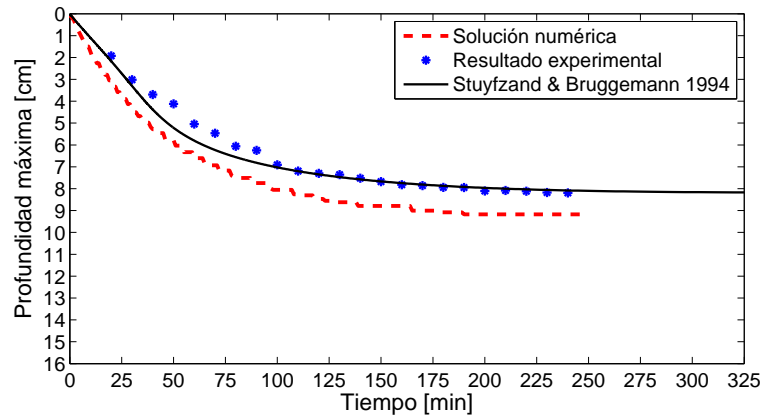
Figura 4.12: (a) Profundidad máxima Experiencia 1; (b) Profundidad máxima Experiencia 2; (c) Profundidad máxima Experiencia 3.



(a) K_2R_1



(b) K_2R_2

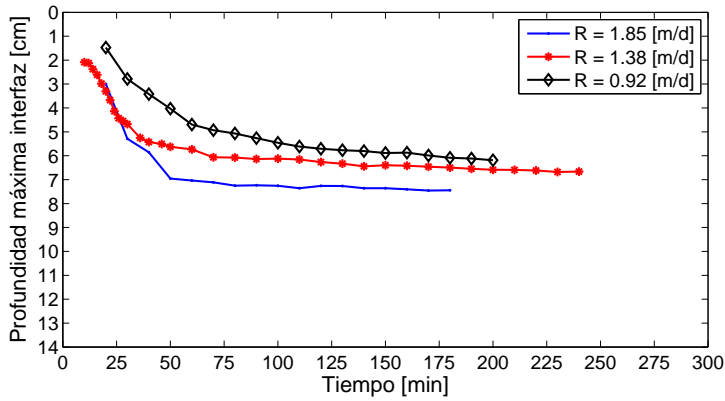


(c) K_2R_3

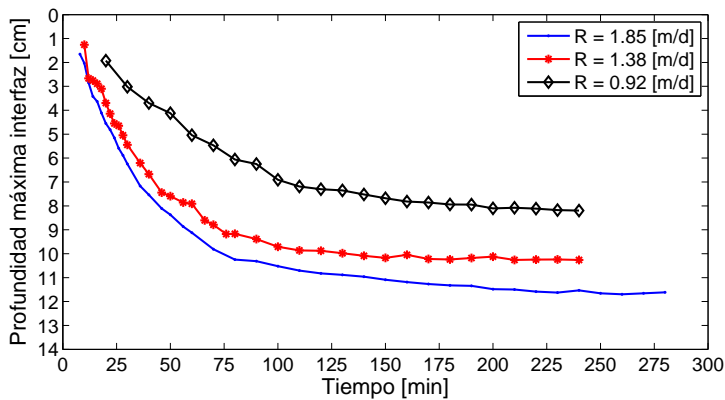
Figura 4.13: (a) Profundidad máxima Experiencia 4; (b) Profundidad máxima Experiencia 5; (c) Profundidad máxima Experiencia 6.

Se aprecia que para todos los casos presentados en las Figuras 4.12 y 4.13 existe un buen ajuste entre los resultados experimentales y analíticos, tanto para los primeros minutos del montaje, donde el avance es abrupto y rápido, como para la parte final donde ocurre la estabilización y la llegada a un régimen cuasi estático. Respecto al modelo numérico, este reproduce adecuadamente la forma de avance del lente para los casos estudiados, salvo las experiencias 4 y 5, para las cuales sobreestima la profundidad final, tal como se aprecia en las Figuras 4.4b y 4.4c. Este desajuste es consecuencia de la inestabilidad del modelo al reproducir la condición de borde lateral influyendo sobre el proceso transiente.

Por otro lado, en la Figura 4.14 se compara el alcance máximo del lente de agua dulce según la granulometría utilizada. Las curvas de profundización de las experiencias con la menor recarga tienen un descenso más suave y pendientes no tan pronunciadas en comparación con las demás experiencias, independiente de la granulometría que se utilice, lo que se asocia a que una menor recarga se traduce en un menor volumen de agua entrante ejerciendo presión sobre la ya acumulada, haciendo paulatino el descenso del lente en la matriz de suelo.



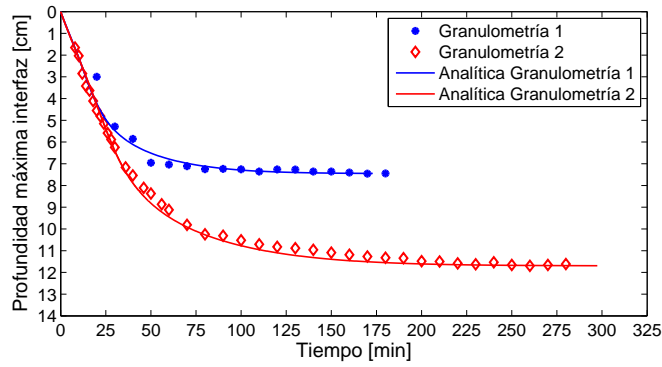
(a)



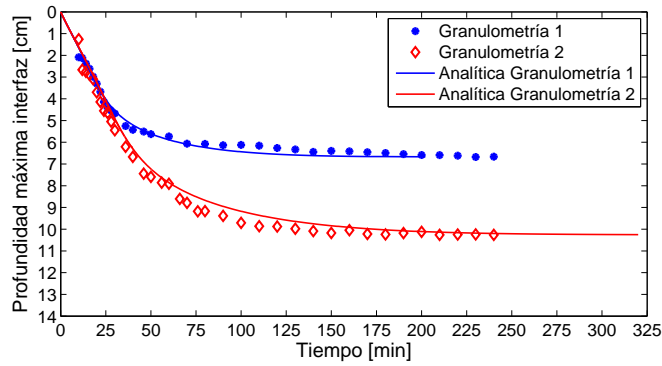
(b)

Figura 4.14: (a) Observaciones experimentales del régimen impermanente Granulometría 1;(b) Observaciones experimentales del régimen impermanente Granulometría 2.

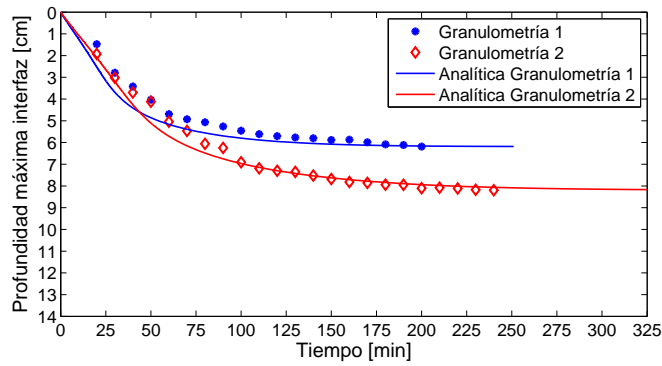
A su vez, la Figura [4.15](#) muestra las curvas experimentales para cada granulometría según la recarga superficial empleada. Se advierte que los resultados para una misma recarga son muy cercanos para los primeros minutos de experimentación, donde se genera un avance dinámico del lente de agua dulce y no repercute el tamaño de grano, luego de superado este intervalo, empieza a notarse el efecto de la conductividad hidráulica estabilizando más rápidamente el lente de agua dulce en caso de la arena más gruesa.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.15: (a) Comparación régimen impermanente para $R = 1.85[m/d]$; (b) Comparación régimen impermanente para $R = 1.32[m/d]$; (c) Comparación régimen impermanente para $R = 0.92[m/d]$.

La Tabla 4.7 muestra un resumen del tiempo que demora cada solución en alcanzar el régimen permanente. Se observa que existe una notoria diferencia en la tendencia de resultados analíticos y numéricos. Mientras el modelo arroja tiempos mayores para la recarga más alta, la solución analítica plantea que el proceso se vuelve rápido si la recarga es grande. De lo observado en laboratorio, donde se logra alcanzar una situación cuasi

estática, la tendencia se condice con el resultado numérico, aumentando la duración del proceso en función de la recarga superficial salvo para la experiencia 1, donde el tiempo al régimen estacionario es igual que el de la experiencia 2, que tuvo menor flujo entrante. Notar además, que la solución analítica planteada en la Ecuación 2.19 diverge para profundidades cercanas a Z_∞ , por ello se optó por considerar en su determinación una discretización más bien conservadora de Z_t , es decir, que el espaciamiento entre profundidades evitase que el tiempo final fuese excesivamente lejano al anterior, lo que pudo haber afectado los resultados obtenidos.

