

01177

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAestrÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA



Desarrollo de un modelo experimental a nivel
laboratorio para estudios de contaminación y
remediación del subsuelo

Tesis que para obtener el grado de Posgrado

Maestro en Ingeniería Ambiental

Presenta:

Emilio Gómez Álvarez Icaza

Directora de tesis: Dra. Susana Saval Bohórquez

México D. F. 2005

m. 347202



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

VOTOS APROBATORIOS

DR. WILFRIDO RIVERA GÓMEZ FRANCO

Coordinador del Programa de Posgrado

en Ingeniería, U N A M

Presente

Por este medio comunico a usted que he leído la tesis titulada: "DESARROLLO DE UN MODELO EXPERIMENTAL A NIVEL LABORATORIO, PARA ESTUDIOS DE CONTAMINACIÓN Y REMEDIACIÓN DEL SUBSUELO" para obtener el grado de MAESTRO EN INGENIERIA en el campo del conocimiento INGENIERIA AMBIENTAL, que presenta el alumno EMILIO GÓMEZ ALVAREZ ICAZA.

Al mismo tiempo me permito informarle mi decisión de otorgar o no el voto aprobatorio.

JURADO		VOTO APROBATORIO	FIRMA	FECHA
PRESIDENTE	DRA. FRIDA LEÓN RODRÍGUEZ	(SI <input checked="" type="checkbox"/> (NO) <input type="checkbox"/>	<i>Frida León</i>	26 Junio 2005
VOCAL	DRA. SUSANA SAVAL BOHÓRQUEZ	(SI <input checked="" type="checkbox"/> (NO) <input type="checkbox"/>	<i>Susana Saval</i>	27 Jun 2005
SECRETARIO	DRA. ANNE HANSEN HANSEN	(SI <input checked="" type="checkbox"/> (NO) <input type="checkbox"/>	<i>Anne Hansen</i>	10 Jul 2005
SUPLENTE	DRA. ANA ELISA SILVA MARTÍNEZ	(SI <input type="checkbox"/> (NO) <input checked="" type="checkbox"/>	<i>Ana Elisa Silva</i>	1 Jul 2005
SUPLENTE	DR. ROLANDO SALVADOR GARCÍA GÓMEZ	(SI <input type="checkbox"/> (NO) <input checked="" type="checkbox"/>	<i>Rolando Salvador</i>	1 Agosto 2005

BJS*jac.

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: EMILIO GÓMEZ ALVAREZ ICAZA

FECHA: 26/08-05

FIRMA: [Firma]

Agradecimientos

Antes que nada quiero darle gracias a Dios por estar presente en cada momento de mi vida, por ser la fuerza superior que nos impulsa a luchar día a día.

A mis Padres, por su apoyo, amor y cariño incondicional, por que sin ellos no sería la persona que soy hoy, y que a pesar de las dificultades que se han presentado, nos hemos mantenidos unidos.

A mis hermanas, Luzma y Mariana, por estar conmigo apoyándome en todas las decisiones de vida.

A Sandra por su confianza, amor y cariño, gracias por estar siempre.

A mis Tocayos gracias por su amistad y por entregarme una parte de su vida y su corazón, que me ayudan a ser mejor persona día con día, en especial a Enrique y Rubén por su paciencia y por ser un ejemplo de lucha y superación para mí, gracias en verdad, se los agradezco, con el corazón.

Al Concejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por el apoyo brindado para poder realizar los estudios de Maestría, así como también a la Dirección de Estudios de Posgrado (DGEP) de la Universidad Nacional Autónoma de México por la ayuda prestada para cumplir con los objetivos del Programa de Maestría en Ingeniería.

Al Instituto de Ingeniería y a todos sus miembros tanto administrativos, como académicos, a los compañeros del grupo de caracterización y bioremediación de suelos y acuíferos, muchas gracias por su amistad, cariño y apoyo, en verdad encontré en ustedes a seres humanos maravillosos

A la Dra. Susana Saval Bohorquez, por su apoyo, confianza y amistad, por su calidad humana, su guía y su ejemplo, gracias Doctora por todas y cada una de sus palabras y consejos, por toda la ayuda para dirigir este trabajo de tesis, en verdad muchas gracias, que Dios la bendiga.

A mi comité tutorial, a la Dra. Frida León Rodríguez y a la Dra. Anne Hansen Hansen, por sus aportaciones y observaciones a este trabajo, por que sin ello no se hubiera podido lograr los objetivitos planteados.

Quiero agradecer a los miembros de mi Jurado, por el apoyo e impulso brindado, por su tiempo y entrega en conducir mi espíritu y por sus comentarios y sabias sugerencias.

Agradezco a todas y cada una de las personas que me apoyaron, a lo largo de mí caminar por el Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería. Se que los nombres son muchos y las palabras escasas y no terminaría de nombrarlos en esta breve página.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
1 MARCO TEÓRICO.....	3
1.1. ESTADO DEL ARTE.....	3
1.2. JUSTIFICACIÓN.....	5
1.3. OBJETIVO GENERAL.....	6
1.3.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	6
1.4. ALCANCES.....	6
1.5. HIPÓTESIS.....	6
2. CONCEPTUALIZACIÓN DEL MODELO EXPERIMENTAL.....	7
2.1. CRITERIOS DE DISEÑO.....	7
2.2. DEFINICIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL MODELO EXPERIMENTAL.....	8
2.3. DEFINICIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO PARA EL MODELO EXPERIMENTAL.....	9
2.4. DEFINICIÓN DE LA DIRECCIÓN DEL FLUJO HIDRÁULICO EN EL MODELO EXPERIMENTAL.....	9
2.5. ANÁLISIS DE LAS DIFERENTES FORMAS EN LAS QUE SE PUEDE INDUCIR EL FLUJO HIDRÁULICO A TRAVÉS DE LA GEOMETRÍA DEL MODELO EXPERIMENTAL.....	10
2.6. DEFINICIÓN DEL USO DE SOPORTE ESTRUCTURAL PARA EL MODELO EXPERIMENTAL.....	13
2.7. DEFINICIÓN DE LOS SISTEMAS DE MUESTREO PARA EL MODELO EXPERIMENTAL.....	15
2.8. RESUMEN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL MODELO EXPERIMENTAL DESARROLLADO.....	16
3. DISEÑO DEL MODELO EXPERIMENTAL.....	17
3.1. DISEÑO DE LA ESTRUCTURA FÍSICA DEL MODELO EXPERIMENTAL.....	17
3.2. DISEÑO DE LOS PANELES TRANSVERSALES.....	21
3.3. DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE SOPORTE.....	22
3.4. DISEÑO DEL SISTEMA DE DRENAJE Y MUESTREO EN EL FONDO.....	24
3.5. DISEÑO DEL SISTEMA DE INDUCCIÓN DE FLUJO HIDRÁULICO.....	27
3.6. DISEÑO DEL SISTEMA DE MUESTREO.....	29
3.6.1. POZOS DE MONITOREO.....	29

3.6.2.	DISPOSITIVOS PARA MUESTREO	30
3.6.3.	SISTEMA DE OBTENCIÓN DE MUESTRAS.....	34
3.7.	DIAGRAMA GENERAL DEL MODELO EXPERIMENTAL.....	35
4.	CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DEL MODELO EXPERIMENTAL	37
4.1.	SELECCIÓN DEL MATERIAL PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL MODELO EXPERIMENTAL....	37
4.2.	CONSTRUCCIÓN DE LA ESTRUCTURA FÍSICA DEL MODELO EXPERIMENTAL	37
4.3.	PANELES TRANSVERSALES.....	42
4.4.	ESTRUCTURA DE SOPORTE.....	44
4.5.	ARMADO DEL MODELO EXPERIMENTAL.....	45
4.6.	SISTEMA DE DRENAJE Y MUESTREO EN EL FONDO	47
4.7.	INSTALACIÓN DEL SISTEMA DE INDUCCIÓN DE FLUJO HIDRÁULICO.....	51
4.8.	SISTEMA DE MUESTREO	52
4.8.1.	POZOS DE MONITOREO	52
4.8.2.	MUESTREADORES.....	54
4.8.3.	SISTEMA DE OBTENCIÓN DE MUESTRAS.....	56
5.	PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DEL MODELO EXPERIMENTAL.....	57
5.1.	ELECCIÓN DEL EMPAQUE.....	57
5.2.	PROCEDIMIENTO PAR EL EMPACADO DEL MODELO EXPERIMENTAL.....	58
5.3.	INSTALACIÓN DE LOS POZOS DE MONITOREO	59
5.3.1.	CONFORMACIÓN DE LA MALLA DE MUESTREO.....	59
5.3.2.	HINCADO DE LOS POZOS.....	60
5.4.	ACONDICIONAMIENTO DE MUESTREADORES.....	60
5.5.	PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE INDUCCIÓN DE FLUJO HIDRÁULICO....	61
5.6.	SELECCIÓN DEL TRAZADOR.....	62
5.7.	CURVA DE CALIBRACIÓN	62
5.8.	PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO DEL MODELO EXPERIMENTAL.....	64
5.9.	RESULTADOS DE LA PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO DEL MODELO EXPERIMENTAL	67
5.10.	ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO DEL MODELO EXPERIMENTAL	70
6	MANTENIMIENTO DEL MODELO EXPERIMENTAL.....	85

6.1. LIMPIEZA.....	85
6.2. DESINSTALACIÓN DE LOS MUESTREADORES.....	85
6.3. VACIADO DEL MATERIAL DE EMPAQUE.....	86
6.4. CAMBIO DE FILTROS DE NYLON	87
CONCLUSIONES.....	88
RECOMENDACIONES	90
ANEXO I: DETALLE DE LAS LECTURAS DE CONCENTRACIÓN DE NA ₂ CO ₃ EN LOS 30 PUNTOS DE MUESTREO DURANTE LA PRUEBA DEL FUNCIONAMIENTO DEL MODELO EXPERIMENTAL.....	91
ANEXO II: COSTO DE CONSTRUCCIÓN DEL MODELO EXPERIMENTAL	94
BIBLIOGRAFÍA.....	96

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Geometría para la conceptualización del modelo experimental en forma de caja rectangular (A: ancho)	8
Figura 2.2. Dirección del flujo predominante en el plano largo/ancho del modelo experimental propuesto	10
Figura 2.3. Secciones que conforman un modelo experimental en forma de caja rectangular con flujo horizontal.....	10
<u>Figura 2.4. Sistemas de inducción de flujo horizontal en modelos experimentales en forma de caja rectangular.....</u>	<u>12</u>
<u>Figura 2.5. Forma de promover el flujo en el modelo experimental</u>	<u>13</u>
<u>Figura 2.6. Soporte estructural propuesto para el modelo experimental.....</u>	<u>14</u>
<u>Figura 2.7. Soporte estructural con ruedas para mover el modelo experimental</u>	<u>14</u>
Figura 3.1. Vista tridimensional del diseño del modelo experimental	17
Figura 3.2. Altura máxima del modelo experimental en relación con las zonas de estudio	18
Figura 3.3. Vista tridimensional del diseño de la caja rectangular del modelo experimental	19
Figura 3.4. Vista superior de la estructura física del modelo experimental, con distancias de los paneles transversales, canales guías y vertedero (medidas en cm).....	20
Figura 3.5. Diagrama de las 5 caras que conforman la estructura física del modelo experimental (medidas en cm).....	21
Figura 3.6. Diseño de los paneles transversales	22
Figura 3.7. Diagrama de la estructura de soporte, mostrando la base del soporte (parte superior), el soporte superior complementario (parte inferior) y el soporte lateral (extremos inferiores derecho e izquierdo) (medidas en cm).....	23
Figura 3.8. Diagrama tridimensional del armado de la estructura de soporte: estructura de soporte lateral (superior), estructura física (centro), base del soporte con sistema de ruedas (inferior)	23
Figura 3.9. Detalle del armado de la estructura de soporte y de una de las ruedas de la base de soporte	23
Figura 3.10. Vista superior del modelo experimental mostrando ubicación de los barrenos en el fondo (medidas en cm)	24
Figura 3.11. A) Vista de la cara posterior de la estructura física del modelo experimental mostrando ubicación para la válvula principal de drenado, B) Conector de CPVC, C)	

Vista tridimensional del conector, D) Niple reductor y conector de inserción para manguera	25
Figura 3.12. A) Válvula principal de drenaje de ½ " (12.7 mm) de CPVC, B) Válvula de muestreo inserción para manguera, C) Manguera con recubrimiento de Viton® de ¼" diámetro interior, D) Esquema del armado de la manguera al conector y a la válvula de inserción por inserción	26
Figura 3.13. Vista superior de la sección de empaque mostrando la rejilla de retención del material de empaque	27
Figura 3.14. Diagrama del sistema de inducción de flujo hidráulico	28
Figura 3.15. Detalle de los pozos de monitoreo.....	29
Figura 3.16. Filtro de nylon para los pozos	30
Figura 3.17. Diagrama de un muestreador a tres niveles dentro del pozo de monitoreo.....	32
Figura 3.18. Detalle del diseño del muestreador multinivel.....	33
Figura 3.19. Bomba programable de 24 canales.....	34
Figura 3.20. Esquema de la red de muestreo	35
Figura 3.21. Diagrama del modelo experimental	36
Figura 4.1. placas de acrílico de 2.2 x 1.2 m	38
Figura 4.2. Corte de la placa de acrílico en las diferentes secciones.....	38
Figura 4.3. Ranurado en una de las placas laterales de la caja de acrílico.....	39
Figura 4.4. Colocación de los canales guías para los paneles transversales.....	39
Figura 4.5. Vista de perfil de uno de los canales guías mostrando la tolerancia de 2 cm para el posterior ensamblado de la base	39
Figura 4.6. Colocación del vertedero en una de las caras laterales	40
Figura 4.7. Colocación de la cara frontal en una de las caras laterales.....	40
Figura 4.8. Colocación de la cara posterior en una de las caras laterales.....	40
Figura 4.9. Monómero, copolímero y catalizador	41
Figura 4.10. Se agrega el monómero al copolímero para iniciar la reacción.....	41
Figura 4.11. se agregan unas gotas del catalizador, para regular la reacción.....	41
Figura 4.12. Después de 2 minutos de reacción se tiene la resina acrílica sólida.....	41
Figura 4.13. Vista del taladro vertical realizando los barrenos en los paneles transversales.....	42
Figura 4.14. Cortadora manual utilizada para la elaboración de las manijas de soporte ...	43
Figura 4.15. Panel transversal terminado.....	43
Figura 4.16. Bolsa filtrante de nylon para panel transversal	43
Figura 4.17. Base de soporte	44
Figura 4.18. Estructura de soporte lateral y refuerzo superior.....	44

Figura 4.19. Modelo experimental mostrando la estructura física y la estructura de soporte ya armados.....	45
Figura 4.20. Vista posterior del modelo experimental	46
Figura 4.21. Acercamiento de los tornillos de fijación y de la rueda móvil trasera giratoria	46
Figura 4.22. Acercamiento de los tornillos de fijación y la rueda delantera fija.....	47
Figura 4.23. Acercamiento del taladro cortador mostrando la adaptación de corte	47
Figura 4.24. Distribución de las perforaciones en la base	48
Figura 4.25. Conector de PVC, reductor y conexión de inserción para manguera	48
Figura 4.26. Detalle del conector mostrando empaque de nitrilo en la base del modelo (vista desde el interior)	49
Figura 4.27. Manguera de Viton® de ¼ " instalada en uno de los conectores en la base del modelo experimental (vista exterior).....	49
Figura 4.28. Válvula de drenado y muestreo instalada en la base del modelo experimental	49
Figura 4.29. Válvula principal de drenado instalada en la parte inferior de la cara posterior del modelo experimental.....	50
Figura 4.30. Rejilla de acero inoxidable de Malla 100.....	50
Figura 4.31. Tinaco de 450 L de capacidad.....	51
Figura 4.32. Instalación de la válvula con flotador	51
Figura 4.33. Válvula reguladora de flujo	51
Figura 4.34. Vista superior de la sección de inundación de salida mostrando vertedero....	51
Figura 4.35. Tubo de 38 mm de diámetro interno y 3 mm de espesor de pared	52
Figura 4.36. Perforación de los orificios de 5mm	52
Figura 4.37. Tapones de punta	53
Figura 4.38. Acercamiento de un pozo de monitoreo terminado	53
Figura 4.39. Filtro de nylon instalado en un pozo de monitoreo	54
Figura 4.40. Sujetador de correa para fijar el filtro al pozo de monitoreo	54
Figura 4.41. Anillos guías.....	55
Figura 4.42. Tapa superior del muestreador.....	55
Figura 4.43. Sujetador metálico con tornillo de fijación	55
Figura 4.44. Instalación de los anillos guía en el soporte	55
Figura 4.45. Muestreador colocado dentro del pozo de monitoreo	55
Figura 4.46. Control central.....	56
Figura 4.47. Panel de conexión de energía, Interruptor principal	56

Figura 4.48. Tubo flexible para recolección de muestras ya conectado al cartucho de bombeo.....	56
Figura 4.49. Cartucho completo instalado en el soporte central de 8 rodillos.....	56
Figura 5.1. Arena sílice fina empleada como material de empaque.....	57
Figura 5.2. Conformación de la malla de muestreo (arriba) rectangular, (abajo) en diagonal.....	59
Figura 5.3. Instalación de los pozos de monitoreo antes de rellenar la zona no saturada... 60	
Figura 5.4. Instalación de los muestreadores en los pozos de monitoreo	61
Figura 5.5. Conexión de los tubos flexibles a la bomba de cabezales múltiples	61
Figura 5.6. Conductímetro portátil para la detección de sales inorgánicas	63
Figura 5.7. Curva de calibración concentración de cloruro de sodio (g/l) vs. conductividad eléctrica (μS)	64
Figura 5.8. Alimentación de la solución de NaCl en la sección de inundación de entrada 65	
Figura 5.9. Identificación de los pozos de monitoreo	65
Figura 5.10. Etiquetado de los tubos flexibles	66
Figura 5.11. Sistema de muestro en operación	66
Figura 5.12. Vista en planta de los pozos de monitoreo (arriba) Vista en planta de los puntos de drenado (en medio) y Vista lateral mostrando los tres niveles de los muestreadores y los puntos de drenado en el fondo.....	68
Figura 5.13. Comportamiento de la concentración de NaCl (g/l) vs tiempo de operación (h) en cada pozo a 45 cm a partir del fondo.....	70
Figura 5.14. Comportamiento de la concentración de NaCl (g/l) vs tiempo de operación (h) en cada pozo a 30 cm a partir del fondo.....	71
Figura 5.15. Comportamiento de la concentración de NaCl (g/l) vs tiempo de operación (h) en cada pozo a 15 cm a partir del fondo.....	71
Figura 5.16. Comportamiento de la concentración de NaCl (g/l) vs tiempo de operación (h) en cada punto de drenado en el fondo del modelo experimental.....	72
Figura 5.17. Mapas de contorno y superficie obtenidos durante la prueba de funcionamiento del modelo experimental utilizando NaCl como trazador	73
Figura 5.18. Identificación de zonas muertas en el pozo de monitoreo 2	84

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Dimensiones y proporciones de los modelos experimentales en forma de caja reportados en la literatura.	8
Tabla 2.2. Zonas de estudio en los modelos experimentales encontrados en la literatura ...	9
Tabla 2.3. Dirección de flujo predominante en los modelos experimentales consultados ...	9
Tabla 2.4. Formas de inducir el flujo hidráulico en diferentes modelos experimentales	11
Tabla 2.5. Comparativo de modelos experimentales indicando el tipo de soporte estructural utilizado	13
Tabla 2.6. Sistemas de muestreo utilizados en los modelos experimentales encontrados en la literatura	15
Tabla 2.7. Características generales del modelo experimental propuesto.	16
Tabla 5.1. Valores de conductividad hidráulica según textura	57
Tabla 5.2. Propiedades de la arena fina elegida como material de empaque	58
Tabla 5.3. Curva de calibración de la conductividad eléctrica (μS) contra la concentración de NaCl (g/l).....	63
Tabla 5.4. Ubicación de los Pozos de monitoreo y de los puntos de drenado.	67
Tabla 5.5. Concentración promedio de NaCl en los 8 pozos de monitoreo y en los 6 puntos de drenado en el fondo, durante la prueba de funcionamiento del modelo experimental.....	69

INTRODUCCIÓN

El problema de contaminación de suelo y agua subterránea con químicos de origen industrial, principalmente de la industria petrolera, es un tema que en los últimos años ha adquirido gran importancia en el ámbito mundial y en México.