Tabla 4.7: Comparación de tiempos a estado estacionario.

K [m/s]	R [m/d]	Tiempo a régimen permanente		
		Experimental [min]	Analítico [min]	Numérico [min]
8,16E-03	1,85	180	173	180
	1,38	180	210	160
	0,92	170	250	140
3,53E-03	1,85	270	288	300
	1,38	240	305	260
	0,92	220	325	250

4.4 Validez de las soluciones analíticas en base a las razones de aspecto

Se ha dado cuenta hasta ahora a través de las secciones anteriores, que visualmente los resultados experimentales reproducen de buena manera el comportamiento de un lente de agua dulce en formación y su estado en régimen permanente de acuerdo a los modelos analíticos desarrollados para analizar esa situación. Para reafirmar esta conclusión se presentan en la Tabla 4.8 los errores relativos entre la profundidad máxima experimental y las soluciones analíticas, y del modelo numérico con respecto a los resultados de las experiencias. Se aprecia de esta tabla que el error del montaje es menor al 10% respecto a las soluciones analíticas, exceptuando para la experiencia 1 donde se supera levemente este rango, lo que indica un ajuste bastante preciso considerando la escala (cm) a la que se está trabajando. Por otro lado, el modelo numérico no es preciso a la hora de reproducir el alcance de la interfaz de densidad, lo que se refleja en errores que alcanzan el orden del 20 a 30% para las experiencias 4 y 5, donde existe sobreestimación de la profundidad final y errores en el inicio de la curva en los bordes.

Tabla 4.8: Resumen de errores relativos de las observaciones experimentales respecto a las soluciones analíticas y resultados numéricos de la profundidad máxima en régimen permanente.

Experiencia	Experimental		Numérico
	Error Fetter %	Error Vacher %	Experimental %
1	11,8%	14,0%	15,6%
2	5,5%	7,8%	1,6%
3	6,7%	4,0%	2,3%
4	5,5%	7,9%	32,5%
5	5,1%	7,4%	22,4%
6	7,0%	9,4%	10,9%

La Figura 4.16 muestra el ajuste de los montajes realizados en comparación con las soluciones analíticas de Fetter (1972) y Vacher (1988) en función de la recarga. En todos los casos exceptuando la Experiencia 3 ($K_1 R_3$) el alcance de la interfaz subestima el valor de referencia de las soluciones teóricas pero siguiendo la misma tendencia que las curvas teóricas propuestas por Fetter (1972) y Vacher (1988), y encontrándose dentro de los rangos válidos de error en cinco de los seis casos, por ello los resultados son bastante precisos, considerando que la teoría no reproduce la sección de salida que si se observa en la realidad. Notar que los rangos de errores de las soluciones analíticas se calcularon a través de la metodología especificada en la sección 3.7.

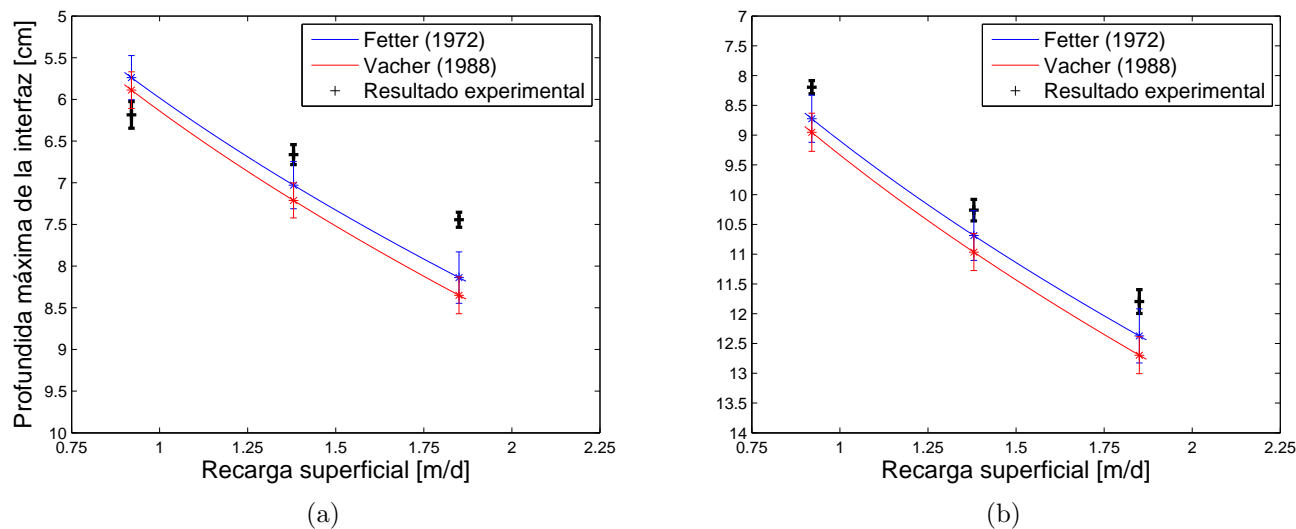


Figura 4.16: (a) Granulometría 1; (b) Granulometría 2.

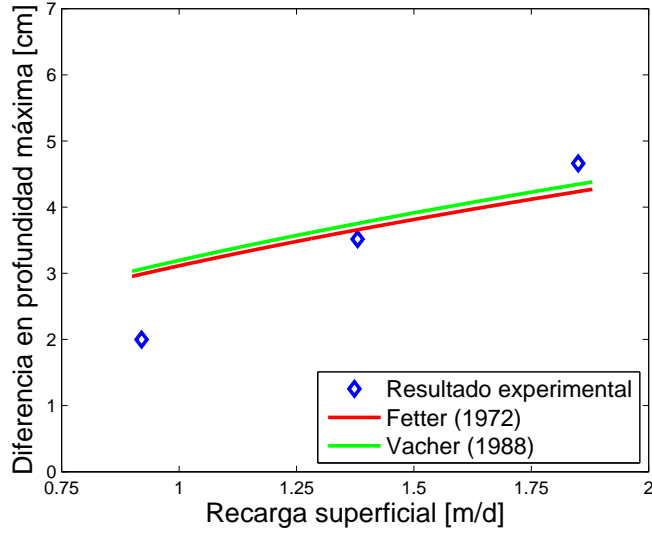


Figura 4.17: Comparación de la diferencia de profundidades máximas en régimen permanente de cada granulometría según recarga.

Ahora, en términos de la diferencia de profundidad del lente para los montajes con igual recarga, el ajuste también es satisfactorio, sobretodo para las recargas más altas ($R = 1.38[m/d]$ y $R = 1.85[m/d]$), como se advierte de la Figura 4.17. La diferencia de profundidad para $R = 0.92[m/d]$ es menor a la estimada teóricamente, ya que el alcance de la experiencia 3 (Figura 4.16a) es levemente mayor y el de la experiencia 6 (Figura 4.16b) menor en relación a lo teórico, en consecuencia, la diferencia se vuelve menor a la esperada.

Si analizamos el problema adimensionalmente se puede comparar la razón entre la profundidad máxima alcanzada experimentalmente y la mitad del ancho de la isla, con la razón entre la recarga superficial y la conductividad hidráulica del medio, que se relaciona directamente con la razón de aspecto del montaje que se está analizando. Se define entonces π_1 y π_2 como:

$$\pi_1 = \frac{z_{exp}}{L} \quad (4.1)$$

$$\pi_2 = \sqrt{\frac{R}{K}} \quad (4.2)$$

A partir de lo anterior, se grafica la relación entre los adimensionales π_1 y π_2 para cada experiencia. Se observa en la Figura 4.18 que existe notoria tendencia al alza de las profundidades que responde al aumento de la recarga y a la disminución de la conductividad hidráulica, asociada a la relación adimensional π_2 presente justamente en las soluciones analíticas de Fetter (1972) y Vacher (1988). Por ello, el ajuste de las profundidades experimentales y los dos parámetros que se modifican en la experiencia es satisfactorio.

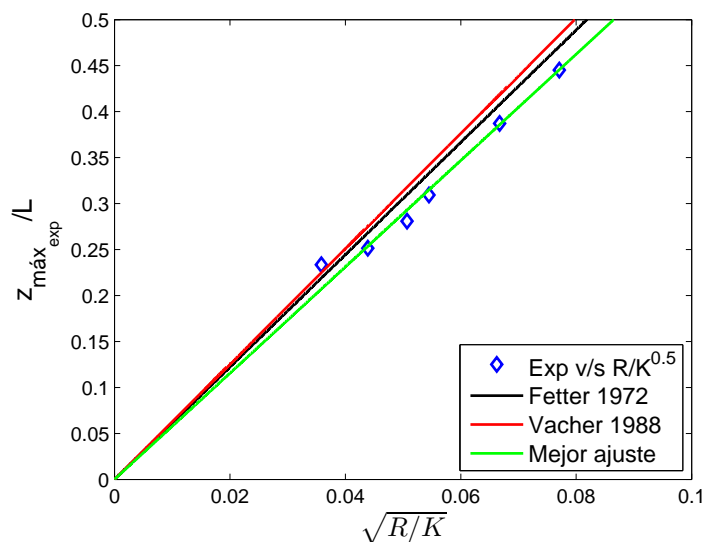


Figura 4.18: Relación de los adimensionales relevantes del montaje experimental.

Finalmente, la Tabla 4.9 presenta una comparación entre las razones de aspecto obtenidas experimentalmente y esperadas teóricamente. En base a esta tabla y lo presentado en este capítulo se ratifica que el montaje reproduce de buena manera la formación del lente de agua dulce y su interfaz de densidad en régimen permanente, salvo el caso de la experiencia 1, donde probablemente no se alcanzó el régimen permanente en el tiempo que se detuvo el experimento pero igualmente validando las soluciones analíticas.

Tabla 4.9: Relaciones de aspecto entre la profundidad máxima de la interfaz en régimen permanente y el ancho total del montaje, para los resultados experimentales y teóricas.

Experiencia	Relación de aspecto experimental	Relación de aspecto teórica (Fetter, 1972)
1	1:7	1:6
2	1:8	1:8
3	1:9	1:9
4	1:5	1:5
5	1:5	1:5
6	1:6	1:6

Capítulo 5

Aplicación de la solución analítica al caso de la isla de Rapa Nui

Rapa Nui o la Isla de Pascua, se ubica a 3700 km de distancia en línea recta del territorio continental chileno, frente a la ciudad de Caldera, siendo el lugar habitado más aislado de suelo continental. Corresponde a un territorio declarado patrimonio de la humanidad por parte de la UNESCO en el año 1995, debido a su maravillosa arqueología reflejada en los moais y a su tradición étnica única en el mundo. Territorio insular chileno desde 1888, posee una forma triangular marcada por dos lados de 16 [km] y otro más extenso de 24 [km], estableciendo una superficie de 166 [km²] aproximadamente. Además, la elevación de la isla fluctúa entre los 0 y 200 [m], a excepción de las cercanías de su punto más alto, que corresponde a la cima del Maunga Terevaka, ubicada a 507 m.s.n.m.

Al igual que muchas islas del mundo, la única fuente de agua dulce está asociada a los recursos subterráneos acumulados durante millones de años a través de la infiltración de la precipitación que cae sobre la superficie del terreno. Hoy en día, la población se abastece de agua para su potabilización mediante el uso de pozos de extracción ubicados en distintos sectores de la isla.

En base a lo expuesto por [Milad Garrido \(2010\)](#), el clima se define como subtropical sin una marcada estación invernal, en donde la temperatura media ronda los 18°C y llueve abundantemente. Respecto a esto último, la precipitación media anual alcanza los 1186 [mm], calculados a partir de la información del período 1983 - 2013 en la Estación Mataverí que se encuentra a una altura de 46 [m.s.n.m]. La Figura [5.1](#) muestra la ubicación de la estación, mientras que los datos utilizados se presentan en el Anexo E. La infiltración al acuífero ha sido estimada entre 30-38% en zonas costeras y 48-58% en zonas altas ([Herrera & Custodio, 2008](#)). Para efectos de este trabajo se analiza una infiltración mínima de 30% y una máxima de 58%.

Para el análisis de la profundidad de la interfaz de densidad que delimita el acuífero de la isla, en la Figura [5.1](#) se define la sección de estudio que posee una extensión de 21.5 [km], donde la elevación del terreno fluctúa entre 20 y 180 [m.s.n.m], de esta forma, el efecto orográfico no se vuelve relevante dada la magnitud de las precipitaciones anuales que caen en la zona, ya que la variación de precipitación entre puntos ubicados en las alturas mínima y máxima, es menor comparativamente con el agua caída anualmente en la isla.



Figura 5.1: Sección de estudio. Se señalan los pozos que poseen información de niveles cerca de la zona de análisis a partir del informe de (Errol L. Montgomery, inc, 2011).

Rapa Nui además posee un origen volcánico, por ende, la permeabilidad de su matriz de suelo es elevada debido a la alta presencia de rocas de origen basáltico. Para simplificar el análisis y a partir de lo indicado por (Claría Hofer (2010)), se definen dos zonas de conductividad hidráulica dentro de la sección de estudio (Figura 5.1) que poseen las siguientes características:

- Zona de permeabilidad media alta: Sección de 18,83 [km] demarcada con color azul en la Figura 5.1. Posee en su mayoría lavas cordadas, que le entregan una porosidad variable de 5 a 30%, y una conductividad hidráulica que en esa zona fluctúa entre 0.1 a 100 [m/día], en base al grado de fracturamiento y compactación según lo plantea (Claría Hofer (2010)). Se escoge como valor representativo de K para efectos de cálculo 10 [m/día].
- Zona de permeabilidad baja: Sección de 2,67 [km] destacada con color amarillo en la Figura 5.1. Conformada por depósitos piroclásticos no muy abundantes en la isla. Su porosidad es variable y la permeabilidad de la sección varía entre 0.1 y 0.001 [m/día] según (Claría Hofer (2010)), tomándose como valor representativo para efectos de cálculo 0.005 [m/día] ya que dominan las granulometrías pequeñas.

A partir de los datos recabados, en la Figura 5.2 se presenta la profundidad de la interfaz de densidad en la sección detallada de la isla en la Figura 5.1, según la solución analítica de (Vacher (1988)), que permite plantear la existencia de dos estratos paralelos horizontalmente con distinta conductividad hidráulica e igual recarga superficial. Además, se grafican los niveles en los pozos cercanos proyectados perpendicularmente a la sección, para comparar con los resultados obtenidos.

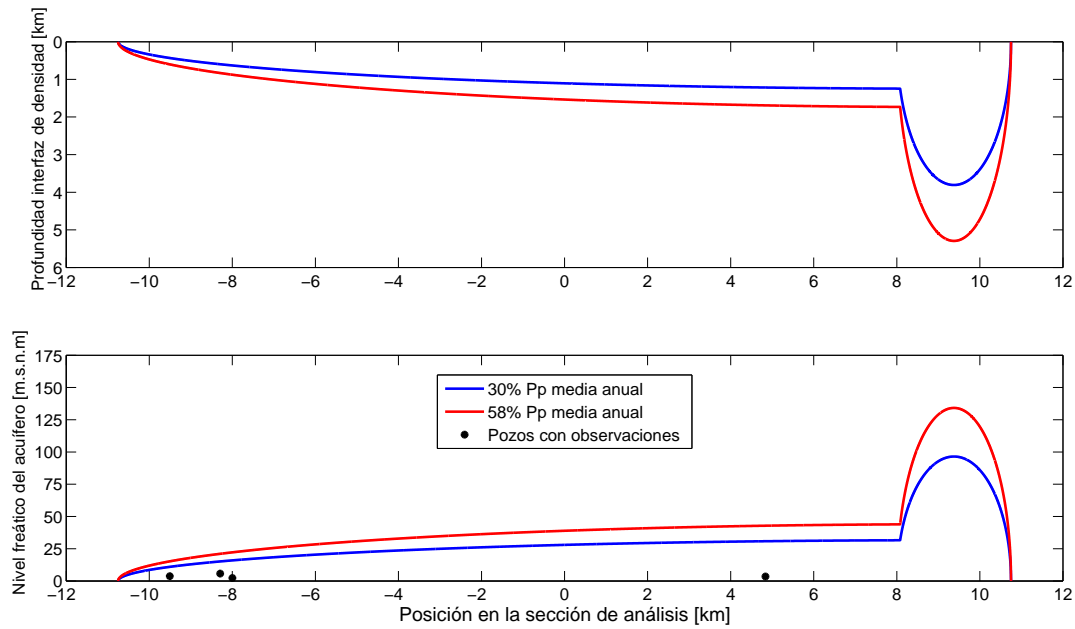


Figura 5.2: Forma de la interfaz y nivel freático estimada para Rapa Nui sin bombeos. $x = 0$ corresponde al centro de la sección de análisis.