Durante la década de los años sesenta en los Estados Unidos de Norteamérica, las aguas subterráneas eran consideradas como seguras y confiables para ser utilizadas como fuentes de aprovechamiento para consumo humano. Sin embargo, varios años después, con los avances de la química analítica, se descubrió la presencia de químicos ajenos a la composición natural del agua. De ahí surgió una gran preocupación por mantener o recuperar la calidad del agua subterránea. Fue entonces cuando se enfocaron los esfuerzos de investigación hacia el desarrollo de técnicas de saneamiento de suelos y acuíferos, considerando una gran variedad de opciones, procesos biológicos, físicos, químicos y térmicos, o una combinación de ellos.

La aplicación de cualquier técnica de saneamiento, en general, tiene inconvenientes, debido principalmente a los altos costos de operación y mantenimiento a largo plazo, así como la dificultad de la aplicación en sitios de diferentes características. Esta situación apoya la intención de buscar alternativas de tratamiento más económicas y acordes con las necesidades de países en vías de desarrollo.

En México, la remediación de suelos contaminados es actualmente un área de gran desarrollo e impulso para satisfacer los requerimientos de un marco regulatorio y para generar un mayor y mejor conocimiento. Lo relacionado con acuíferos contaminados es un tema aún incipiente, probablemente debido a la falta de instrumentos regulatorios más estrictos; o bien, a la falta de conocimientos sobre el funcionamiento de un sistema tan complejo como es el subsuelo.

Como una forma de promover el estudio del comportamiento del subsuelo, se planteó la realización del presente trabajo cuyo objetivo principal fue el diseño y construcción de un modelo experimental en forma de caja rectangular a escala de demostración.

Una vez construido el modelo experimental, los principales esfuerzos se enfocaron hacia una evaluación de su funcionamiento que está definido por su forma de operación, así como las medidas correctivas y de mantenimiento que se deberán poner en práctica al realizar experimentos, con la finalidad de asegurar la representatividad de los resultados que se obtengan.

Una característica importante del modelo experimental desarrollado es su utilización como herramienta para el estudio de problemas de contaminación del subsuelo con hidrocarburos.

Debido a que no existen antecedentes similares en esta área, se decidió presentar este trabajo en seis capítulos, con la finalidad de incluir desde la conceptualización del modelo experimental, hasta su diseño, construcción, puesta en marcha y mantenimiento.

En el primer capítulo se muestra el marco teórico, para dar un panorama general de los modelos experimentales. El capítulo segundo fundamenta la conceptualización del modelo experimental a partir de elementos de más relevancia encontrados en la literatura, para generar los criterios de diseño. El capítulo tercero muestra en forma esquemática y por medio de diagramas, los pasos que se siguieron para el diseño de cada uno de los componentes del modelo experimental. Este capítulo está íntimamente asociado a la construcción del modelo así como los materiales empleados, los cuales se especifican y se detallan en el capítulo cuarto.

Con el objetivo de tener una idea más clara de los aciertos en el diseño, así como de los posibles inconvenientes, se realizó una prueba del funcionamiento del modelo experimental por medio de una corrida experimental, la cual se especifica y se detalla en el capítulo quinto.

Finalmente en el capítulo sexto se establece el procedimiento para la limpieza y el mantenimiento del modelo experimental.

1 MARCO TEÓRICO

1.1. ESTADO DEL ARTE

La utilización de modelos experimentales como herramientas de estudio es cada vez más común, en el área de la ingeniería ambiental. En especial desde comienzos de los 80, varios investigadores dirigieron sus esfuerzos para entender el comportamiento de la contaminación del subsuelo, incluyendo el agua subterránea, con la finalidad de encontrar soluciones. En muchos de los casos la literatura refiere el uso de cajas de arena (*sand boxes*) y de columnas empacadas para la experimentación. En los artículos reportados sobre el tema, se habla únicamente del empleo de modelos experimentales y se presenta una descripción muy superficial de ellos pero nada sobre su diseño. Por ejemplo MacIntyre (1991) hizo una comparación de modelos para determinar coeficientes de absorción del naftaleno y demuestra que los modelos de caja (*box methods*) permiten llegar a mejores resultados que las columnas. Sin embargo, no da una descripción detallada sobre modelos experimentales utilizados; lo único que menciona es haber contado con un sistema de bombeo para promover el flujo de agua a través de la matriz de suelo.

En 1995, Gvirtzman y Gonen (1995) desarrollaron un estudio sobre la viabilidad de aplicación de una técnica de remediación *in situ*, basada en la inyección de vapor en pozos (*in-well vapor stripping*) para remover compuestos orgánicos volátiles presentes en el subsuelo y disueltos en el agua subterránea. Para tal efecto, estos autores construyeron un modelo experimental similar al empleado por MacIntyre (1991), pero que presenta un sistema de ventanas o salidas por donde el agua naturalmente sale del modelo, promoviendo así un flujo predominantemente horizontal. Una particularidad del modelo empleado es que tiene una altura tal que permite estudiar los efectos de difusión en la zona no saturada.

Algunas patentes en materia de remediación de suelos y acuíferos, publicadas a principios de la década de los 90 en los Estados Unidos de Norteamérica, fueron fundamentadas en los trabajos experimentales que se realizaron con modelos experimentales en forma de caja rectangular y que son hoy en día el sustento de muchas líneas de investigación, como lo señala el Doctor Steven Gorelick, del Departamento de Ciencias Ambientales y Geológicas de la Universidad de Stanford, y que ha trabajado en esta línea de investigación por más de 20 años. (Comunicación personal)

Un factor común que se ha encontrado en los trabajos publicados es que no se muestran los detalles de diseño, construcción, funcionamiento, operación y mantenimiento de los modelos experimentales empleados, los cuales son los elementos de mayor importancia, ya que de ellos depende la representatividad del estudio y del problema que se desea simular y resolver.

Muy probablemente esto se debe a la dificultad que representa el alcanzar resultados exitosos, y por ende mantener cierta confidencialidad.

Debido a la poca información existente en cuanto a diseño, el problema de dimensionar un modelo se vuelve complejo; sin embargo, MacIntyre (1991) propuso su modelo experimental en forma de caja rectangular con dimensiones de: 1.8 m de largo x 0.3 m de ancho y 0.3 m de altura. Posteriormente, Gvirtzman-Gorelick (1992) propusieron las dimensiones de 2.5 m de largo x 0.7 m de ancho x 1 m altura. Sin embargo, ninguno de ellos estableció una justificación real del por qué usaron esas dimensiones y no otras. Basándose en la idea principal del transporte de sustancias a través de un medio poroso, Beven (1979) encontró que la relación de dimensiones máximas para tener un flujo predominante en una dirección es de 3:1 garantizando flujos laminares similares a los que se tienen en los acuíferos donde esta relación puede llegar a ser 1:1. Los modelos experimentales presentados por MacIntyre (1991) y Gvirtzman-Gorelick (1992) respetan la conformación de Beven (1979), incluso; cabe mencionar que relaciones superiores a éstas, tales como 10:1, son factibles; sin embargo, se promueve un flujo pistón y turbulento difícil de predecir y de modelar (USEPA 1988).

Por otra parte, también es válido que las dimensiones recomendadas para el diseño de un modelo experimental estén a criterio del diseñador y en función del tamaño y disponibilidad de los materiales que se emplean para su construcción, así como del espacio disponible para hacer las investigaciones.

El funcionamiento y la forma de operar un modelo experimental deben ser lo más simple posible; se debe utilizar la mínima energía externa para promover el flujo de agua y, de acuerdo con las posibilidades económicas que se tengan para su elaboración, la utilización de sistemas de bombeo (MacIntyre 1991, Gvirtzman y Gorelick 1992), o de sistemas de presión hidrostática puede resolver dicha situación.

El modelo experimental presentado por MacIntyre (1991) fue construido en su totalidad en acero, mientras que el modelo experimental de Gvirtzman y Gorelick (1992) fue construido en acrílico y acero; ambos materiales presentan una adecuada resistencia a la carga y el acrílico una mayor resistencia a la corrosión.

Los modelos experimentales pueden adoptar muchas formas geométricas; sin embargo, para representar una sección del subsuelo por lo general se presentan en forma de cajas rectangulares (Gvirtzman y Gorelick 1992), simulando así un corte de sección del subsuelo en la naturaleza, como se proponen en los trabajos encontrados en el área de geología y de hidrología.

Los trabajos realizados por Gvirtzman y Gorelick (1992) fueron significativos en el desarrollo de técnicas de remediación de acuíferos y de estudios geohidrológicos de transporte, el diseño fue asesorado por el Dr. Silliman, de la Universidad de Notre Dame, quien realizó posteriormente trabajos experimentales justificando el transporte de trazadores conservativos en medios porosos heterogéneos, además participó en el diseño de redes de muestreo de piezómetros, para la estimación de variogramas de gradientes hidráulicos (Conwell and Silliman 1998).

Barth et al. (2001) publicaron un estudio relacionado con un modelo de predicción de flujo y transporte en dos dimensiones para medios heterogéneos porosos, utilizando un dispositivo experimental con dimensiones de 10 m de largo por 0.06 m de ancho y 1.2 m de altura. Más tarde Levy y Berkowitz (2003) publicaron un trabajo similar utilizando un modelo experimental en forma de caja rectangular con dimensiones de 2.13 m de largo por 0.1 m de ancho y 0.65 m de altura. Lo anterior apoya la conveniencia de contar con modelos experimentales en forma de caja rectangular.

Las características más importantes que debe tener un modelo experimental son:

- Que sus dimensiones sean apropiadas para poder realizar experimentos.
- Que su funcionamiento sea sencillo.
- Que sea fácil de operar.
- Que esté construido de un material resistente a la carga.
- Que el material tenga resistencia química para que las sustancias que se van a usar no afecten su integridad.
- Que sea de bajo costo.
- Que sea fácil de construir.
- Que sus partes sean reemplazables.
- Que su mantenimiento sea fácil de realizar.
- Que su geometría sea simple, para permitir modificaciones futuras en caso necesario.

1.2. JUSTIFICACIÓN

Debido a la dificultad de realizar pruebas experimentales en campo, es necesario contar con un modelo experimental a nivel de demostración para simular el comportamiento del subsuelo. Dicho modelo experimental debe permitir obtener resultados representativos de los problemas de contaminación en la zona saturada debidos principalmente a derrames de combustibles destilados, que son los más comunes en México

1.3. OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un modelo experimental en forma de caja rectangular a escala de demostración, que permita representar el comportamiento del subsuelo para realizar estudios de contaminación y remediación.

1.3.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar el modelo experimental en forma de caja rectangular para trabajar en el laboratorio.
- Construir el modelo experimental a partir del diseño elaborado.
- Poner en marcha el modelo experimental, para verificar su funcionamiento.

1.4. ALCANCES

- Definir los criterios de diseño del modelo experimental, a partir de la conceptualización del problema de contaminación de acuíferos, debido a derrames o fugas de combustibles destilados.
- Definir las bases de funcionamiento del modelo experimental.
- Confirmar que el modelo experimental arroje valores representativos y reproducibles, para que éste se pueda utilizar en estudios posteriores, ajenos a este trabajo, enfocados a estudios de contaminación y aplicación de técnicas de remediación en acuíferos contaminados.

1.5. HIPÓTESIS

- Es posible desarrollar y aplicar modelos experimentales a escala de demostración, que representen el comportamiento del subsuelo, teniendo la confianza de que los resultados observados ayudarán a comprender los fenómenos de contaminación y la aplicación de técnicas de remediación a gran escala.

2. CONCEPTUALIZACIÓN DEL MODELO EXPERIMENTAL

2.1. CRITERIOS DE DISEÑO

Para entender la importancia del diseño de un modelo experimental, es indispensable tener idea de lo que se quiere obtener y para ello es necesario definir ciertos criterios.

Un modelo experimental debe de ser:

- Duradero.
- Resistente a la carga física.
- Resistente a hidrocarburos.
- Fácil de construir.
- Fácil de operar.
- Fácil de transportar.
- Resistente a la corrosión.
- Fácil de limpiar.
- Fácil de empacar y desempacar.

A partir de lo anterior se plantearon los siguientes criterios de diseño para definir las características del modelo experimental:

- Tener una geometría y dimensiones adecuadas para representar el subsuelo sin dejar de lado la facilidad de operación y manejo.
- Permitir estudios considerando ambas zonas; saturada y no saturada.
- Permitir experimentación con todo tipo de material geológico.
- Permitir establecer una dirección de flujo predominante dentro de su geometría.
- Permitir diferentes formas para inducir el flujo a través de su geometría.
- Proporcionar un soporte estructural para permitir su manejabilidad.
- Proporcionar drenajes para facilitar su limpieza aún estando empacado.
- Contar con sistemas de filtración para evitar ingreso de partículas no deseables.
- Contar con un sistema de muestreo multiniveles y con una malla previamente definida para cada experimentación.

2.2. DEFINICIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL MODELO EXPERIMENTAL

De acuerdo con la literatura revisada, la geometría más empleada para la conceptualización de un modelo experimental para estudios del subsuelo es en forma de prisma rectangular, esto es en forma de caja. Aunque todos varían en su relación de largo, ancho y altura, se mantiene una constante notable, en la relación largo/ancho, que como se puede ver en la tabla 2.1 siempre es comúnmente 3:1. La relación de altura/ancho es cuando menos 1:1.

Tabla 2.1. Dimensiones y proporciones de los modelos experimentales en forma de caja reportados en la literatura

Autor(es), año	Dimensiones largo(m) x ancho (m) x altura (m)	Proporciones aproximadas
Macintyre et al, 1991	1.8. x 0.3 x 0.3	6:1:1
Gvirtzman y Gorelick, 1992	2.5 x 0.7 x 1	3:1:1.5
Gvirtzman y Gonen, 1995	2.5 x 0.7 x 1	3:1:1.5
Silliman et al., 1998	0.5 x 0.15 x 0.4	3:1:3
Barth et al., 2001.	10 x 0.06 x 1	100>1:20
Levy y Berkowitz, 2003	2.13 x 0.10 x 0.65	20:1:6
Ursino et al, 2001	0.75 x 0.05 x 0.4	15:1:8
Katz y Gvirtzman, 2000	2.5 x 0.7 x 1	3:1:1.5

De lo señalado anteriormente, se tomó la relación largo/ancho/altura de **3:1:1.5** para el diseño del modelo experimental (Gvirtzman y Gorelick, 1992; Gvirtzman y Gonen, 1995; Katz y Gvirtzman, 2000). En la figura 2.1 se observan las relaciones elegidas para la concepción del modelo experimental.

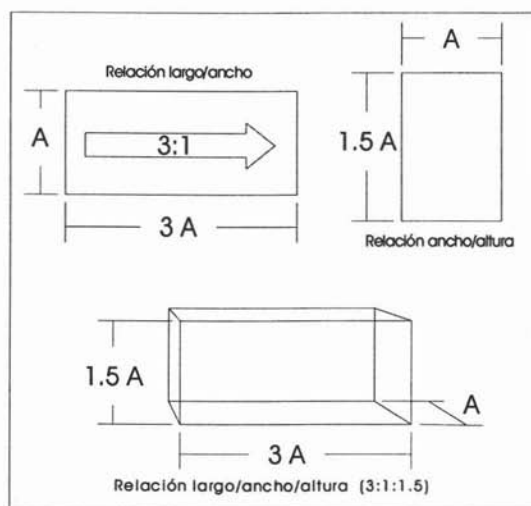


Figura 2.1. Geometría para la conceptualización del modelo experimental en forma de caja rectangular (A: ancho)

2.3. DEFINICIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO PARA EL MODELO EXPERIMENTAL

Los trabajos publicados en los que se han utilizado modelos experimentales, se enfocan casi exclusivamente al estudio de las condiciones de transporte en la zona saturada, simulando así el comportamiento del agua subterránea (Tabla 2.2), poco se ha estudiado la zona capilar que es la región de transición entre la zona saturada y la zona no saturada. El ejemplo más representativo es el trabajo de Gvirtzman y Gorelick, (1992), quienes estudiaron el comportamiento de la inyección de vapor en la zona saturada, esperando la remoción de compuestos orgánicos volátiles (VOC's) hacia la zona no saturada. De aquí nace la necesidad de generar un modelo experimental flexible, que permita estudios en cualquier zona: saturada, no saturada, capilar e incluso superficial.