Por lo tanto, se aprecia que la profundidad máxima aproximada de la interfaz de densidad en la sección analizada ronda los 5.5 [km] que es justo la zona donde se ubica el volcán Poike (inactivo). Notar que este resultado es una estimación gruesa ya que no considera la influencia de los pozos de extracción que abundan en la isla. Cabe destacar también, que la razón de aspecto en la mayoría de la sección analizada no supera 1:10, mientras que en la parte donde se ubica el volcán (K más pequeño) la razón alcanza 1:5 para la infiltración máxima, que es justamente la menor obtenida experimentalmente. Esta similitud, se debe a que en el montaje se compensa el ancho de la sección con una exageración en la recarga, de esta forma el comportamiento del lente de agua dulce en laboratorio, es parecido al de la zona del Poike.

Se observa también que existe coherencia entre la posición del nivel freático analítica y los datos de pozos cercanos a la sección, ya que en los pozos ubicados a poca distancia de la costa, es decir, P7, P27 y P29, los niveles son más bajos, lo que se relaciona a los bombeos que en esos puntos han deprimido el nivel y generan la diferencia obtenida. Sin embargo, en P19 el ajuste no es satisfactorio lo que se puede asociar a que el valor de K escogido no reproduce de buena manera la situación y a que este pozo se encuentra más alejado que los otros de la zona de análisis.

Capítulo 6

Conclusiones y recomendaciones

En este trabajo se analizó la implementación de un montaje que fuese capaz de reproducir la formación de un lente de agua dulce en el acuífero costero de una isla ideal, tanto espacial como temporalmente, y que permitiese estudiar la influencia de la recarga y la conductividad hidráulica sobre el fenómeno. Para esto, se estudió el proceso de forma experimental, teórica y numérica. Las principales conclusiones del trabajo se presentan a continuación.

6.1 Montaje experimental

Uno de los objetivos específicos de esta memoria de título fue construir e implementar un montaje que permita reproducir la formación de un lente de agua dulce. El montaje diseñado, cumple con las características principales para representar la situación en estudio a partir de lo discutido en la sección 4.4, ya que tanto el tanque como el sistema de recarga superficial y lateral proveen de distintas alternativas para su utilización a escala de laboratorio. Sin embargo, el modelo experimental puede perfeccionarse, por ejemplo, mediante la implementación de más bombas peristálticas que permitan controlar y homogenizar aún más la recarga superficial, evitando el uso de una tubería para distribuir el caudal y abasteciendo de agua dulce por goteo directamente desde las mangueras, lo que reduciría el error asociado al aforamiento del caudal, dado que se conoce el flujo saliente directamente desde el control de la bomba tal como lo hicieron [Stoeckl & Houben \(2012\)](#). Otro punto que puede ser mejorado concierne el uso de algún sistema complementario de recarga de agua salada en la película de agua que queda atrapada entre las barreras laterales y el talud de la matriz de suelo, para evitar la dilución del trazador que se utiliza y así conocer fidedignamente la posición del inicio de la interfaz en los bordes.

Por otro lado, también se propone generar otro estanque con características similares al empleado, pero con un ancho mayor para poder trabajar con granulometrías más finas y recargas mayores que reproduzcan distintos tipos de acuíferos e igualmente cumplir con las condiciones físicas que permiten validar las soluciones analíticas de manera precisa y reproducir fidedignamente los procesos involucrados, es decir, que se cumpla con una razón de aspecto mayor a 1:5 entre el ancho de la isla y la profundidad máxima de la interfaz.

6.2 Análisis de imágenes

La detección de la interfaz de densidad en régimen permanente y de la posición de la profundidad máxima en el tiempo, se consiguió mediante el análisis de imágenes. La metodología utilizada fue adecuada y logró identificar de forma precisa la frontera entre el agua de mar y el agua dulce teñida con Blue Brilliant en el dominio, con la excepción de los bordes, donde la dilución del trazador en la película de agua en los costados desvirtuó los resultados obtenidos sobreestimando la profundidad de la interfaz en esa zona.

Un factor relevante del análisis fue la iluminación del experimento. En un principio, se montó el experimento directamente con la iluminación del laboratorio, y luego se trasladó el montaje a una cámara oscura, adoptando también una fuente de luz encima del experimento, justo entre la cámara y el montaje. Esta variación generó que el filtro de intensidades de luz para cada experiencia fuese distinto. Por ello, se sugiere implementar el estudio con un solo tipo de iluminación, analizando si es más conveniente que la fuente de luz se encuentre en la parte delantera, trasera o por arriba como fue el caso de este estudio.

Por otro lado, las fluctuaciones de las curvas obtenidas para la interfaz de densidad en régimen estacionario para las distintas experiencias se deben principalmente a la refracción de luz dado por el desgaste del acrílico del tanque y a la notoria irregularidad de las partículas de suelo de las granulometrías utilizadas. Para trabajos futuros se propone la utilización de partículas de forma más uniformes, como por ejemplo, esferas de vidrio transparentes, que posean índice de refracción igual al agua, lo que permitirían evitar este problema y a la vez estudiar fenómenos de concentración dentro del acuífero en formación, como el espesor a escala de laboratorio de la interfaz de densidad, dado que en este trabajo se asumió abrupta.

6.3 Modelo numérico

Otro de los objetivos de este trabajo se vincula con la construcción de un modelo numérico que permita reproducir el fenómeno físico en estudio. Para ello se utilizó el paquete computacional COMSOL, poderosa herramienta capaz de resolver problemas multifísicos mediante la utilización de elementos finitos. A pesar de esto, el modelo construido no fue capaz de reproducir todas las situaciones simuladas y montadas experimentalmente con precisión. Las experiencias de granulometría gruesa lograron un ajuste aceptable, mientras el caso de la arena más fina, donde la interfaz se profundiza mayormente, se sobrestimó la profundidad en los costados como en el centro para los casos de recargas de $R = 1.38[m/d]$ y $R = 1.85[m/d]$. La velocidad del flujo del agua dulce dentro de la matriz de suelo es menor para una granulometría más fina, lo que sumado a posibles problemas en la condición de borde generaron la sobreestimación antes mencionada.

El módulo de "Ley de Darcy para dos fases" trabaja mediante la definición de presiones en las condiciones de borde, para poder resolver las ecuaciones de flujo y transporte para

dos fluidos acoplados dentro del medio saturado y así ensamblar los cálculos a través de las densidades de los líquidos. Por esto, no logra reproducir fielmente la condición de borde de carga constante que físicamente existe en los costados debido a la presencia del nivel del mar, ya que los problemas ocurrieron en los casos en que el borde de la interfaz alcanzó los límites laterales del modelo, superando la zona de pendiente de playa, a pesar de que se reescribió la condición para plantearla en función de la presión.

Otra posible fuente de error se asocia al tamaño de la malla de elementos utilizada, ya que se refinó a la milésima de la escala de este modelo (cm) en el talud del modelo para evitar errores de convergencia o "fingers" de densidad mayor a la esperada en cierta zona.

6.4 Relevancia de K y R en la profundización de la interfaz

Mediante el modelo experimental y sus dimensiones se comprobó que las soluciones analíticas de Fetter (1972) y Vacher (1988) son capaces de reproducir la forma, de manera aproximada, y la profundidad de la interfaz, de manera más precisa, para una razón de aspecto límite de 1:5, entre el alcance del lente de agua dulce y el ancho de la isla recreada como ocurre en las experiencias 4 y 5. Lo anterior confirma lo planteado por Dose *et al.* (2014), quienes trabajaron con el montaje de la Figura 2.8 y lograron validar también la utilización de estas soluciones para el mismo rango encontrado. Un detalle importante es que las razones de aspecto alcanzadas y la recarga poseen una exageración vertical, en relación con lo que ocurre realmente en los acuíferos costeros de las islas del mundo, ya que si se ocupara un rango de recarga real, como se verifica en el caso de estudio expuesto en el capítulo 5, el alcance sería menor y la razón de aspecto mayor, y por ende, no se podría visualizar de buena manera el proceso de formación y estabilización de la interfaz, que es el objetivo principal de este estudio. Por ello el montaje experimental sirve como punto de referencia para entender el proceso físico que ocurre en los acuíferos costeros de este tipo.

Respecto a la relevancia de la recarga superficial y de la granulometría, se comprobó mediante los resultados presentados que el parámetro que domina principalmente este proceso corresponde a la conductividad hidráulica, ya que genera cambios en el alcance máximo del lente de agua dulce mucho más importantes que los que produce la infiltración en el acuífero. Independiente de esto, la recarga igualmente afecta, pero en menor medida, la profundización del lente en el tiempo.

En este trabajo se adoptaron granulometrías restringidas en tamaño, sin gran variabilidad para obtener suelos lo más homogéneos posibles y para cumplir con los supuestos de las soluciones teóricas. Para futuras investigaciones se propone que se utilice una granulometría extendida, que permita reproducir el efecto de la heterogeneidad de los acuíferos y su influencia en la forma de la interfaz.