Tabla 2.2. Zonas de estudio en los modelos experimentales encontrados en la literatura

Autor(es), año	Zona de estudio del subsuelo
MacIntyre et al, 1991	Zona saturada
Gvirtzman y Gorelick, 1992	Zona saturada y zona no saturada
Gvirtzman y Gonen, 1995	Zona saturada y zona no saturada
Silliman et al., 1998	Zona saturada
Katz y Gvirtzman, 2000	Zona saturada y zona no saturada
Barth et al., 2001.	Zona saturada
Ursino et al, 2001	Zona saturada
Levy y Berkowitz, 2003	Zona saturada

2.4. DEFINICIÓN DE LA DIRECCIÓN DEL FLUJO HIDRÁULICO EN EL MODELO EXPERIMENTAL

Una parte muy importante de la conceptualización de los modelos experimentales radica en cómo se consigue físicamente el flujo de agua en su interior, de tal forma que la conformación geométrica del modelo experimental, por sí misma puede promover el flujo de agua. En la mayoría de los trabajos consultados se tiene una constante en cuanto a este punto; la dirección de flujo predominante se presenta en una dirección y puede ser horizontal o vertical. En la tabla 2.3 se indica la dirección de flujo que varios autores utilizaron en sus modelos experimentales.

Tabla 2.3. Dirección de flujo predominante en los modelos experimentales consultados

Autor(es), año	Dirección de flujo predominante
MacIntyre et al, 1991	horizontal
Gvirtzman y Gorelick, 1992	horizontal
Gvirtzman y Gonen, 1995	horizontal
Silliman et al., 1998	horizontal
Katz y Gvirtzman, 2000	horizontal
Ursino et al, 2001	vertical
Barth et al., 2001.	horizontal
Levy y Berkowitz, 2003	horizontal

Con base en lo anterior, se decidió inducir un flujo horizontal, como se muestra en la figura 2.2.

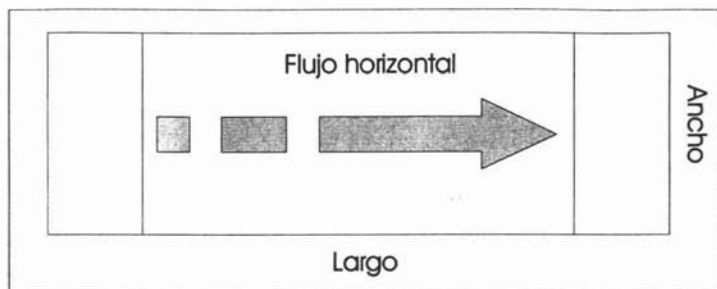


Figura 2.2. Dirección del flujo predominante en el plano largo/ancho del modelo experimental propuesto

2.5. ANÁLISIS DE LAS DIFERENTES FORMAS EN LAS QUE SE PUEDE INDUCIR EL FLUJO HIDRÁULICO A TRAVÉS DE LA GEOMETRÍA DEL MODELO EXPERIMENTAL

Todos los modelos experimentales en forma de caja rectangular con flujo horizontal cuentan con secciones o compartimientos independientes para el agua de alimentación, para el material de empaque, y para el agua de salida como se muestra en la figura 2.3.

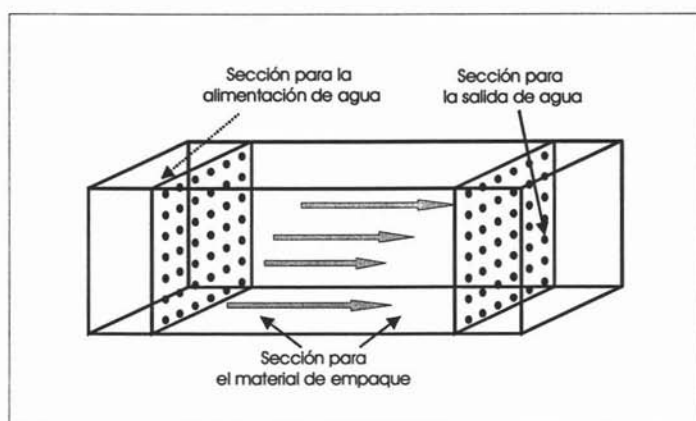


Figura 2.3. Secciones que conforman un modelo experimental en forma de caja rectangular con flujo horizontal

Cada sección esta dividida por paredes con orificios que permiten el paso del agua, pero que impiden el paso del material de empaque; de tal forma que, sin hablar todavía de cómo se induce el flujo hidráulico, se puede tener transferencia de masa de compuestos solubles y agua de la sección de alimentación a la sección de salida, pasando por la sección central que contiene el material de empaque. Por lo general la sección central es la de importancia para los estudios del subsuelo.

Para inducir el flujo hidráulico a través del modelo experimental se pueden tener diferentes opciones. En la tabla 2.4 se muestran diversas formas con las que se indujo el flujo hidráulico en los diferentes modelos experimentales encontrados.

Tabla 2.4. Formas de inducir el flujo hidráulico en diferentes modelos experimentales

Autor(es), año	Forma de inducir el flujo a través del modelo experimental
MacIntyre et al, 1991	Utiliza bombas tanto en la sección de alimentación como en la sección de salida
Gvirtzman y Gorelick, 1992	Utiliza bomba peristáltica en la sección de alimentación y un sistema de aberturas verticales en la sección de salida
Gvirtzman y Gonen, 1995	Utiliza bomba peristáltica en la sección de alimentación y un sistema de aberturas verticales en la sección de salida
Silliman et al., 1998	Utiliza bombas tanto en la sección de alimentación como en la sección de salida
Katz y Gvirtzman, 2000	Utiliza bomba peristáltica en la sección de alimentación y un sistema de aberturas verticales en la sección de salida
Ursino et al, 2001	Presión hidrostática e infiltración (este modelo tiene un flujo vertical descendente)
Barth et al., 2001.	Utiliza bombas tanto en la sección de alimentación como en la sección de salida
Levy y Berkowitz, 2003	Utiliza bombas tanto en la sección de alimentación como en la sección de salida

El uso de energía para promover el flujo hidráulico en estos tipos de modelos es significativo, debido a que la mayoría utiliza bombas eléctricas. Los modelos propuestos por MacIntyre (1991), Silliman (1998), Barth (2001) y Levy (2003) utilizan bombas peristálticas tanto en la entrada como en la salida del modelo; los modelos de Katz y Gvirtzman (2000) utilizan un sistema de bomba peristáltica a la entrada y un sistema de aberturas verticales en la sección de salida del modelo experimental, Estos sistemas de inducción de flujo hidráulico se muestran en la figura 2.4.

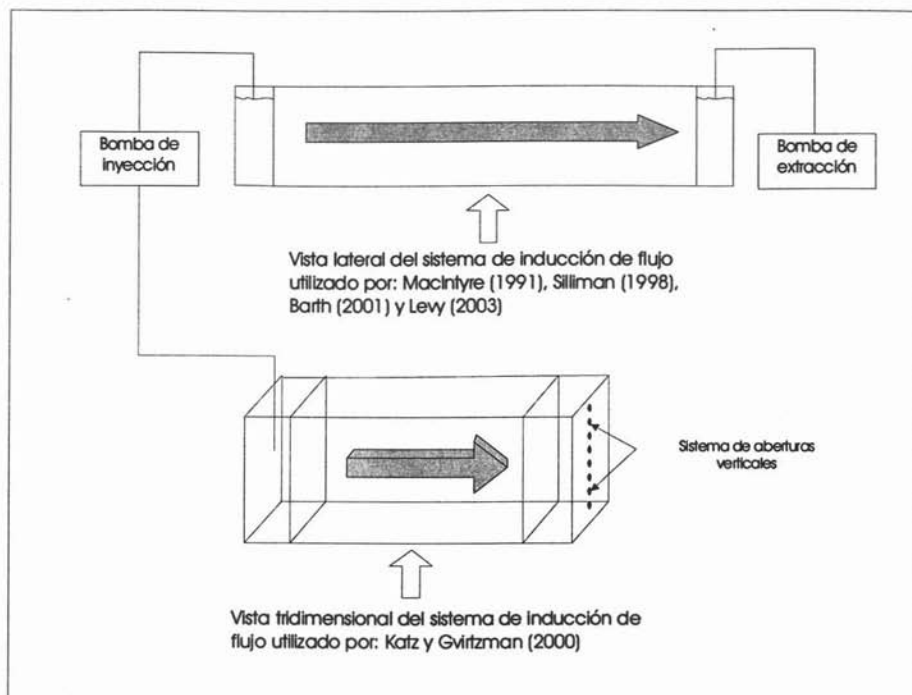


Figura 2.4. Sistemas de inducción de flujo horizontal en modelos experimentales en forma de caja rectangular

Para inducir el flujo hidráulico en el modelo experimental motivo del presente trabajo, se propuso la instalación de un tanque primario elevado para alimentación que tuviera la función de promover un flujo por acción de la presión hidrostática hacia la sección de alimentación, eliminando así el uso de una bomba.

Para la sección de salida se decidió la instalación de un vertedero que controlara el nivel del agua, definiendo de esta forma el umbral de la zona saturada y la zona no saturada y como complemento, la instalación de una válvula de salida en la parte inferior de la sección de salida como se ilustra en la figura 2.5.

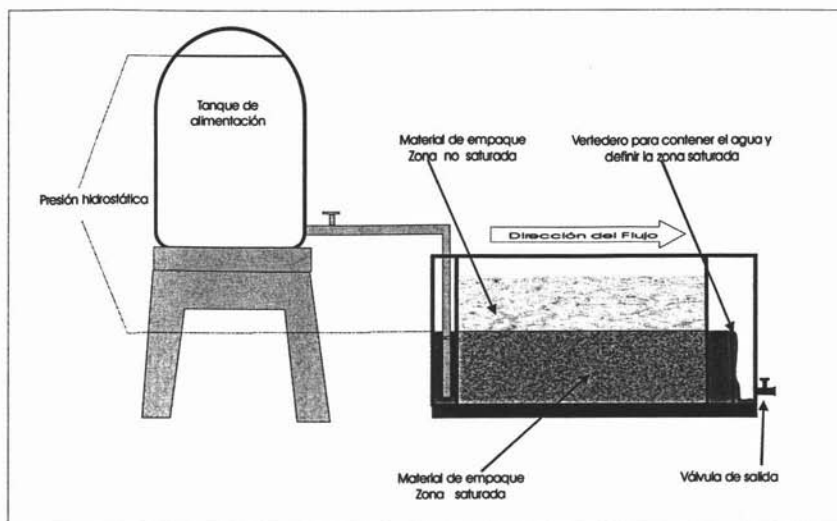


Figura 2.5. Forma de promover el flujo en el modelo experimental

2.6. DEFINICIÓN DEL USO DE SOPORTE ESTRUCTURAL PARA EL MODELO EXPERIMENTAL

Todos los modelos experimentales encontrados en la literatura tienen grandes diferencias en cuanto al uso de un soporte estructural; como se puede apreciar en la tabla 2.5. Cabe destacar que el soporte estructural es importante para asegurar la durabilidad del modelo experimental y está en función de las dimensiones del mismo y del tipo de material seleccionado para su construcción.

Tabla 2.5. Comparativo de modelos experimentales indicando el tipo de soporte estructural utilizado

Autor(es), año	Utiliza soporte estructural	Tipo de Material empleado
MacIntyre et al, 1991	No se define	
Gvitzman y Gorelick, 1992	No	
Gvitzman y Gonen, 1995	No	
Silliman et al., 1998	Si	Prensas de acero y madera
Katz y Gvitzman, 2000	No se define	
Ursino et al, 2001	Si	Laminas de vidrio y polietileno
Barth et al., 2001.	Si	concreto
Levy y Berkowitz, 2003	No se define	

Para el modelo experimental desarrollado se propuso la utilización de un soporte estructural para garantizar la durabilidad y el mejor desempeño del mismo; se consideró que para facilitar su construcción y ensamblado este soporte debía estar conformado por tres elementos: Una base donde recayera toda la carga

física del modelo, un soporte lateral que sostuviera la presión hidrostática hacia las paredes del mismo y un soporte superior complementario como apoyo a los soportes laterales (Figura 2.6).

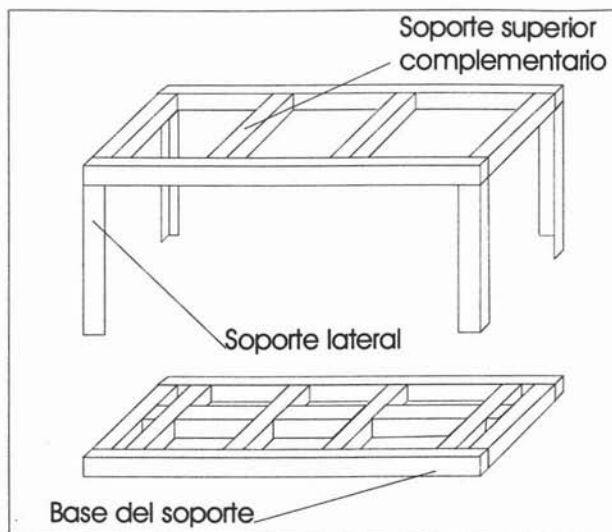


Figura 2.6. Soporte estructural propuesto para el modelo experimental

Una vez ideada la estructura de soporte para el modelo experimental, surgió la necesidad de contemplar elementos para su traslado y movilización dentro del laboratorio. Con el objetivo de facilitar su movimiento, se decidió añadirle ruedas en la base del soporte estructural (Figura 2.7).

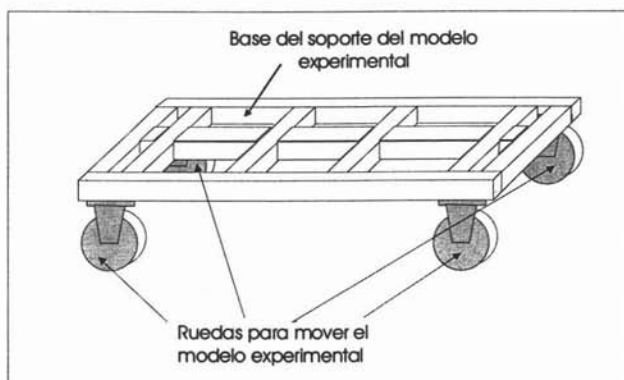


Figura 2.7. Soporte estructural con ruedas para mover el modelo experimental

2.7. DEFINICIÓN DE LOS SISTEMAS DE MUESTREO PARA EL MODELO EXPERIMENTAL

La investigación que se desarrolla en el ámbito de la contaminación y remediación del subsuelo se fundamenta en la información que se obtiene al recolectar muestras, tanto de suelo como de agua. En la mayoría de los modelos experimentales encontrados en la literatura, la obtención de muestras se enfoca principalmente a la obtención de muestras de agua (Gvirtzman & Gonen, 1995). En la tabla 2.6 se presenta esta información, en donde se detallan los diferentes sistemas de muestreo para modelos experimentales similares al propuesto.

Tabla 2.6. Sistemas de muestreo utilizados en los modelos experimentales encontrados en la literatura

Autor(es), año	Material de construcción de los pozos de monitoreo	Forma de muestreo	Particularidades
MacIntyre et al, 1991	Vidrio	Pozos de monitoreo y pipetas semiautomáticas	Red conformada por 43 pozos de monitoreo a un solo nivel
Gvirtzman y Gorelick, 1992	Acero inoxidable	Pozos de monitoreo, muestreadores a tres niveles y Jeringas para obtener las muestras	Red de 8 pozos de monitoreo y muestreadores a tres niveles con mangueras de Tygon®
Gvirtzman y Gonen, 1995	Acero inoxidable	Pozos de monitoreo, muestreadores a tres niveles y Jeringas para obtener las muestras	Red de 8 pozos de monitoreo y muestreadores a tres niveles con mangueras de Tygon®
Katz y Gvirtzman, 2000	Acero inoxidable	Pozos de monitoreo, muestreadores a tres niveles y Jeringas para obtener las muestras	Red de 8 pozos de monitoreo y muestreadores a tres niveles con mangueras de Tygon®
Barth et al., 2001.	Acero inoxidable y PVC	Pozos de monitoreo y electrodos de cobre	Red de 42 pozos de monitoreo y electrodos para determinar la conductividad eléctrica

El sistema de muestreo contemplado para el modelo experimental se conformó de tres elementos fundamentales:

- Pozos de monitoreo
- Muestreadores multi-niveles
- Sistema de bombeo para obtención de muestras

2.8. RESUMEN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL MODELO EXPERIMENTAL DESARROLLADO

En la tabla 2.7 se presentan a manera de resumen las características, en base a las cuales se conceptualizó el modelo experimental desarrollado en este trabajo de tesis.

Tabla 2.7. Características generales del modelo experimental propuesto

Características generales del modelo experimental	
Geometría	Caja rectangular
Proporciones	3: 1:1.5. (Largo/Ancho/Altura)
Zona geohidrológica posible de estudiar	Zona saturada, no saturada, capilar y superficial
Dirección de flujo hidráulico	Horizontal
Soporte estructural	Base del soporte, soporte lateral y soporte superior complementario
Forma de inducir el flujo hidráulico	Presión hidrostática
Elementos que conforman el sistema hidráulico	Tanque elevado conectado en la sección de alimentación, vertedero y válvula en la sección de salida
Sistema de muestreo	Pozos de monitoreo Muestreadores multi-niveles Sistema de bombeo para obtención de muestras

3. DISEÑO DEL MODELO EXPERIMENTAL

3.1. DISEÑO DE LA ESTRUCTURA FÍSICA DEL MODELO EXPERIMENTAL

En esta sección se describirán los elementos que componen el modelo experimental, el cual consta de 4 partes fundamentales:

- Caja rectangular
- Soporte estructural
- Sistema de inducción de flujo hidráulico
- Sistema de muestreo

Caja rectangular: Corresponde a la base y a las cuatro caras laterales, que dan la forma de caja rectangular al modelo experimental, no cuenta con tapa; por ello la propia literatura lo denomina caja experimental.