Bibliografía

- BAKKER, T. (1981). Nederlandse kustduinen-geohydrologie .
- BAYDON-GHYBEN, W. (1898). Nota in verband met de voorgenomen putboring nabij amsterdam. *Koninklijk Instituut Ingenieurs Tijdschrift 1888-1889* , 8–22.
- BEAR, J., CHENG, A. H.-D., SOREK, S., OUAZAR, D. & HERRERA, I. (1999). *Seawater intrusion in coastal aquifers: concepts, methods and practices*, vol. 14. Springer Science & Business Media.
- CLARÍA HOFER, M. (2010). Caracterización Hidrogeológica de la Isla de Pascua. Informe Técnico 213, Dirección General de Aguas. Ministerio de Obras Públicas. Gobierno de Chile.
- DOSE, E. J., STOECKL, L., HOUBEN, G. J., VACHER, H., VASSOLO, S., DIETRICH, J. & HIMMELSBACH, T. (2014). Experiments and modeling of freshwater lenses in layered aquifers: steady state interface geometry. *Journal of Hydrology* **509**, 621–630.
- ERROL L. MONTGOMERY, INC (2011). Condiciones Hidrogeológicas de la Isla de Pascua, Chile. Informe Técnico 229, División de Estudios y Planificación. Dirección General de Aguas. Ministerio de Obras Públicas. Gobierno de Chile.
- FETTER, C. (1972). Position of the saline water interface beneath oceanic islands. *Water Resources Research* **8**(5), 1307–1315.
- FOFONOFF, N. P. & MILLARD, R. C. (1983). Algorithms for computation of fundamental properties of seawater .
- GARCÍA-HUIDOBRO COVARRUBIAS, F. (2007). Modelación Numérica Preliminar del Acuífero Costero de la Quebrada Los Choros (IV región). Memoria para optar al Título de Geólogo. Tesis para optar al Grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, mención Recursos y Medio Ambiente Hídrico .
- GHASSEMI, F., JAKEMAN, A., JACOBSON, G. & HOWARD, K. (1996). Simulation of seawater intrusion with 2d and 3d models: Nauru island case study. *Hydrogeology Journal* **4**(3), 4–22.
- HENRY, H. R. (1959). Salt intrusion into fresh-water aquifers. *Journal of Geophysical Research* **64**(11), 1911–1919.

- HERRERA, C. & CUSTODIO, E. (2008). Conceptual hydrogeological model of volcanic Easter Island (Chile) after chemical and isotopic surveys. *Hydrogeology Journal* **16**(7), 1329–1348.
- HERZBERG, A. (1901). Die wasserversorgung einiger nordseebader. *J. Gasbeleuchtung Wasserversorgung* *44*, 815–819.
- HUBBERT, M. K. (1940). The theory of ground-water motion. *The Journal of Geology*, 785–944.
- LUSCZYNSKI, N. J. (1961). Head and flow of ground water of variable density. *Journal of Geophysical Research* **66**(12), 4247–4256.
- MILAD GARRIDO, C. (2010). Diagnóstico de los Recursos Hídricos Subterráneos de Isla de Pascua. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil .
- SHEPHERD, R. G. (1989). Correlations of permeability and grain size. *Ground Water* **27**(5), 633–638.
- STOECKL, L. & HOUBEN, G. (2012). Flow dynamics and age stratification of freshwater lenses: Experiments and modeling. *Journal of Hydrology* **458**, 9–15.
- STUYFZAND, P. J. (1993). Hydrochemistry and hydrology of the coastal dune area of the western netherlands .
- STUYFZAND, P. J. & BRUGGEMAN, G. (1994). Analytical approximations for fresh water lenses in coastal dunes. In: *Proc. 13th Salt Water Intrusion Meeting (SWIM), Cagliari, Italy*.
- TODD, D. K. & MAYS, L. W. (2005). *Groundwater hydrology edition*. Wiley, New Jersey.
- VACHER, H. (1988). Dupuit-Ghyben-Herzberg analysis of strip-island lenses. *Geological Society of America Bulletin* **100**(4), 580–591.
- VAN DER VEER, P. (1977). Analytical solution for steady interface flow in a coastal aquifer involving a phreatic surface with precipitation. *Journal of Hydrology* **34**(1), 1–11.
- WERNER, A. D., BAKKER, M., POST, V. E., VANDENBOHEDE, A., LU, C., ATAIE-ASHTIANI, B., SIMMONS, C. T. & BARRY, D. A. (2013). Seawater intrusion processes, investigation and management: recent advances and future challenges. *Advances in Water Resources* **51**, 3–26.

Anexos

Anexo A

Fotografías del montaje experimental

En la siguiente sección se presentan fotografías de los equipos utilizados en el montaje experimental.

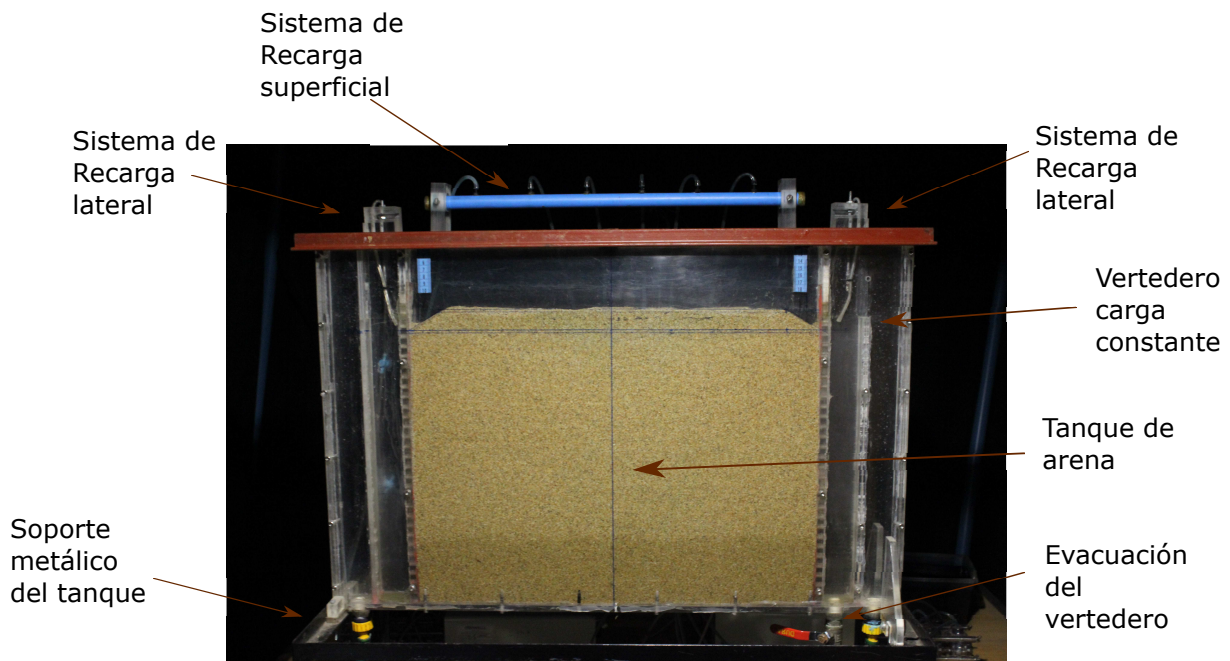
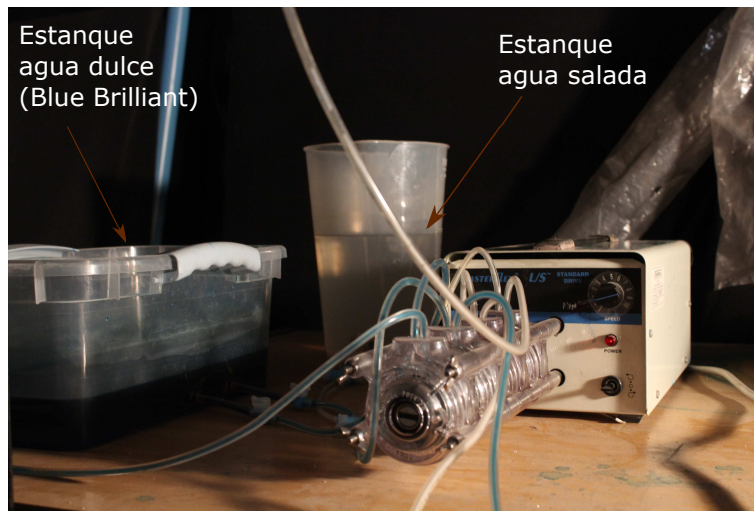
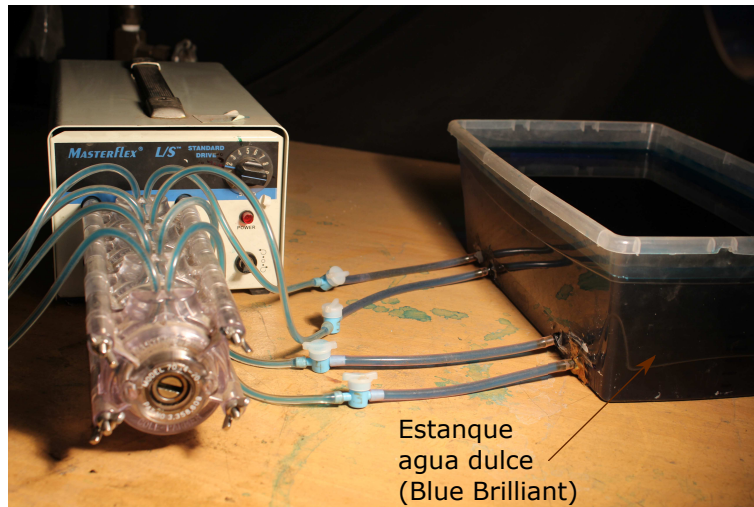


Figura A.1: Montaje experimental.



(a)



(b)

Figura A.2: (a) Bomba conectada a agua dulce y salada; (b) Bomba conectada sólo a agua dulce .

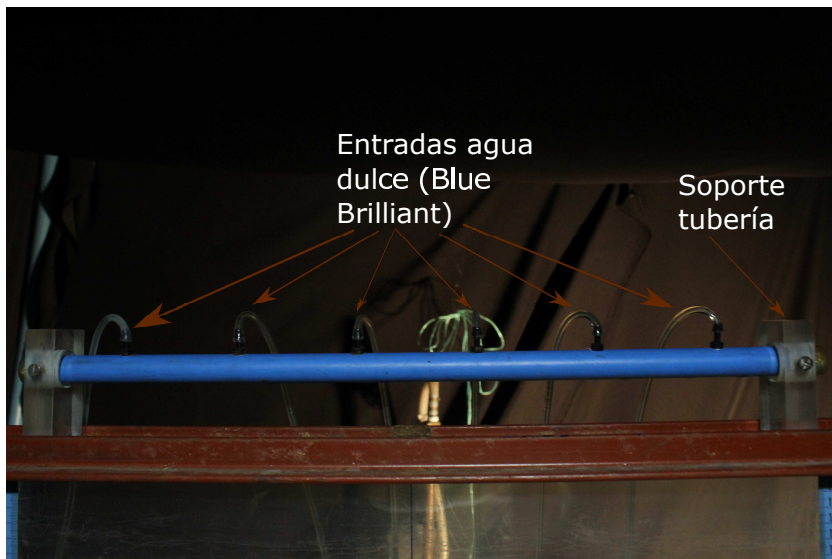


Figura A.3: Sistema de recarga superficial.

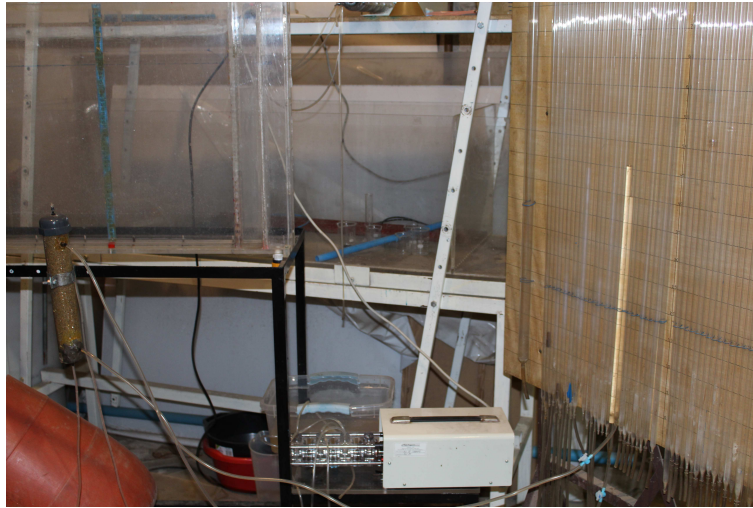
Anexo B

Medición de conductividad hidráulica

La conductividad hidráulica es uno de los parámetros relevantes de este trabajo ya que define el campo de flujo de un fluido a través de un medio permeable. En este caso, los medios permeables corresponden a las granulometrías detalladas en la sección [3.3.1](#). La conductividad fue medida a través de un permeámetro de carga constante, con el cual se midió la diferencia de carga hidráulica entre dos puntos gracias a la circulación de agua dulce provocada por un bomba peristáltica, de forma similar al experimento original de Darcy. En la Figura [B.0](#) se muestran imágenes del montaje utilizado.



(a)



(b)

Figura B.0: (a) Permeámetro de carga constante; (b) Equipo utilizado: permeámetro conectado a piezómetro, abastecido por el flujo de una bomba peristáltica.

La conductividad hidráulica K se despeja de la Ley de Darcy (Ecuación 3.1) discretizada:

$$K = \frac{Q\Delta L}{A\Delta H} \quad (\text{B.1})$$

donde Q es el caudal pasante, ΔL la distancia entre los puntos de muestreo de carga igual a 23 [cm], A el área transversal al flujo igual a 15.21 [cm^2] y ΔH la diferencia de carga hidráulica en los dos puntos de análisis.

La información obtenida de los ensayos realizados se detalla en la Tabla B.1.

Tabla B.1: Datos medición conductividad hidráulica

Granulometría	Q [cm^3/s]	ΔH [cm]	K [cm/s]
1	0,60	1,10	0,83
	0,82	1,45	0,85
	1,05	2,00	0,79
2	0,60	2,55	0,36
	0,82	3,45	0,36
	1,05	4,55	0,35

En la Tabla B.2 se presentan las conductividades hidráulicas estimadas a partir de la regresión lineal de los resultados de cada granulometría mostradas en la Figura B.1.

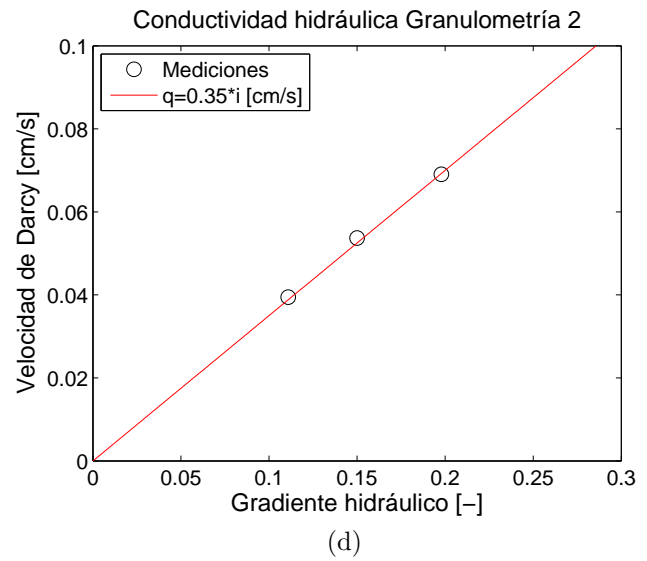
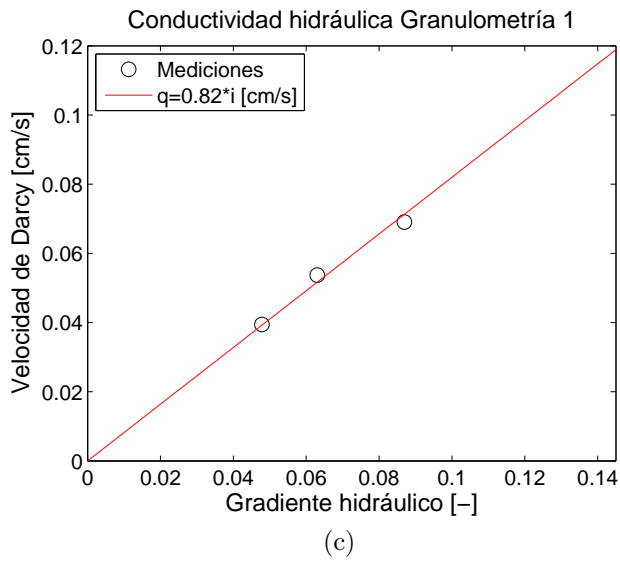


Figura B.1: Ajuste para obtención de K según granulometría.

Tabla B.2: Resumen K calculados.

Granulometría	$K [cm/s]$
1	0.82
2	0.35

La Figura B.2 muestra la relación entre el tamaño representativo de grano y la conductividad hidráulica planteada por Shepherd (1989).