Una vez definida la proporción del modelo experimental, 3:1:1.5, se definieron las dimensiones para la caja rectangular que fueron: 2.2 m de largo por 0.7 m de ancho por 1 m de altura, siendo el largo efectivo de 1.8 m, sin considerar las secciones de inundación de entrada y salida (Figura 3.1).

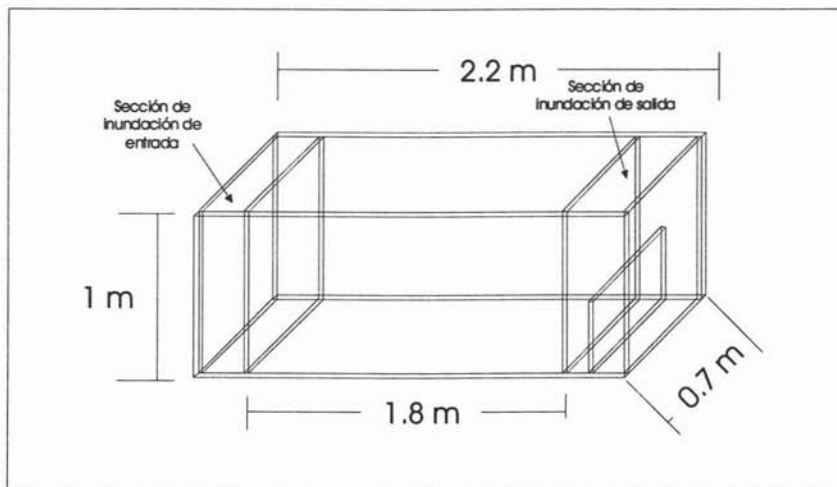


Figura 3.1. Vista tridimensional del diseño del modelo experimental

En cuanto a la altura del modelo, la mayoría de los estudios establecen dimensiones que varían de 0.3 a 1 m de altura (Gvirtzman y Gorelick, 1992; Gvirtzman y Gonen, 1995; Silliman et al., 1998; Barth et al., 2001; Levy y Berkowitz, 2003), dependiendo de la zona que se pretende estudiar. En el caso particular de este trabajo se pretende estudiar principalmente la zona saturada y el efecto del flujo de agua subterránea. Sin embargo, con el objeto de que el modelo tenga una utilidad posterior, se decidió utilizar la altura máxima posible, de aquí que la altura del modelo experimental propuesto fue de 1 m (Figura 3.2).



Figura 3.2. Altura máxima del modelo experimental en relación con las zonas de estudio

La caja rectangular del modelo experimental está compuesta por tres secciones que son: *Sección de inundación de entrada*, *sección de empacado* y *sección de inundación de salida*.

Sección de inundación de entrada: Esta sección se encuentra en uno de los extremos del modelo experimental; su función principal es la de alojar el agua que va a fluir a través de la sección de empacado. El agua se alimenta desde un tanque primario de alimentación; el cual debido a que es movable permite modificar el gradiente hidráulico, con respecto a otras secciones del propio modelo experimental.

Sección de empacado: Es la sección central de la estructura física del modelo experimental; en ella se deposita el material de empaque. Está contenida entre la sección de inundación de entrada y la sección de inundación de salida, separada por dos paneles transversales con orificios. Esta sección corresponde la zona efectiva, saturada o no saturada, donde realmente ocurrirán los fenómenos a estudiar.

Sección de inundación de salida: Es la sección que se encuentra en el extremo opuesto de la entrada; está conformada por un vertedero y una válvula de salida. El vertedero define la altura del nivel estático del flujo de agua y tiene una altura de 0.5 m a partir de la base de la estructura física del modelo experimental.

La figura 3.3 muestra una proyección tridimensional de la caja rectangular del modelo experimental, en la cual se muestran, de izquierda a derecha, las tres secciones principales, la sección de inundación de entrada, la sección de empacado y la sección de inundación de salida. Esta última ilustra el vertedero que fija el nivel estático del flujo de agua y la válvula de salida.

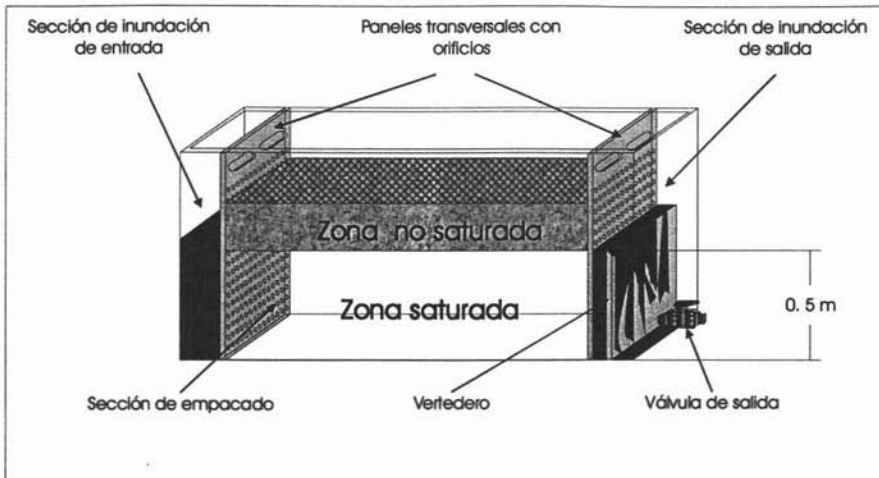


Figura 3.3. Vista tridimensional del diseño de la caja rectangular del modelo experimental

En la figura 3.4 se muestra una vista superior de estructura física del modelo experimental, en la cual puede observarse las distancias a las que van colocados los paneles transversales sus canales guías y el vertedero nivelador. Cabe mencionar que en la literatura consultada no se menciona algo a este respecto, que pudiera haber servido como referencia, por lo que su ubicación se eligió respetando las proporciones de flujo predominantes de 3:1 (ver sección 2.2) y se definió que el espesor de las paredes de la estructura física debía de ser de 2 cm, sin importar el tipo de material con el que fuera a ser construido.

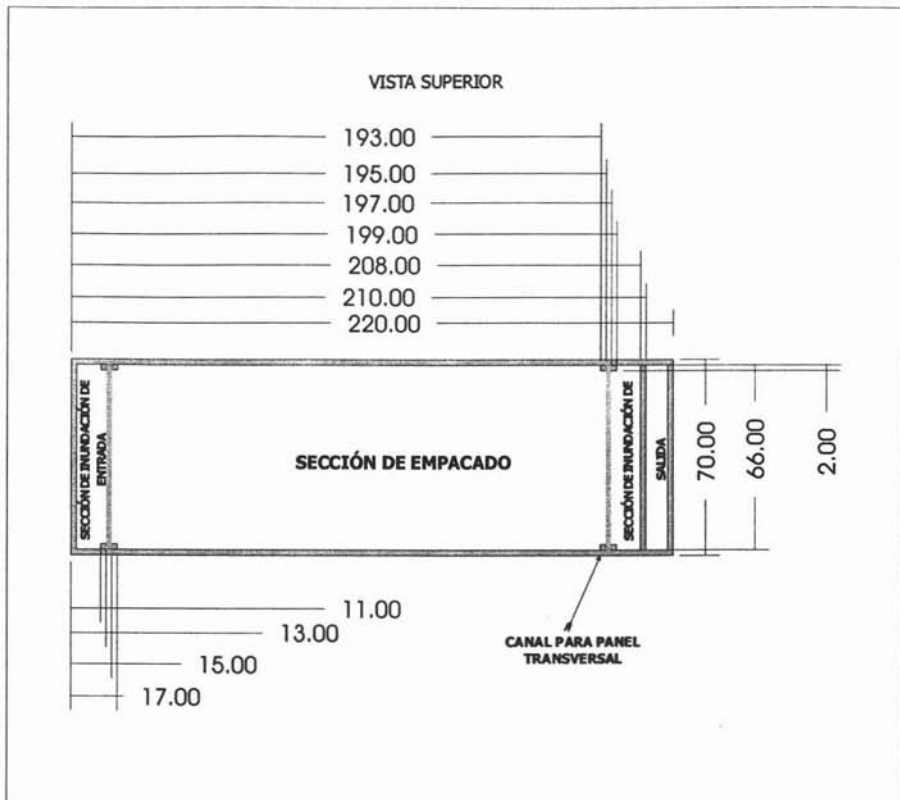


Figura 3.4. Vista superior de la estructura física del modelo experimental, con distancias de los paneles transversales, canales guías y vertedero (medidas en cm)

Una vez especificadas las dimensiones de la estructura física del modelo experimental, se procedió a realizar los diagramas de diseño para su armado, con el objetivo de facilitar la selección del material, corte y construcción, como se verá más adelante.

En la figura 3.5 se observan las 5 caras que conforman la estructura física del modelo experimental, A y B corresponden a las caras laterales; en ellas se debe realizar un ranurado de 2 cm de ancho y 0.5 cm de profundidad, para facilitar el armado con C y D, que son las caras tanto frontal como posterior, y por último el ensamblado de la cara E, que corresponde a la base de la estructura física. En las caras A y B se observan los canales guías para los paneles transversales, que son estructuras poliédricas de base cuadrada, que miden 2 x 2 x 98 cm de ancho, largo y altura, respectivamente.

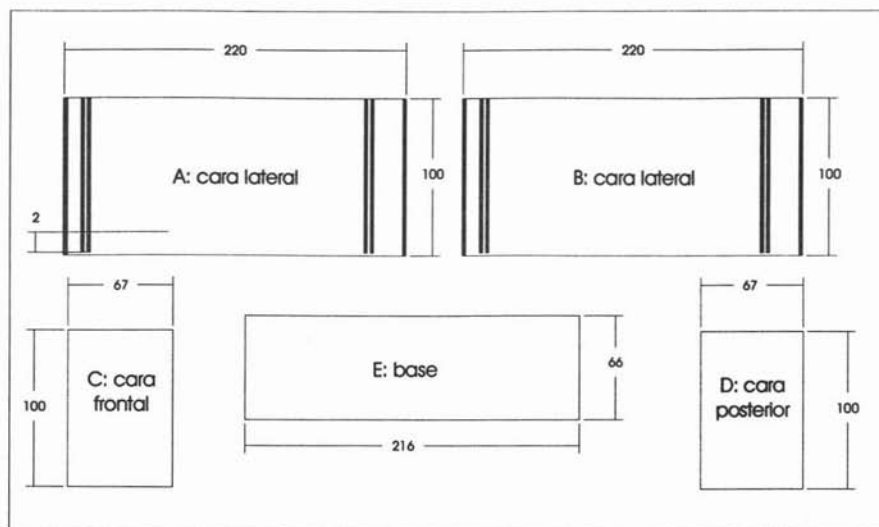


Figura 3.5. Diagrama de las 5 caras que conforman la estructura física del modelo experimental (medidas en cm)

3.2. DISEÑO DE LOS PANELES TRANSVERSALES

En la mayoría de los modelos encontrados en la literatura, se utiliza el término de ventanas o "Screens". Sin embargo, para el presente trabajo se le denominaron paneles transversales a las dos divisiones de las tres secciones fundamentales de la estructura física. El objetivo de estos paneles transversales es el de retener el material de empaque en la sección de empaquete, pero permitir el paso del agua.

Los paneles transversales considerados están formados por una retícula de orificios de 0.5 cm de diámetro, distribuidos homogéneamente con una distancia de 2 cm de separación (Gvirtzman y Gorelick, 1992).

Para evitar el paso del material de empaque a través de los paneles transversales éstos deberán ser recubiertos por una malla filtrante con tamaño de poro de 0.01 mm, considerando que las partículas más grandes que se pueden retener son los materiales arenosos con un tamaño de partícula menor a 1 mm de diámetro y las partículas más pequeñas son los materiales arcillosos con un tamaño de partícula de 0.01 mm de diámetro.

Cada uno de los dos paneles transversales cuenta con dos agarraderas que facilitan su colocación y retiro dentro de la estructura física del modelo experimental. La figura 3.6 muestra el diagrama del diseño de los paneles transversales.

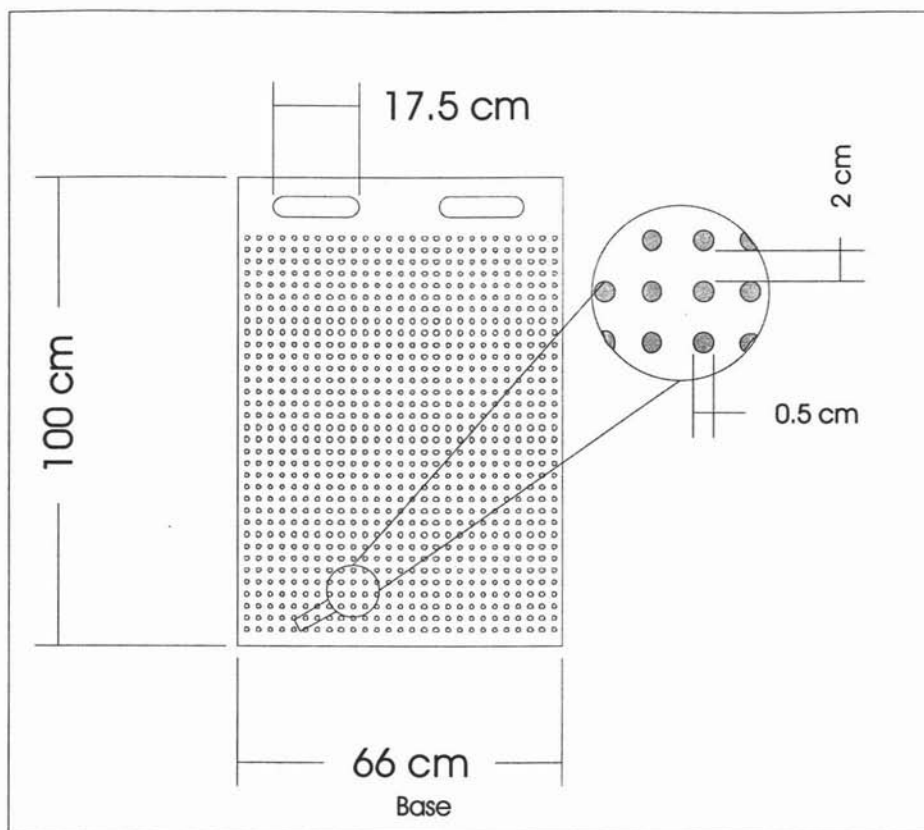


Figura 3.6. Diseño de los paneles transversales

3.3. DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE SOPORTE

Debido a que la estructura física estará expuesta a una presión interna (material de empaque + agua) es necesario reforzarla con una estructura que le brinde las características de resistencia contra el esfuerzo de presión independientemente del material de construcción a utilizar. La estructura que se consideró está compuesta de tres secciones fundamentalmente, la base del soporte, el soporte lateral y el soporte superior complementario. En la figura 3.7 se muestra un diagrama con las medidas de diseño de: la base del soporte, el soporte lateral y el soporte superior complementario.

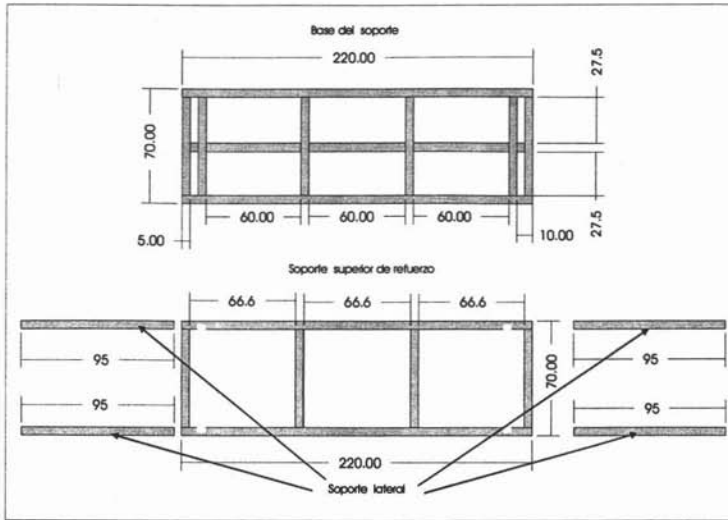


Figura 3.7. Diagrama de la estructura de soporte, mostrando la base del soporte (parte superior), el soporte superior complementario (parte inferior) y el soporte lateral (extremos inferiores derecho e izquierdo) (medidas en cm)

Para cumplir con el criterio de diseño de que el modelo experimental fuera fácil de transportar (ver sección 2.1) se propuso la instalación de cuatro ruedas en la base de soporte, dos de ellas fijas y dos móviles. En la figura 3.8 se muestra el diseño del armado de la estructura de soporte y en la figura 3.9 se muestra un acercamiento de una de las ruedas de la base del soporte, en la que se ilustra como se debe fijar la estructura de soporte lateral a la base de soporte utilizando tornillos de $\frac{1}{4}$ " , en las dos aristas de cada vértice del soporte lateral.

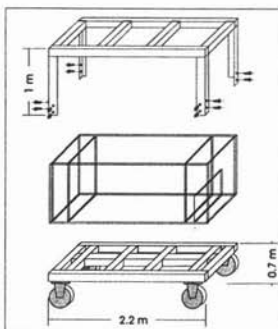


Figura 3.8. Diagrama tridimensional del armado de la estructura de soporte: estructura de soporte lateral (superior), estructura física (centro), base del soporte con sistema de ruedas (inferior)

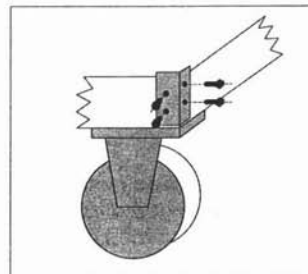


Figura 3.9. Detalle del armado de la estructura de soporte y de una de las ruedas de la base de soporte

3.4. DISEÑO DEL SISTEMA DE DRENAJE Y MUESTREO EN EL FONDO

Los modelos experimentales tienen como objetivo principal el poder comprender los fenómenos que se experimentan en ellos. Es necesario obtener muestras de agua en el fondo del modelo experimental, con el fin de determinar si existen zonas muertas, si se tiene realmente un flujo predominante horizontal, o si la infiltración vertical es mayor. Para ello se consideró necesario contar con drenaje en el fondo y además, para realizar la limpieza del modelo experimental, al término de cada experimento sin necesidad de retirar el material de empaque.

El sistema de drenaje está localizado en la base de la estructura física del modelo experimental y en la cara posterior del mismo. Este sistema consiste de 7 barrenos de 38 mm de diámetro, seis de ellos se encuentran en la base distribuidos de manera uniforme como se aprecia en la figura 3.10. Cada barreno lleva un conector, un niple reductor, una conexión de inserción de manguera y una válvula de muestreo. El séptimo barreno que se encuentra en la cara posterior lleva instalado un conector y la válvula principal de drenado.

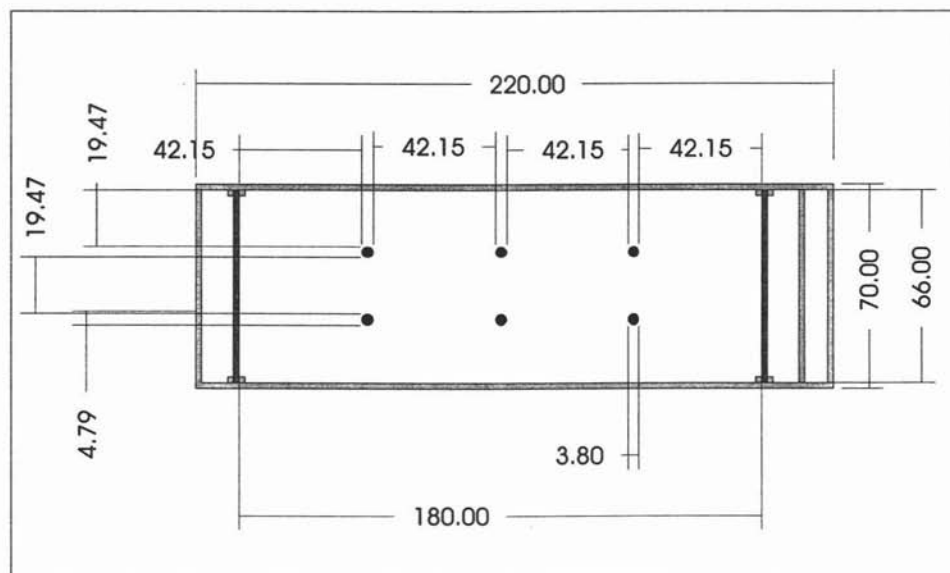


Figura 3.10. Vista superior del modelo experimental mostrando ubicación de los barrenos en el fondo (medidas en cm)

En la figura 3.11A se muestra la cara posterior de la estructura física con la ubicación de la válvula principal de drenado. En la figura 3.11B se muestra el detalle de diseño de los conectores. En la figura 3.11C se muestra una proyección tridimensional de uno de los conectores y en la figura 3.11D se muestra en detalle

el diseño de uno de los reductores y de una de las conexiones de inserción de manguera.

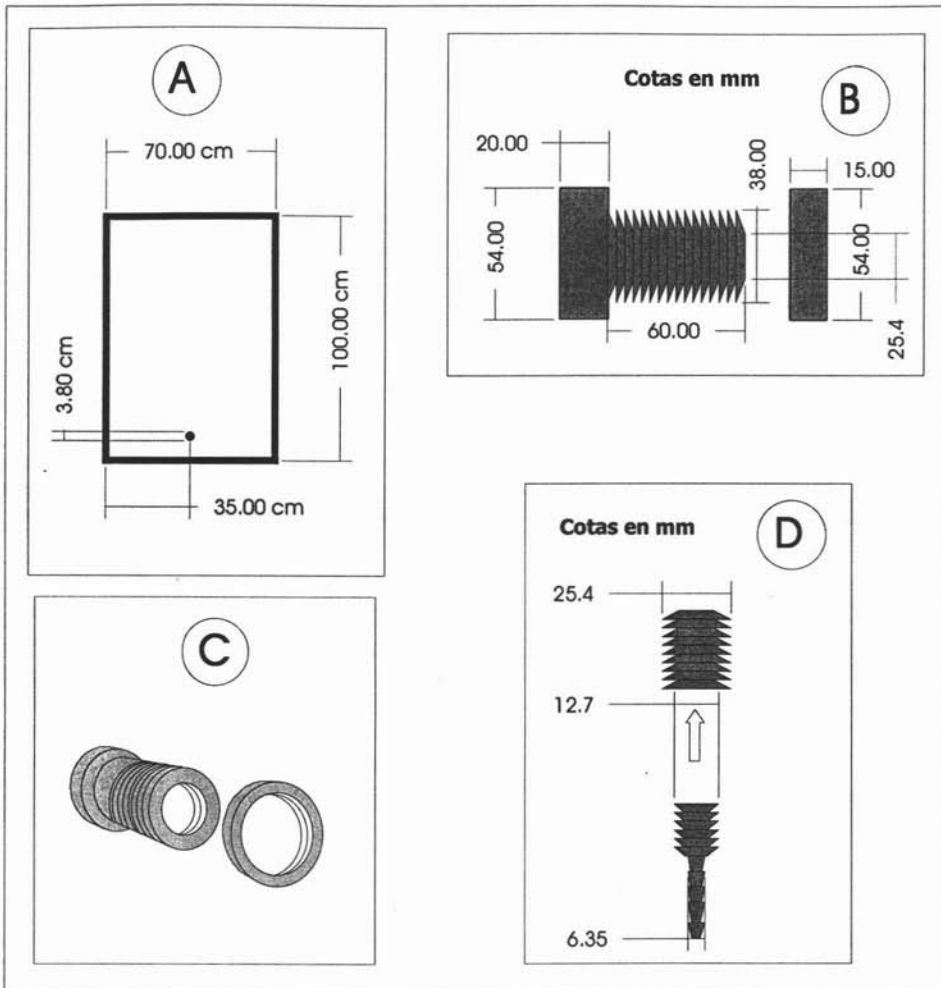


Figura 3.11. A) Vista de la cara posterior de la estructura física del modelo experimental mostrando ubicación para la válvula principal de drenado, B) Conector de CPVC, C) Vista tridimensional del conector, D) Niple reductor y conector de inserción para manguera

En la figura 3.12A se muestra la válvula principal de drenado. En la figura 3.12B se aprecia la válvula de muestreo de inserción para manguera. En la figura 3.12C se ilustra una sección de manguera de 1/4" y en la figura 3.12D se muestra un esquema de cómo debía ser el armado de estos elementos en el fondo del modelo experimental.

Como se explicó en el capítulo anterior, para fundamentar el diseño propuesto del modelo experimental, se consideró que todos los materiales y en especial válvulas, conectores y mangueras, que son los componentes más vulnerables debían estar fabricados con materiales resistentes a hidrocarburos, como lo son el PVC, CPVC, acrílico, nylon y teflón.

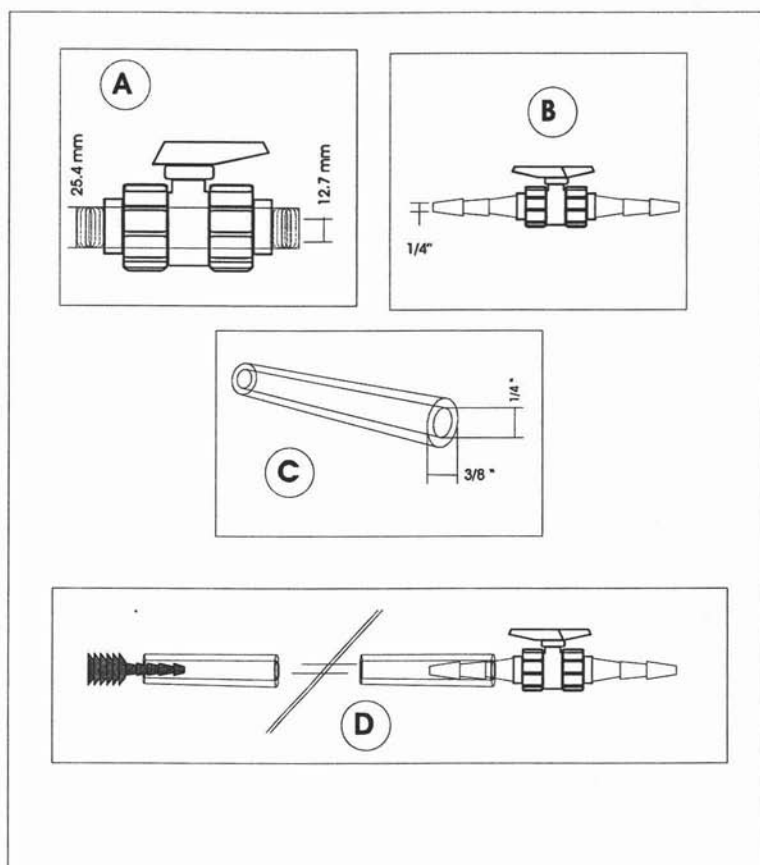


Figura 3.12. A) Válvula principal de drenaje de 1/2" (12.7 mm) de CPVC, B) Válvula de muestreo inserción para manguera, C) Manguera con recubrimiento de Viton® de 1/4" diámetro interior, D) Esquema del armado de la manguera al conector y a la válvula de inserción por inserción

Debido a que el sistema de drenaje y muestreo se encuentra ubicado en la sección de empaqueo; el material de empaque que se piense utilizar podría causar obstrucción tanto a las válvulas como a las mangueras instaladas. Por tal motivo se consideró incluir una malla de retención para el material de empaque. En la literatura se reporta la utilización de mallas de acero inoxidable con tamaños de malla (Silliman, 1998), inferiores a 0.1 mm, para evitar el paso de partícula pequeñas como arenas finas o arcillas no compactadas. Por tal motivo en este trabajo se decidió que esta rejilla de retención tuviera un tamaño de Malla de 100 (0.1 mm) y que tuviera las dimensiones del fondo de la sección de empaqueo como se observa en la figura 3.13.

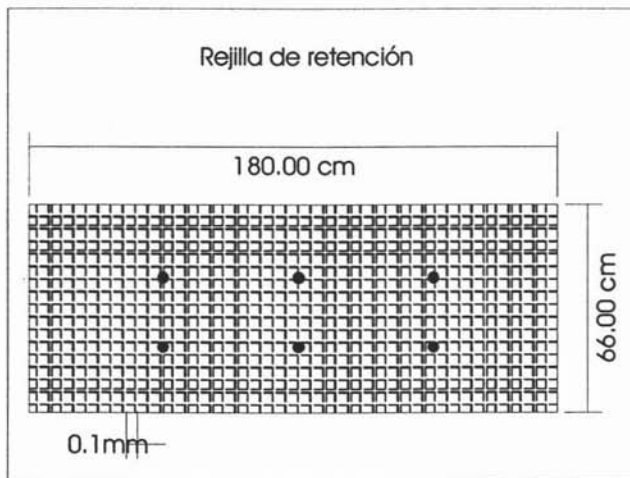


Figura 3.13. Vista superior de la sección de empaqueo mostrando la rejilla de retención del material de empaque

3.5. DISEÑO DEL SISTEMA DE INDUCCIÓN DE FLUJO HIDRÁULICO

Los modelos experimentales en forma de caja rectangular deben contar con un sistema hidráulico que puede ser de dos tipos: Forzado o natural.

El sistema hidráulico forzado basa su funcionamiento principalmente en la colocación de bombas peristálticas de flujo variable, las cuales proporcionan la inyección y o extracción del agua dentro del modelo para promover un flujo predominante horizontal a lo largo de la sección longitudinal del modelo (MacIntyre, 1991). El sistema natural es una simplificación del sistema inducido, porque, a diferencia de la utilización de dos bombas una de inyección y otra de extracción, se auxilia de salidas de nivel colocadas en el extremo lateral final del

modelo y que consiste en una serie de orificios a diferentes alturas, los cuales son cerrados o abiertos dependiendo la altura que se pretenda tener el flujo del agua o en su caso de un vertedero fijo a una altura determinada (Gonen, 1997).

En el caso del modelo experimental que se diseñó para el presente estudio, para poder alcanzar velocidades de flujo similares a la de los materiales más porosos, y tener con ello permeabilidades de 0.01cm/s como máximo, bastó con poner un sistema de caída de presión con la ayuda de un tanque primario de almacenamiento, y la única condición fue colocarlo a una altura mayor a la estructura física del modelo experimental y que tuviera una válvula para regular la velocidad de inundamiento. En la salida se escogió un sistema natural con vertedero fijo, la cual garantiza una altura del flujo de agua estática.

En la figura 3.14 se muestra una vista lateral del tanque primario de alimentación, la válvula reguladora del flujo y la tubería de alimentación.

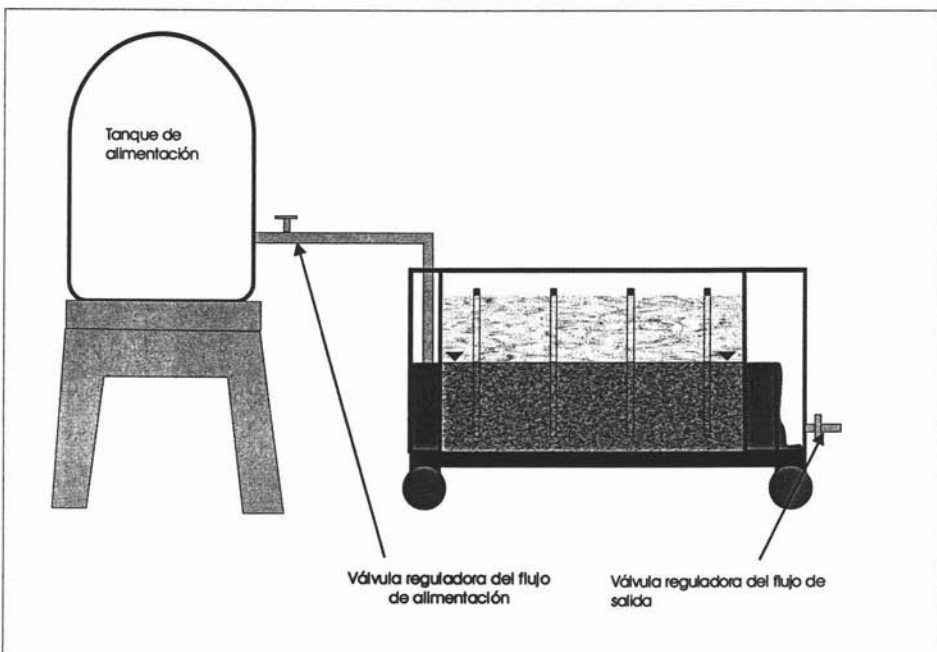


Figura 3.14. Diagrama del sistema de inducción de flujo hidráulico

3.6. DISEÑO DEL SISTEMA DE MUESTREO

3.6.1. POZOS DE MONITOREO

Los pozos de monitoreo tienen como función principal: Conocer la profundidad del nivel estático y obtener muestras que sean representativas de las condiciones que prevalecen en la zona saturada.

Para el modelo experimental se decidió diseñar 8 pozos de monitoreo (Katz y Gvritzman, 2000) de 32 mm de diámetro interno y 95 cm de longitud. Se simuló el ademe de pozos de monitoreo ambientales reales, por lo cual cada pozo tiene una sección lisa, una sección con orificios de 0.5 cm de diámetro y un tapón de punta. Este último tiene como función principal facilitar el hincado del pozo en el material de empaque. En la figura 3.15 se observan las especificaciones de diseño de estas tres secciones.