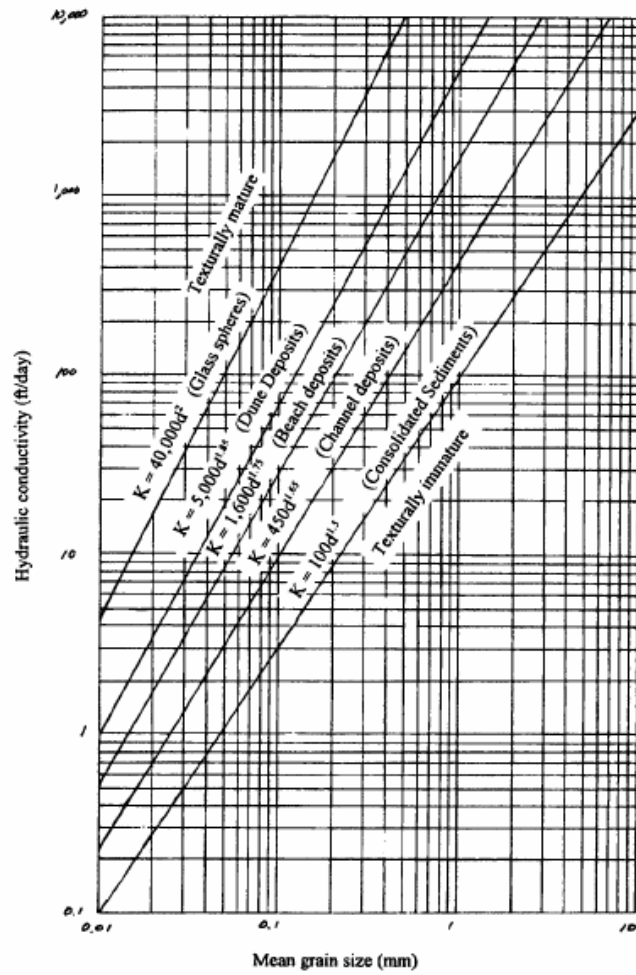
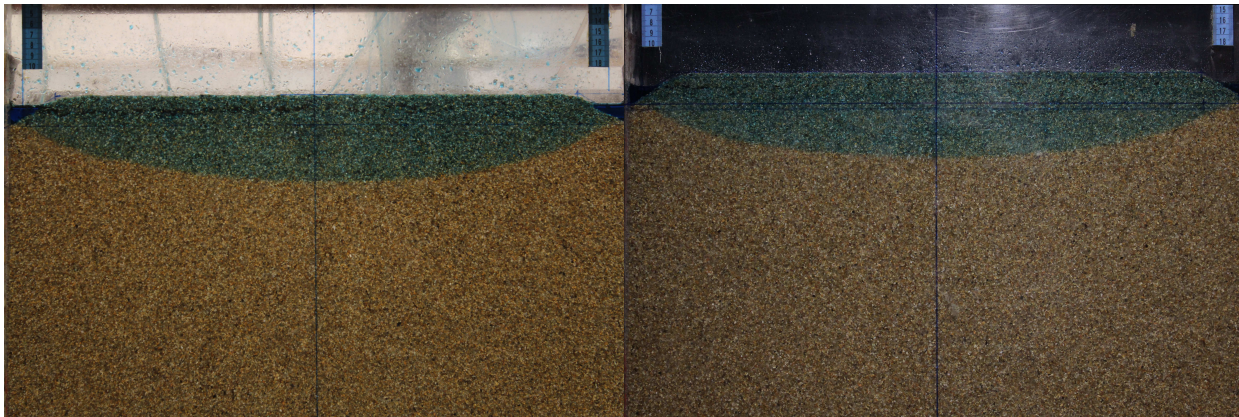


Figura B.2: Relación tamaño medio del grano y conductividad hidráulica (Shepherd,1989).

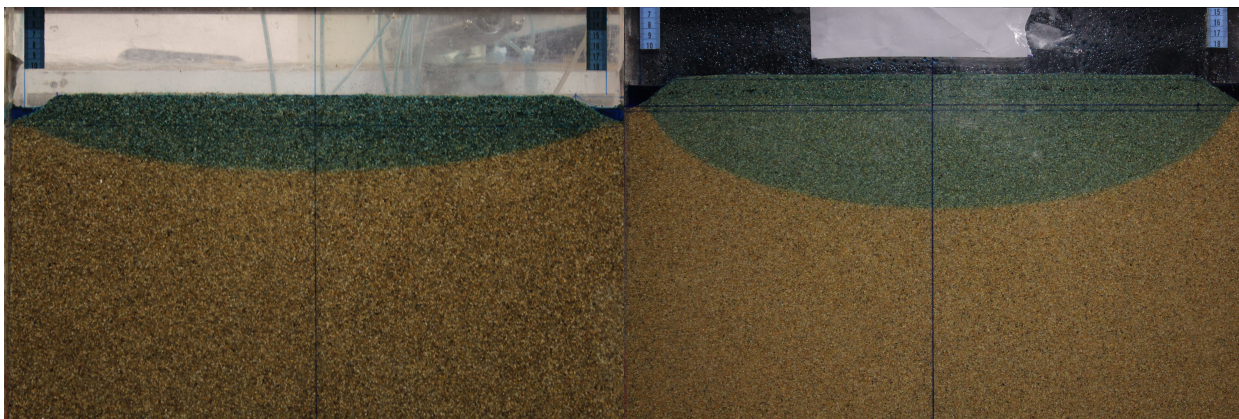
Anexo C

Resultados experimentales en régimen permanente



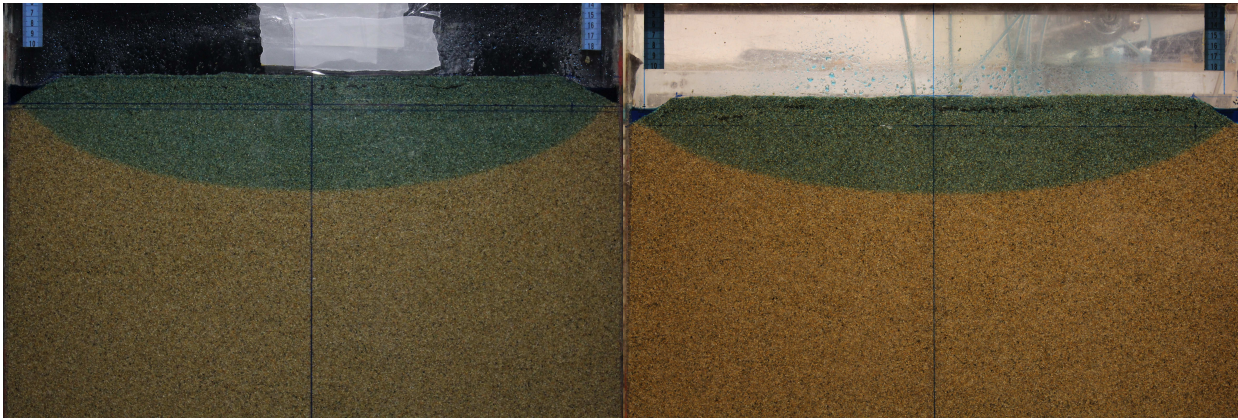
(a) K_1R_1

(b) K_1R_2



(c) K_1R_3

(d) K_2R_1



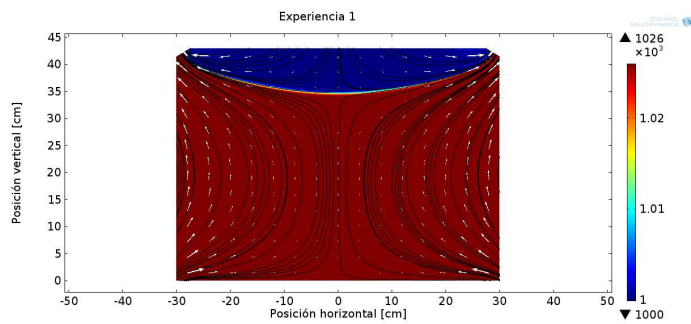
(e) K_2R_2

(f) K_2R_3

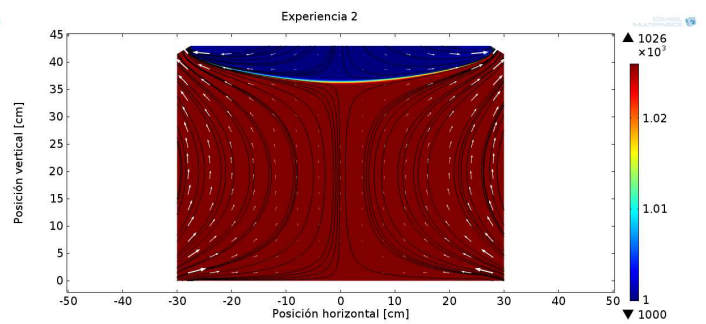
Figura C.0: (a) Estado permanente Experiencia 1; (b) Estado permanente Experiencia 2; (c) Estado permanente Experiencia 3; (d) Estado permanente Experiencia 4; (e) Estado permanente Experiencia 5; (f) Estado permanente Experiencia 6.