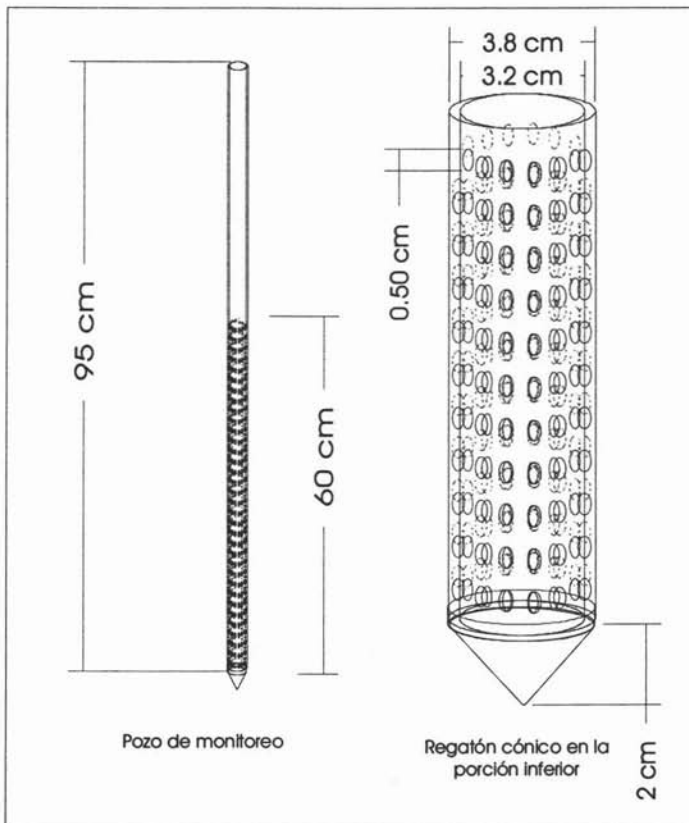


Figura 3.15. Detalle de los pozos de monitoreo

Los pozos debían ir recubiertos de una malla protectora para evitar el paso y obstrucción provocada por las partículas del material de empaque. En la literatura consultada se encontró que los materiales más empleados para este tipo de filtros son de nylon y acero inoxidable (Stites, 1991). Los filtros para los pozos de monitoreo tienen forma cilíndrica y sus dimensiones fueron 4 cm de diámetro por 1 metro de largo. En la figura 3.16 se muestra un esquema de uno de los pozos de monitoreo con el filtro ya instalado

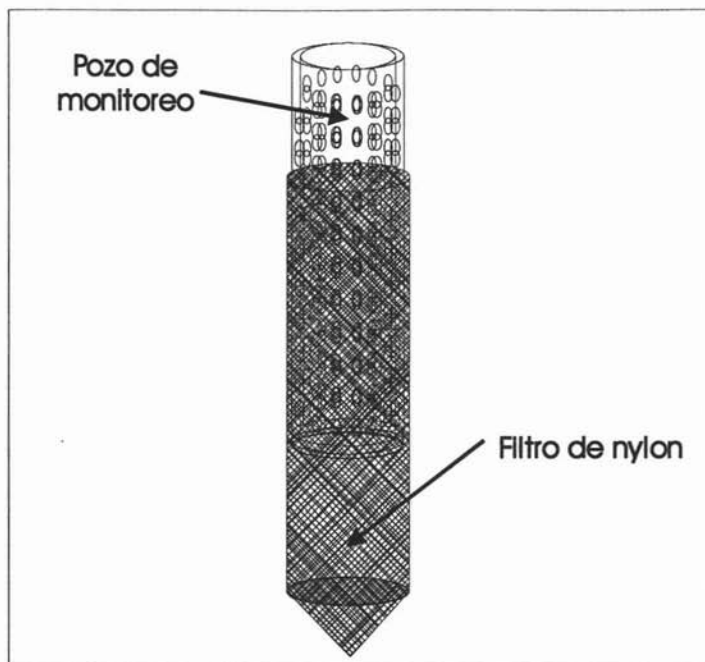


Figura 3.16. Filtro de nylon para los pozos

3.6.2. DISPOSITIVOS PARA MUESTREO

Un dispositivo para muestreo es una estructura que sirve para la obtención de muestras de agua a diferentes niveles en un mismo punto de estudio; en los artículos encontrados en la literatura, los autores hacen hincapié en la importancia que tienen estos dispositivos para lograr resultados representativos. La importancia de su diseño radica en cuidar ciertos aspectos como son:

- La obtención de muestras debe ser rápida y sencilla. Para ello proponen sistemas automáticos de bombeo y así obtener el mayor número de muestras en el menor tiempo posible (Mailloux, 2003)

- Se recomienda la utilización de tubos flexibles por medio de los cuales se bombean las muestras, evitando así su contaminación y mezclado (Stites, 1991)
- Los materiales que se emplean para su construcción deben ser inertes. (Mailloux, 2003)

Con las consideraciones anteriores se diseñó un muestreador de 3 niveles cuyo detalle se presenta en la figura 3.17. Este dispositivo cuenta con tres tubos flexibles de muestreo. El diámetro interior de estos tubos es de 0.3 cm, tienen una camisa filtrante de nylon al final de cada uno. Estos tubos pasan a través de anillos guías de 32 mm que cuentan con 6 barrenos colocados equidistantemente a lo largo del perímetro de los anillos. Los anillos guías son fijados con sujetadores a diferentes alturas de una barra que garantiza la estabilidad y la rigidez del muestreador como se observa en la figura 3.18. De esta forma pueden tomarse muestras de líquidos a diferentes profundidades a partir de la superficie. Con este diseño se pueden tomar muestras a diferentes niveles en un mismo punto en forma manual o automática. El diseño anterior simula piezómetros multiniveles, mismos que son muy utilizados en estudios geohidrológicos. El dispositivo de muestreo a tres niveles debe ir introducido dentro de los pozos de monitoreo.

Por último se consideró diseñar una tapa superior en cada dispositivo de muestreo cuya función principal es evitar la entrada de sustancias ajenas hacia el interior de los pozos de monitoreo. Esta tapa se podría considerar el anillo guía final.

A continuación se enlistan las partes que componen al muestreador:

- Soporte.
- Anillos guía.
- Sujetador.
- Tornillos de fijación.
- Tubos flexibles.
- Tapa superior del muestreador.

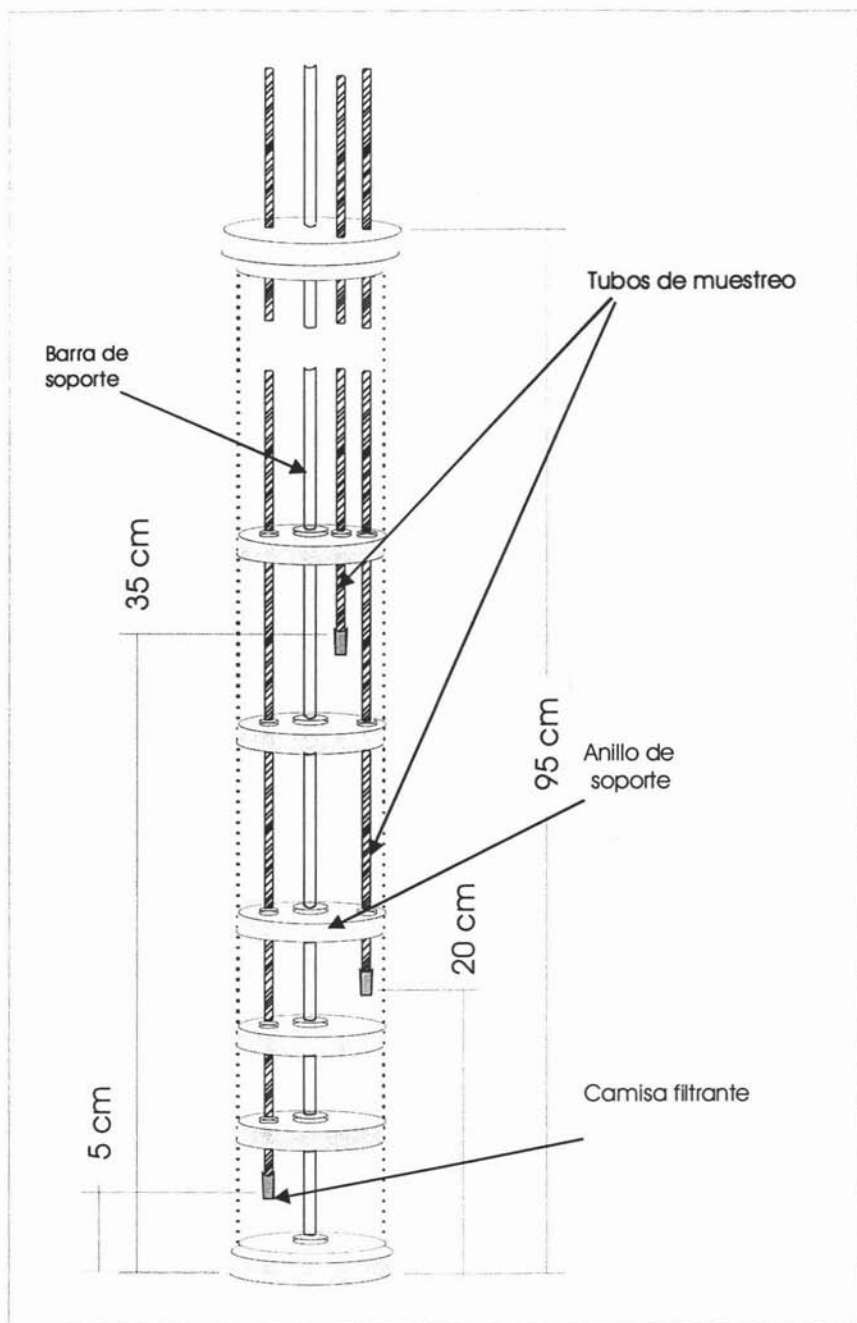


Figura 3.17. Diagrama de un muestreador a tres niveles dentro del pozo de monitoreo

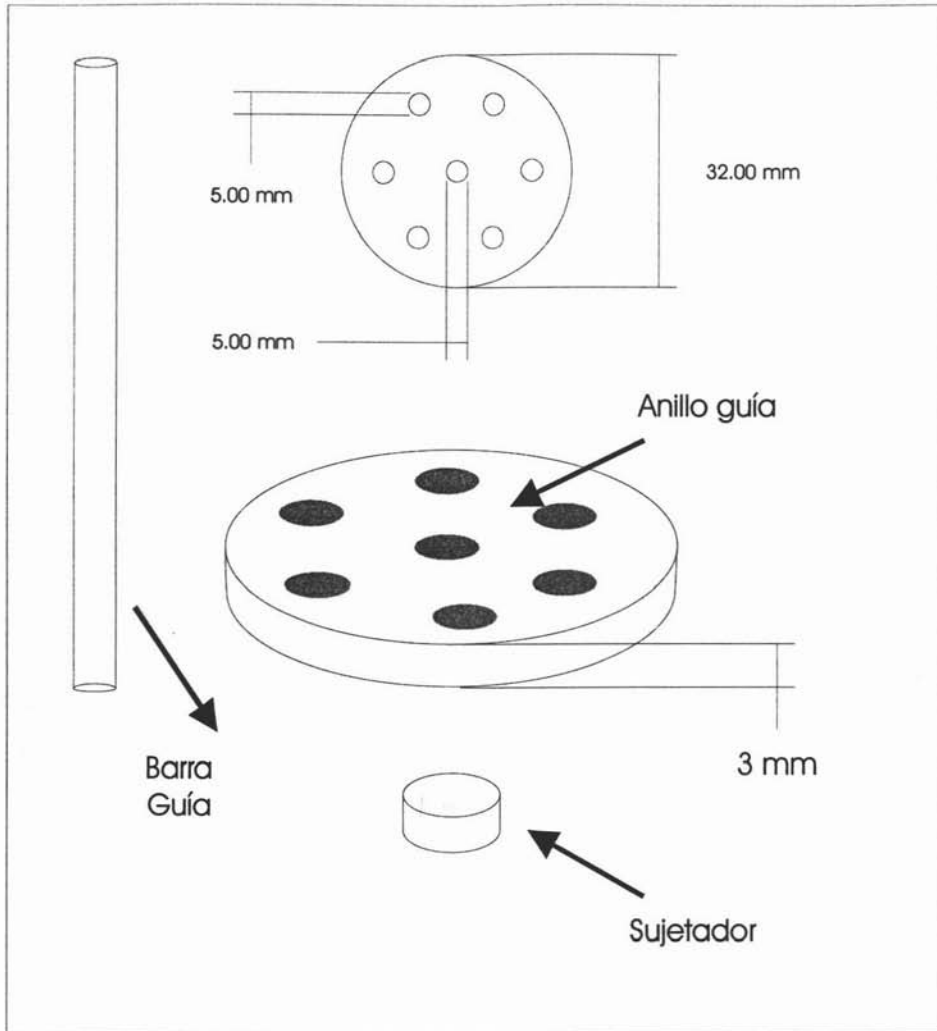


Figura 3.18. Detalle del diseño del muestreador multinivel

3.6.3. SISTEMA DE OBTENCIÓN DE MUESTRAS

Como se dijo anteriormente, el éxito de un estudio depende de la rapidez y eficacia con la que se obtienen las muestras. Por lo que para lograr este objetivo se consideró un sistema automático con una bomba peristáltica de cabezales múltiples. Se hizo una búsqueda exhaustiva en el mercado sobre las bombas que existían para realizar dicho trabajo y se encontró una que cumple con las características requeridas, en cuanto a flujos y disponibilidad; se trata de una bomba programable de 8 rodillos IPC 780042 con 24 canales mostrada en la figura 3.19. Esta bomba permite conformar una red de muestreo, de hasta 24 puntos diferentes, las muestras de agua se reciben en viales de 20 ml de capacidad.



Figura 3.19. Bomba programable de 24 canales

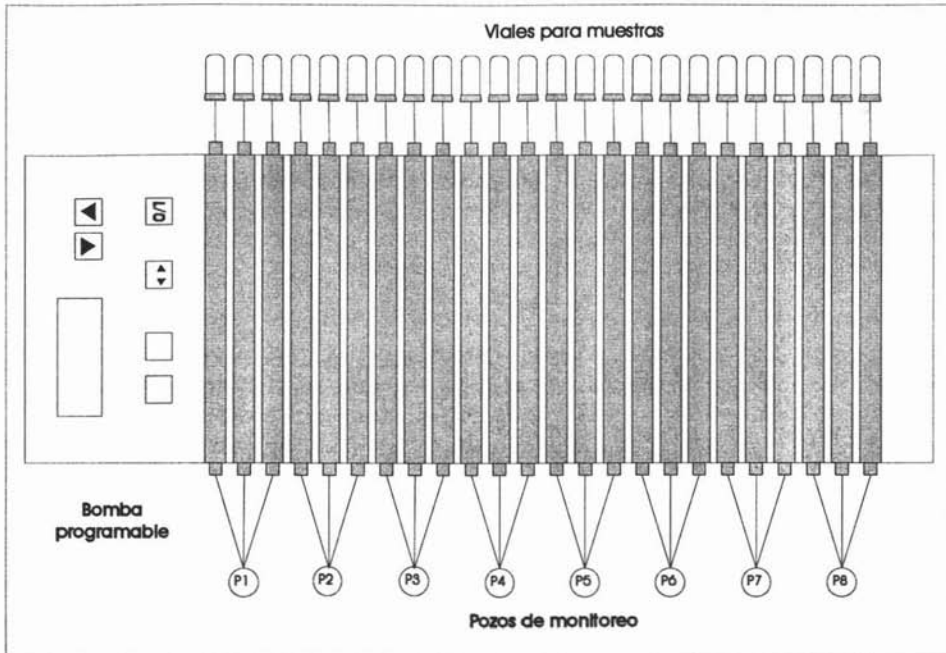


Figura 3.20. Esquema de la red de muestreo

En la figura 3.20 se presenta un esquema general de la red de muestreo, cada una de las líneas que están conectadas a los pozos y a los viales representan un tubo flexible de Viton® con un diámetro interior 0.3 mm. La parte central del esquema representa el cuerpo de la bomba, la cual permite obtener muestras con un flujo que puede variarse de 0.082 a 35.2 ml/min, haciendo que el tiempo entre cada obtención de muestras sea relativamente muy corto, con esto se reduce la variabilidad en los análisis.

3.7. DIAGRAMA GENERAL DEL MODELO EXPERIMENTAL

En la figura 3.21 se muestra un diagrama que integra el diseño de todos y cada uno de los elementos del modelo experimental que se describieron en esta sección, el cual sirvió como base para su construcción.

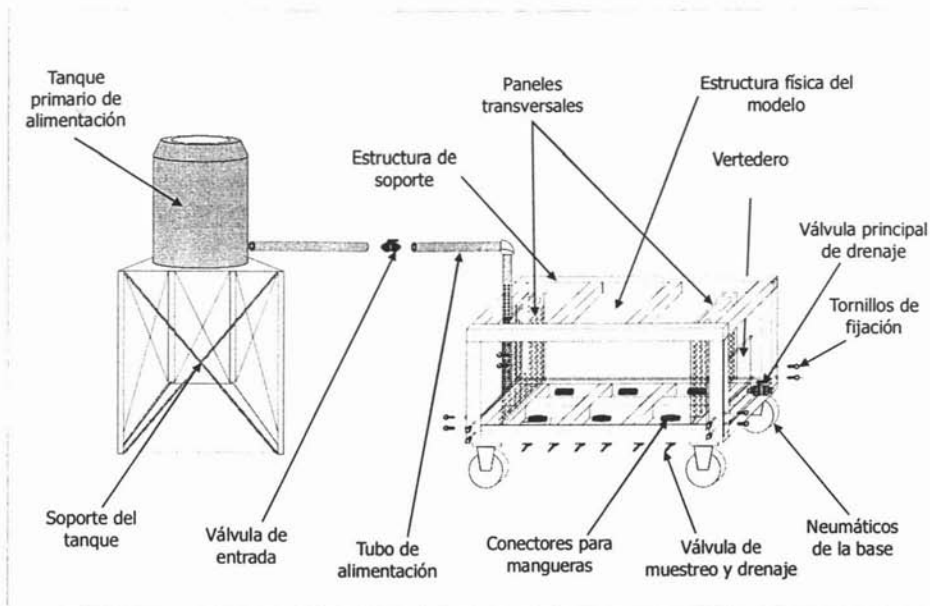


Figura 3.21. Diagrama del modelo experimental

4. CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DEL MODELO EXPERIMENTAL

4.1. SELECCIÓN DEL MATERIAL PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL MODELO EXPERIMENTAL

El material más empleado para la construcción de modelos experimentales similares al del presente estudio es el acrílico de alta densidad, por sus características de resistencia y no-reactividad (Gonen, 1997), aunque también se han utilizado placas de vidrio (MacIntyre, 1991).

El acrílico es un polímero termoplástico producido con monómero de cetil metacrilato, cuyas propiedades físico químicas son: Buena resistencia a la intemperie, resistencia a la ruptura de 700 a 760 Kg. /cm², resistencia a temperaturas de hasta 80° C, densidad de 1.18 g/cm³, composición química resistente a la acción de sales inorgánicas, ácidos diluidos, álcalis, combustibles, ésteres simples y aceites minerales.

A partir de lo anterior, se decidió utilizar placas de acrílico para la construcción de la estructura física del modelo diseñado en el presente estudio. Además, está disponible en el mercado, tiene bajo costo y es de fácil manejo. En el diseño del modelo se consideró el espesor de las paredes, por lo que las placas de acrílico empleadas para su construcción debían de tener un espesor de 2 cm.

Para la construcción de la estructura de soporte se decidió utilizar perfiles de acero, para brindar la estabilidad y durabilidad que se señalo en el diseño.

4.2. CONSTRUCCIÓN DE LA ESTRUCTURA FÍSICA DEL MODELO EXPERIMENTAL

Para la construcción del modelo experimental y de acuerdo con el diseño planteado en el capítulo anterior, se requirió de una constante búsqueda de proveedores de los materiales necesarios que reunieran las condiciones establecidas en el diseño; así como de empresas que contaran con la maquinaria y equipo para cumplir con las especificaciones previamente definidas para cada una de las partes del modelo.

En este capítulo se describirá paso a paso la construcción del modelo experimental con la ayuda de las fotografías tomadas durante todo el proceso el cual requirió varios meses de trabajo para tenerlo completo y funcionando, además del apoyo de varias personas.

La construcción de la estructura física del modelo experimental involucró labores de corte, biselado, barrenado, ensamblado y armado.

Las placas de acrílico tenían dimensiones de 2.2 por 1.2 m (Figura 4.1). En las placas de acrílico se realizaron los cortes necesarios para tener las piezas correspondientes a la base, las caras laterales, la cara frontal, la cara posterior, los canales guías, el vertedero y los paneles transversales utilizando una sierra redonda horizontal (Figura 4.2).

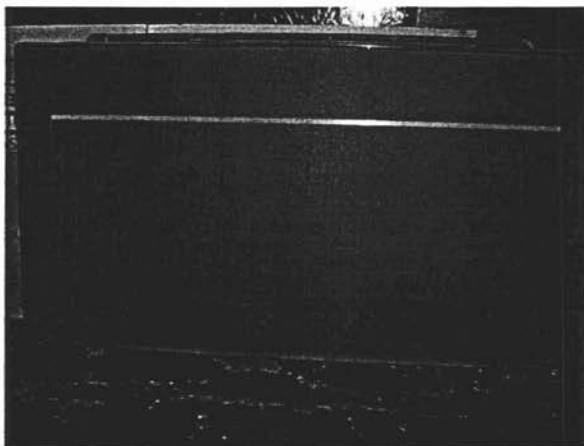


Figura 4.1. Placas de acrílico de 2.2 x 1.2 m

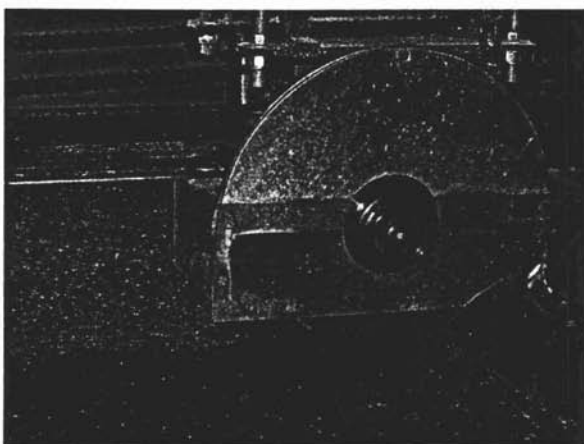


Figura 4.2. Corte de la placa de acrílico en las diferentes secciones

Posteriormente se procedió a realizar el ranurado de las dos caras laterales; esto con el fin de permitir su ensamblado. En la figura 4.3 se aprecia un acercamiento del ranurado.



Figura 4.3. Ranurado en una de las placas laterales de la caja de acrílico

Realizados los ranurados en las dos caras laterales se procedió a fijar los canales guías para los paneles transversales (Figura 4.4). Dejando la tolerancia de 2 cm hacia el extremo inferior (Figura 4.5), donde posteriormente se ensamblaría la base de la estructura física.



Figura 4.4. Colocación de los canales guías para los paneles transversales

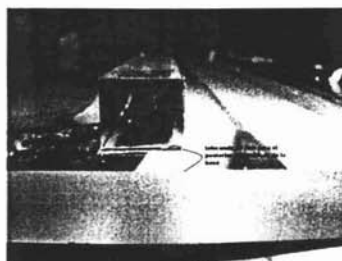


Figura 4.5. Vista de perfil de uno de los canales guías mostrando la tolerancia de 2 cm para el posterior énsamblado de la base

El vertedero se cortó a las dimensiones de diseño, 0.5 x 0.66 m y se fijó a las caras laterales de la estructura física (Figura 4.6).

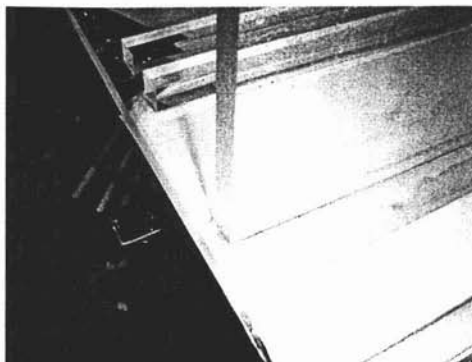


Figura 4.6. Colocación del vertedero en una de las caras laterales

De igual forma se procedió a fijar la cara frontal (Figura 4.7) y la cara posterior (Figura 4.8), finalmente se ensambló la base de la estructura física del modelo.

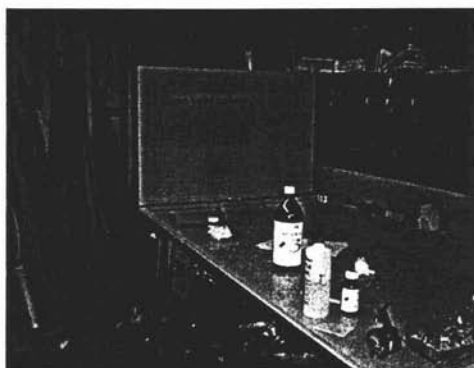


Figura 4.7. Colocación de la cara frontal en una de las caras laterales

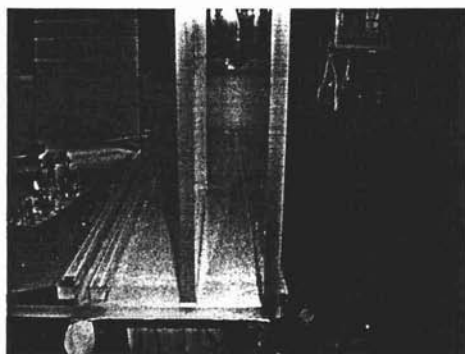


Figura 4.8. Colocación de la cara posterior en una de las caras laterales

Para el armado de los elementos que conforman la estructura física del modelo experimental se utilizó una resina acrílica de 3 tiempos, formulada por monómero de metil metacrilato, copolímero de reacción y un catalizador (Figura 4.9) que regula dicha reacción; al utilizar esta resina se efectúa una fusión de las diferentes partes. Para comprobar lo anterior, se mezcló el monómero con el copolímero (Figura 4.10), se agregaron unas gotas del catalizador (Figura 4.11) y se esperaron 2 minutos para obtener la resina acrílica sólida (Figura 4.12). Esta resina se utilizó para el armado de toda la estructura física del modelo experimental.



Figura 4.9. Monómero, copolímero y catalizador

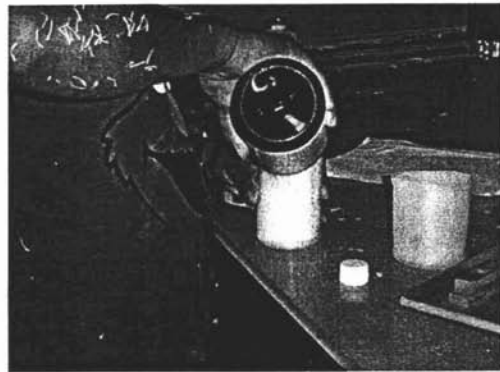


Figura 4.10. Se agrega el monómero al copolímero para iniciar la reacción



Figura 4.11. se agregan unas gotas del catalizador, para regular la reacción

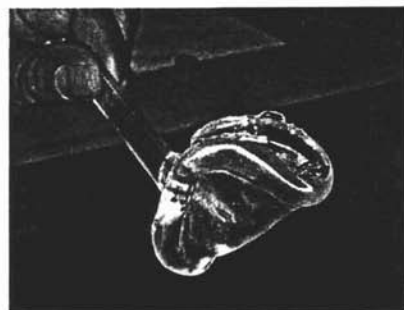


Figura 4.12. Después de 2 minutos de reacción se tiene la resina acrílica sólida

4.3. PANELES TRANSVERSALES

Los paneles transversales están contruidos también con acrílico de alta densidad, el cual tiene la ventaja de que puede manejarse con facilidad, tanto en su corte como en el barrenado de orificios. Se han realizado estudios donde estos paneles o "Screens" se han construido con placas de acero (Gvirtzman, 1995); pero debido a que el uso fundamental del modelo es para trabajar con mezclas de compuestos orgánicos, es posible que se tenga reactividad con el material y se propicie la corrosión del mismo.

De las placas de acrílico seleccionadas y cortadas según las especificaciones del diseño, se obtuvieron los paneles transversales a los cuales se les realizaron los orificios con un taladro vertical con broca de 0.5 cm de diámetro (Figura 4.13).

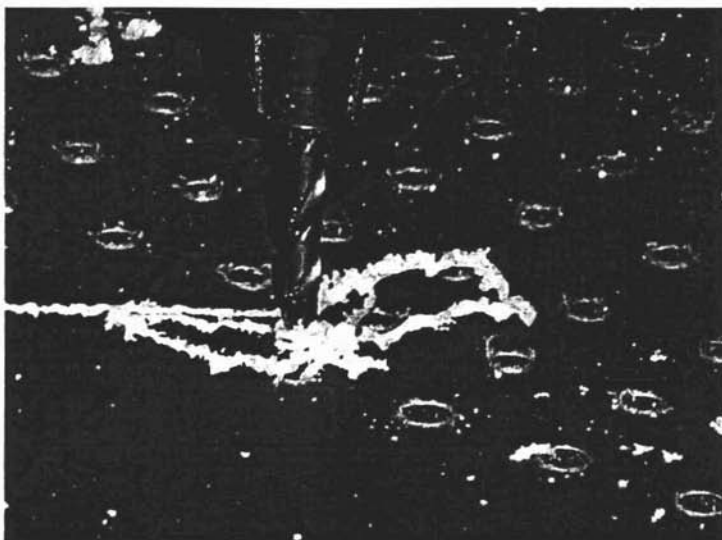


Figura 4.13. Vista del taladro vertical realizando los barrenos en los paneles transversales

En cada panel transversal se perforaron 1302 orificios correspondientes a un área transversal total efectiva de flujo de 256 cm²; una vez perforados los paneles, se dio forma a las manijas con una cortadora especial (Figura 4.14). Se pulieron los paneles para concluir con su construcción (Figura 4.15).



Figura 4.14. Cortadora manual utilizada para la elaboración de las manijas de soporte



Figura 4.15. Panel transversal terminado

Las bolsas filtrantes que recubren cada uno de los dos paneles transversales, fueron confeccionadas a la medida en tela de nylon (Figura 4.16).



Figura 4.16. Bolsa filtrante de nylon para panel transversal

4.4. ESTRUCTURA DE SOPORTE

Para la estructura de soporte se utilizaron perfiles de acero de 2" de sección transversal. De acuerdo con el diseño, se procedió a cortar las secciones de los perfiles de acero, los cuales fueron soldados con la ayuda de una soldadora eléctrica para formar tanto la base de soporte (Figura 4.17) como la estructura de soporte lateral y refuerzo superior (Figura 4.18).



Figura 4.17. Base de soporte



Figura 4.18. Estructura de soporte lateral y refuerzo superior

4.5. ARMADO DEL MODELO EXPERIMENTAL

Una vez construida la estructura física y la estructura de soporte, se procedió a armar el modelo experimental tomando como base el diseño descrito. En la figura 4.19 se aprecia la vista lateral del modelo experimental armado y en la figura 4.20 la cara posterior del mismo.

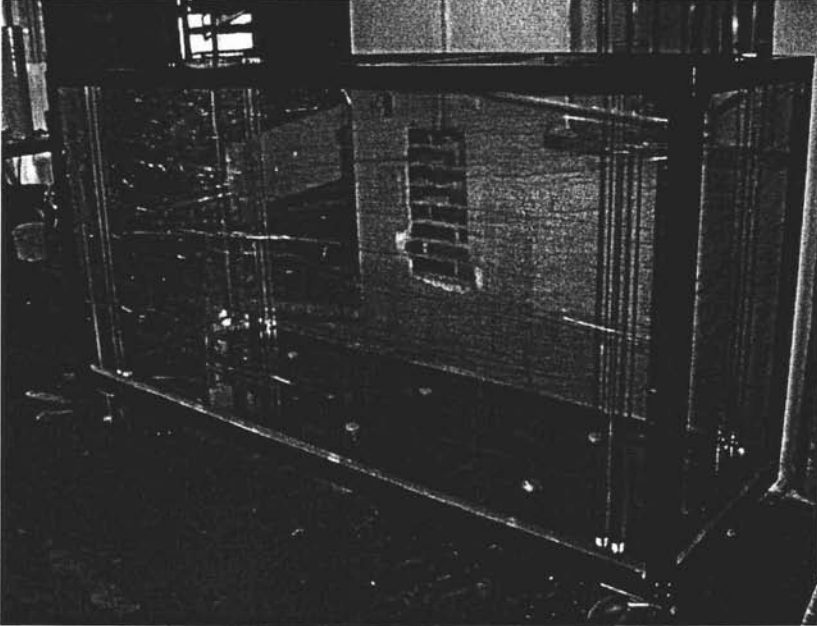


Figura 4.19. Modelo experimental mostrando la estructura física y la estructura de soporte ya armados

En las figuras 4.21 y 4.22 se muestran acercamientos de los tornillos de fijación de la estructura de soporte y las ruedas tanto delanteras como traseras. Estas ruedas están construidas de acero de alta resistencia, recubiertas de plástico de alta densidad y tienen un límite de carga total de 3.2 toneladas.



Figura 4.20. Vista posterior del modelo experimental

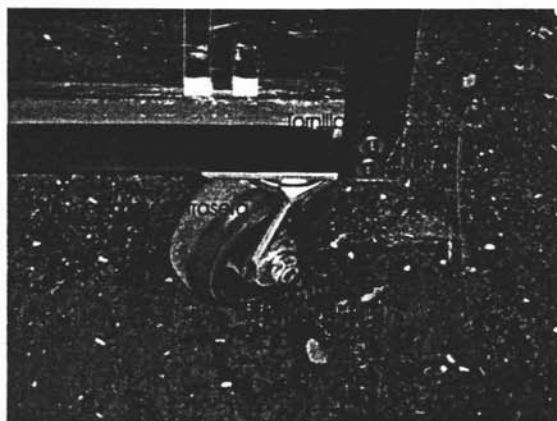


Figura 4.21. Acercamiento de los tornillos de fijación y de la rueda móvil trasera giratoria



Figura 4.22. Acercamiento de los tornillos de fijación y la rueda delantera fija

4.6. SISTEMA DE DRENAJE Y MUESTREO EN EL FONDO

Inicialmente se marcaron los 6 puntos en la base, para colocar las salidas de fondo. En esos puntos se realizaron perforaciones con 38 mm de diámetro, utilizando taladro con un cortador adaptado (Figura 4.23). No fue necesario hacer cuerda en las perforaciones, debido a que los conectores que se instalaron más tarde, son de pared lisa.

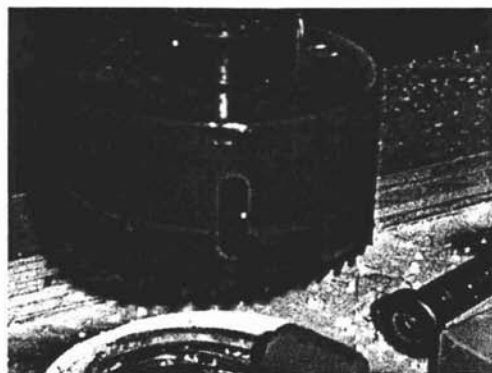


Figura 4.23. Acercamiento del taladro cortador mostrando la adaptación de corte

La distribución de las perforaciones se aprecia en la figura 4.24.

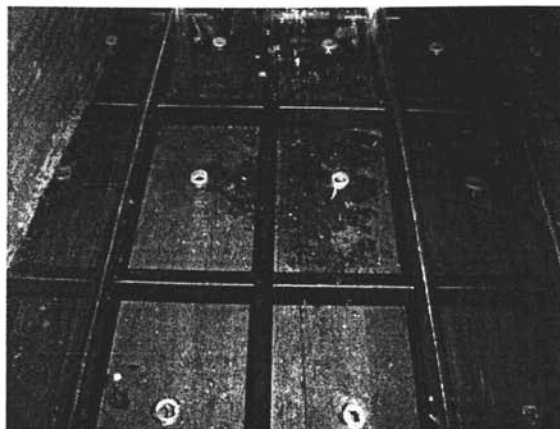


Figura 4.24. Distribución de las perforaciones en la base

Los conectores, los reductores y las conexiones de inserción descritos en la sección 3.4 se fabricaron respetando las especificaciones establecidas en el diseño (Figura 4.25).

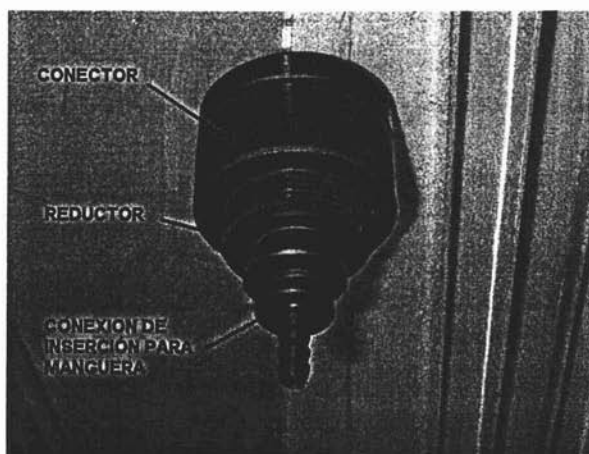


Figura 4.25. Conector de PVC, reductor y conexión de inserción para manguera

En cada orificio de la base se procedió a instalar un conector de PVC (con pared exterior lisa y rosca hembra); se colocó un empaque de nitrilo de 37 mm de diámetro tanto en la cara interior como en la exterior de la base de la estructura física (Figura 4.26).

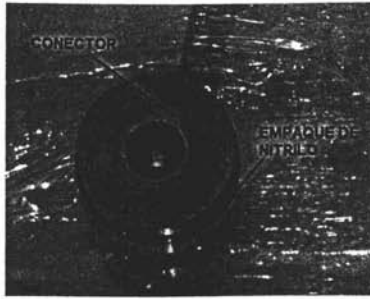


Figura 4.26. Detalle del conector mostrando empaque de nitrilo en la base del modelo (vista desde el interior)

Posteriormente, se colocaron las mangueras de Viton® de 1/4 de pulgada en las conexiones (Figura 4.27) y se fijaron las válvulas de drenado y muestreo (Figura 4.28).