Anexo D

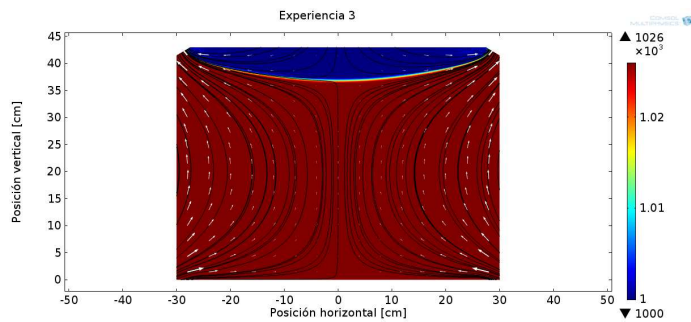
Resultados modelo numérico en régimen permanente



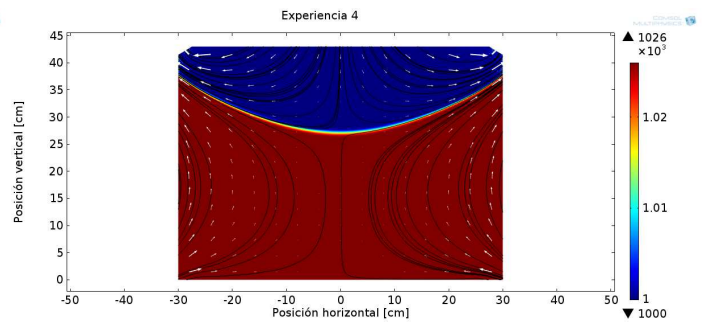
(a) K_1R_1



(b) K_1R_2



(c) K_1R_3



(d) K_2R_1

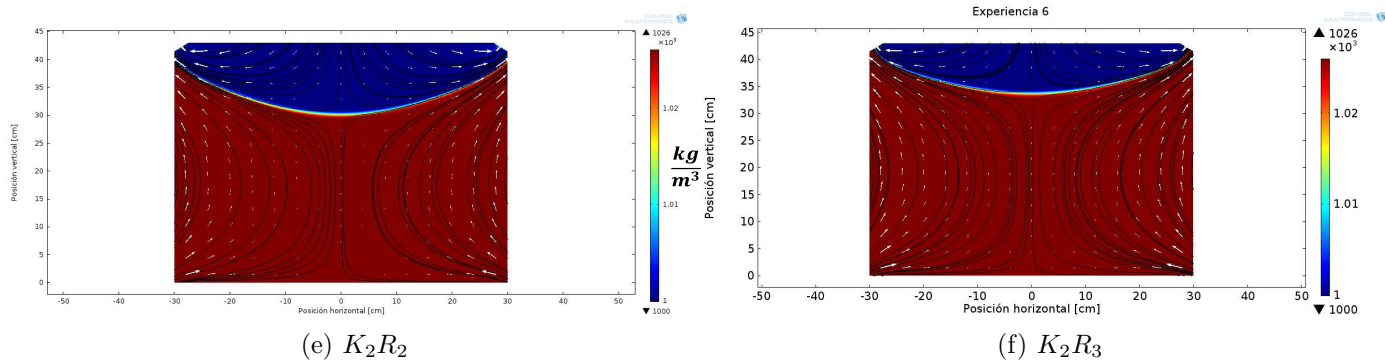


Figura D.0: (a) Estado permanente Experiencia 1; (b) Estado permanente Experiencia 2; (c) Estado permanente Experiencia 3; (d) Estado permanente Experiencia 4; (e) Estado permanente Experiencia 5; (f) Estado permanente Experiencia 6.

Anexo E

Datos de precipitaciones en Rapa Nui, Chile

En la Tabla [E.1](#) se muestra la precipitación media anual en la Estación Mataveri de la Dirección Meteorológica de Chile para el período 1983 - 2015.

Tabla E.1: Precipitación media anual en Rapa Nui periodo 1983 - 2015.

Año	Pp media anual [mm]	Año	Pp media anual [mm]
1983	1510	2000	1614
1984	1616	2001	966
1985	1079	2002	1134
1986	913	2003	1231
1987	1116	2004	1132
1988	883	2005	919
1989	1217	2006	1421
1990	1270	2007	1653
1991	1301	2008	1037
1992	1106	2009	1686
1993	1927	2010	797
1994	1265	2011	667
1995	1255	2012	960
1996	1047	2013	1109
1997	1324	2014	996
1998	966	2015	978
1999	1031		

Anexo F

Análisis adimensional del tiempo característico de recarga en islas

A partir de la ecuación determinada por [Stuyfzand & Bruggeman \(1994\)](#), se puede definir el tiempo característico de la formación de un lente de agua dulce \bar{T} como:

$$\bar{T} = \frac{n_e B}{\sqrt{4RK}} \quad (\text{F.1})$$

donde n_e es la porosidad efectiva del suelo, B el ancho de la sección en análisis de una isla, R la recarga generada por la precipitación que cae sobre la superficie y K la conductividad hidráulica representativa del medio poroso.

En base a esto, el efecto transiente de la formación de lentes puede ser representado adimensionalmente mediante:

$$\pi_1 = \frac{Z_t}{Z_\infty} \quad (\text{F.2})$$

$$\pi_2 = \frac{t}{\bar{T}} \quad (\text{F.3})$$

donde Z_t es la profundidad máxima del lente de agua en un tiempo t y Z_∞ la profundidad máxima del lente al alcanzar el régimen permanente. En términos simples, π_1 representa el nivel de profundidad que tiene un lente de agua dulce respecto a la máxima, mientras que π_2 la proporción del tiempo que tarda el sistema en llegar al régimen permanente.

Dado lo anterior, en la Figura [F.1](#) se presenta la relación entre ambos adimensionales en base a las observaciones obtenidas durante las experiencias de laboratorio.

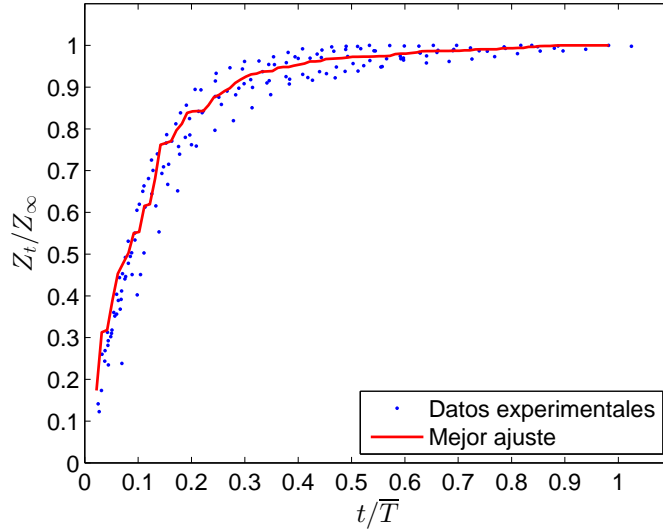


Figura F.1: Relación entre $\frac{Z_t}{Z_\infty}$ y $\frac{t}{T}$. Notar que el comportamiento tiende a una relación logarítmica.

Con la relación gráfica encontrada en la figura anterior, se puede estimar el tiempo que demoraría un sistema acuífero en recargarse completamente luego de quedar totalmente vacío o cuanto sería la profundidad de la interfaz de densidad para un evento de precipitaciones con un tiempo conocido.

Aplicando esto a Rapa Nui, donde se definieron dos secciones con permeabilidades distintas e infiltraciones mínima y máxima, se tiene que el tiempo que tardaría en alcanzar el régimen permanente nuevamente el acuífero, es decir, cuando $\pi_1 = \pi_2 = 1$, se presenta en la Tabla [F.1](#).

Tabla F.1: Tiempos de recarga para cada zona de permeabilidad según el nivel de infiltración.

Tiempo de recarga en zona de permeabilidad alta e infiltración mínima	78 años
Tiempo de recarga en zona de permeabilidad alta e infiltración máxima	56 años
Tiempo de recarga en zona de permeabilidad baja e infiltración mínima	497 años
Tiempo de recarga en zona de permeabilidad baja e infiltración máxima	357 años

Por lo tanto, en base a los resultados de la tabla anterior, se comprueba que la escala temporal de precipitaciones para la recarga y formación de lentes de agua en la isla es la escala anual, utilizada en este trabajo en el análisis del acuífero de Rapa Nui.