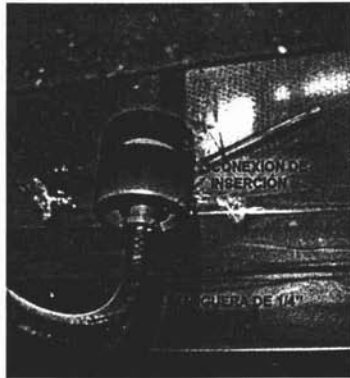


Figura 4.27. Manguera de Viton® de 1/4 '' instalada en uno de los conectores en la base del modelo experimental (vista exterior)



Figura 4.28. Válvula de drenado y muestreo instalada en la base del modelo experimental

Una vez conectadas todas las válvulas de drenado y muestreo, se instaló un conector en la cara posterior de la estructura física del modelo experimental para poder colocar la válvula principal de drenado (Figura 4.29).



Figura 4.29. Válvula principal de drenado instalada en la parte inferior de la cara posterior del modelo experimental

Como parte del sistema de drenado y muestreo, se colocó la rejilla de retención del material de empaque, elaborada en acero inoxidable (Figura 4.30) con un tamaño de malla de 100 (0.1 mm) y dimensiones de 1.80 m de largo y 0.66 m de ancho (Ver sección 3.4, Figura 3.13).



Figura 4.30. Rejilla de acero inoxidable de malla 100

4.7. INSTALACIÓN DEL SISTEMA DE INDUCCIÓN DE FLUJO HIDRÁULICO

Los elementos que conforman éste sistema se especificaron en la sección 3.5, a continuación se presenta una lista de ellos.

- Tanque primario de alimentación.
- Válvula reguladora de flujo.
- Tubería de alimentación.
- Vertedero de la sección de inundación de salida (Figura 4.34).
- Válvula principal de drenado (Figura 4.29).

El tanque primario de alimentación es un tinaco de polietileno de 450 L de capacidad (Figura 4.31). Se instaló en una estructura metálica a una altura de 1.3 m. El tanque se conectó a la red de agua potable del laboratorio y se le instaló una válvula con flotador (Figura 4.32). Se conectó una manguera flexible de polietileno de ½" en la base del tanque. Se dispuso de una válvula metálica de ½" (Figura 4.33), que fue conectada a la manguera y colocada al centro de la sección de inundación de entrada (Figura 4.34) para la alimentación del agua.



Figura 4.31. Tinaco de 450 L de capacidad

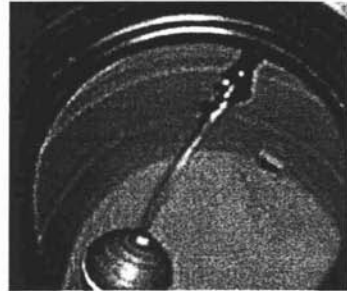


Figura 4.32. Instalación de la válvula con flotador



Figura 4.33. Válvula reguladora de flujo

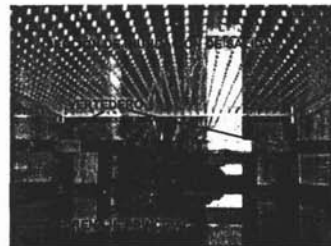


Figura 4.34. Vista superior de la sección de inundación de salida mostrando vertedero

4.8. SISTEMA DE MUESTREO

4.8.1. POZOS DE MONITOREO

Para fabricar los 8 pozos de monitoreo se utilizaron tubos de acrílico de 38 mm de diámetro externo con un espesor de pared de 3 mm (Figura 4.35). Se cortaron a 95 cm de longitud, para posteriormente realizar los orificios de 0.5 cm de diámetro como se especificó en el diseño (Figura 4.36). Se elaboraron los tapones punta también en acrílico (Figura 4.37) y se fijaron a los tubos (Figura 4.38).



Figura 4.35. Tubo de 38 mm de diámetro interno y 3 mm de espesor de pared

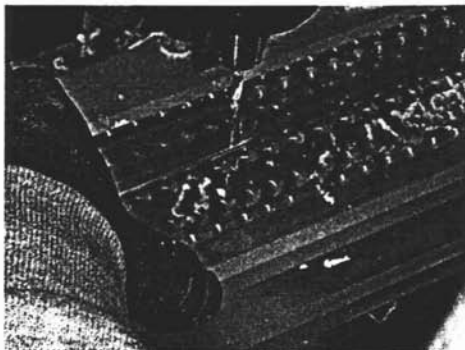


Figura 4.36. Perforación de los orificios de 5mm

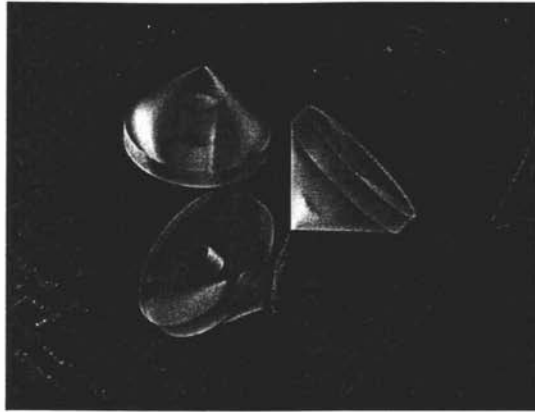


Figura 4.37. Tapones de punta

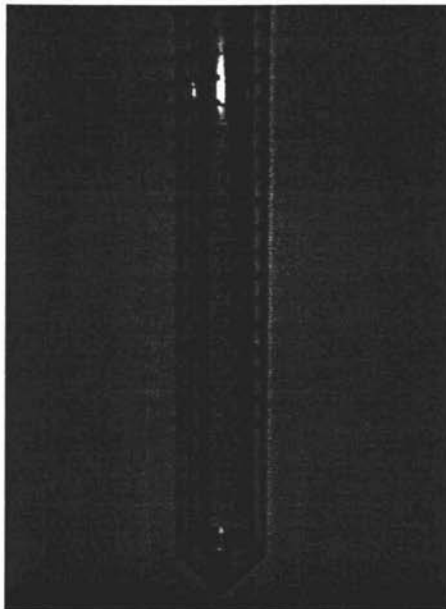


Figura 4.38. Acercamiento de un pozo de monitoreo terminado

Una vez construidos los pozos de monitoreo, se procedió a elaborar los filtros en nylon malla 100 (Figura 4.39) según el diseño. Por último se les adaptó una correa para sujetarse a los pozos de monitoreo (Figura 4.40).

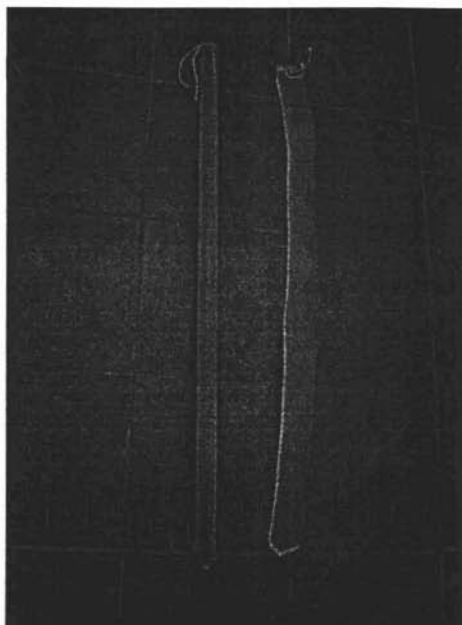


Figura 4.39. Filtro de nylon instalado en un pozo de monitoreo



Figura 4.40. Sujetador de correa para fijar el filtro al pozo de monitoreo

4.8.2. MUESTREADORES

Primero se procedió a fabricar en acrílico los anillos guía (Figura 4.41) y las tapas superiores (Figura 4.42) respetando las especificaciones de diseño, enseguida se fabricaron los soportes y los sujetadores en acero inoxidable, estos últimos con un diámetro interno de 5 mm y un diámetro externo de 10 mm (Figura 4.43). Se realizó el armado, deslizando los anillos guías y los sujetadores a través del soporte y se fijaron con prisioneros con entrada para llave Allen de 3/32'' (Figura 4.44), a la

altura deseada. En la figura 4.45 se observa un muestreador colocado dentro de un pozo de monitoreo.

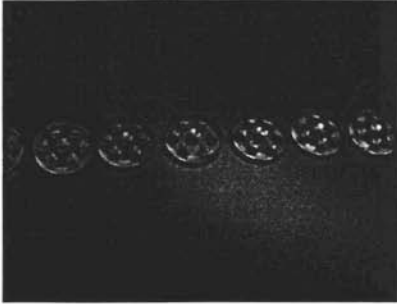


Figura 4.41. Anillos guías



Figura 4.42. Tapa superior del muestreador

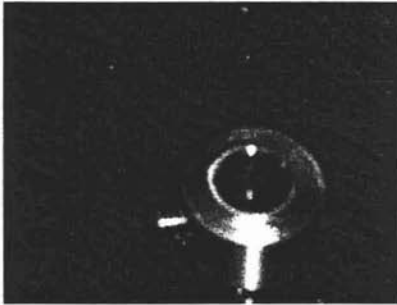


Figura 4.43. Sujetador metálico con tornillo de fijación

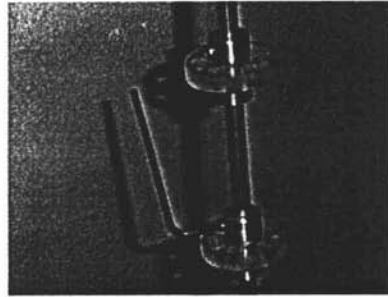


Figura 4.44. Instalación de los anillos guía en el soporte

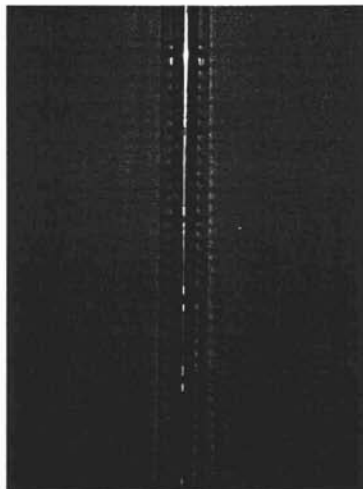


Figura 4.45. Muestreador colocado dentro del pozo de monitoreo

4.8.3. SISTEMA DE OBTENCIÓN DE MUESTRAS

Para el sistema de obtención de muestras se seleccionó la bomba programable de 8 rodillos IPC 780042; las partes más importantes de este equipo son el control central (Figura 4.46) que regula las velocidades de bombeo, el panel de conexión de energía (Figura 4.47.) donde se encuentra el interruptor principal, los cartuchos de plástico para conectar los tubos flexibles de muestreo (Figura 4.48) y el soporte central de 8 rodillos donde se conectan los 24 cartuchos (Figura 4.49).



Figura 4.46. Control central

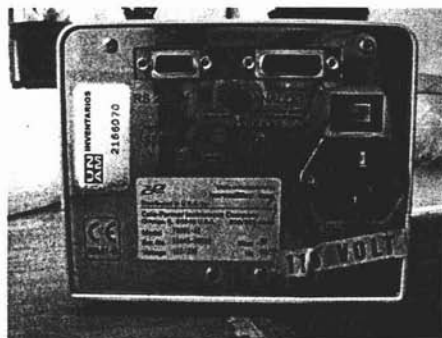


Figura 4.47. Panel de conexión de energía, interruptor principal

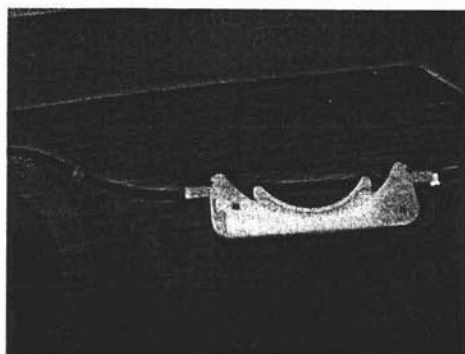


Figura 4.48. Tubo flexible para recolección de muestras ya conectado al cartucho de bombeo

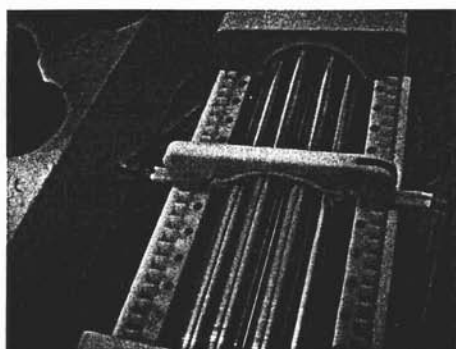


Figura 4.49. Cartucho completo instalado en el soporte central de 8 rodillos

5. PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DEL MODELO EXPERIMENTAL

5.1. ELECCIÓN DEL EMPAQUE

Uno de los criterios para elegir un empaque adecuado fue la conductividad hidráulica del material. En la tabla 5.1 se presentan los intervalos de conductividad hidráulica para los diferentes tipos de materiales:

Tabla 5.1. Valores de conductividad hidráulica según textura

Textura	Conductividad hidráulica (K) m/día
Arena gruesa con grava	10-50
Franco arenosa fina; arena fina	1-5
Franco; franco arcillosa bien estructurada	1-3
Franco arenosa muy fina	0.5-2
Arcilla con grietas	0.5-2
Arena fina	0.2-0.5
Franco arcillosa, arcillosa mal estructurada	0.002-0.2
Arcilla compactada	<0.002

Fuente: (Grassi, 1981).

El material seleccionado para éste estudio en particular fue arena sílice fina (Figura 5.1), debido a que tiene las siguientes características:

- Es un material homogéneo
- Es no-reactivo, esto es, inerte
- La uniformidad en el tamaño de partícula garantiza condiciones de isotropía; es decir, hay un mínimo de perturbaciones en el flujo subterráneo que simula
- El diámetro de partícula promedio es 0.07mm (Tamaño de malla 120)
- El intervalo de su conductividad hidráulica de 0.2 a 0.5 m/día permite un adecuado transporte a través de la matriz de suelo

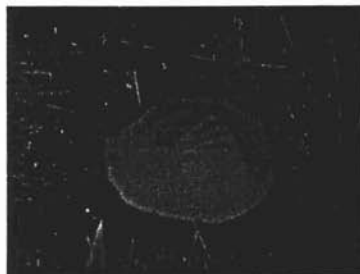


Figura 5.1. Arena sílice fina empleada como material de empaque

Una vez elegido el material de empaque se determinaron sus propiedades más importantes: Conductividad hidráulica, porosidad y densidad. La conductividad hidráulica y la porosidad se obtuvieron con la ayuda de un permeámetro de altura variable y la densidad se calculó por el método del picnómetro (NOM-021-RECNAT-2000) (Tabla 5.2).

Tabla 5.2. Propiedades de la arena fina elegida como material de empaque

Propiedades	Símbolo	Valor	Unidades
Densidad de arena ¹	ρ_s	1.39	g/cm ³
Porosidad ²	n	0.42	adimensional
Conductividad Hidráulica ²	K	0.24	m ² día ⁻¹

¹ Método del picnómetro ² Permeámetro de altura variable

5.2. PROCEDIMIENTO PAR EL EMPACADO DEL MODELO EXPERIMENTAL

Considerando que el material de empaque elegido es homogéneo, esto es, con las mismas características de textura y tamaño de partícula, el procedimiento de empacado es relativamente sencillo. La única consideración es garantizar un empacado uniforme.

Debido a la conformación geométrica del modelo experimental, se consideran los siguientes puntos para un correcto empacado:

- ✓ El modelo debe tener agua antes de agregar el material, para reducir al máximo las burbujas de aire.
- ✓ Iniciar el empacado mediante capas del mismo espesor entre 5 y 10 cm.
- ✓ Dar cierto grado de compactación al material de empaque con la ayuda de un apisonador diseñado según la geometría y dimensiones del modelo, el cual requiere realizar pequeños golpeteos de manera uniforme. Entre cada capa, se recomienda cambiar la dirección del apisonamiento a lo largo y ancho de cada capa, cuidando que la superficie quede alineada horizontalmente.
- ✓ Una vez que se establezca el flujo de agua, es necesario dejarla correr durante un tiempo para garantizar la estabilización del flujo a través del material empacado.
- ✓ Cuando el material alcance la altura del vertedero (50 cm) se puede considerar que el empaque ha concluido a menos que se pretendan realizar estudios en la zona no saturada; para lo cual la altura máxima de diseño no debe sobrepasar los 80 cm.

En caso de emplear otro material de empaque o una mezcla de materiales para establecer un perfil mixto en el modelo experimental, es necesario que se sigan las consideraciones antes mencionadas.

5.3. INSTALACIÓN DE LOS POZOS DE MONITOREO

La instalación de los pozos de monitoreo obedece a dos procedimientos básicos: La conformación de la malla de muestreo y el hincado de los pozos.

5.3.1. CONFORMACIÓN DE LA MALLA DE MUESTREO

La conformación de la malla de muestreo esta en función del número de pozos de monitoreo disponibles; en el caso del modelo experimental diseñado se consideraron 8 pozos de monitoreo. A partir de este número de pozos se tienen 2 alternativas (Figura 5.2).

- ⇒ Conformación rectangular
- ⇒ Conformación en diagonal

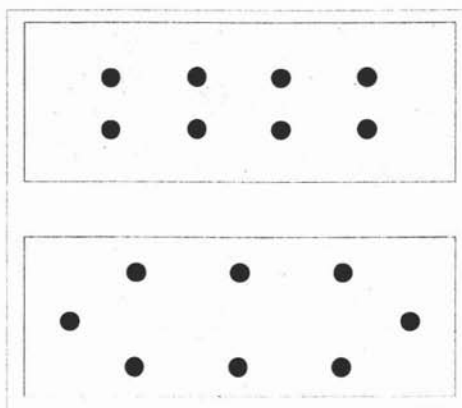


Figura 5.2. Conformación de la malla de muestreo (arriba) rectangular, (abajo) en diagonal

La alternativa elegida fue la conformación en diagonal debido a que se consideró que existe una mejor distribución del flujo a través de la geometría del modelo.

5.3.2. HINCADO DE LOS POZOS

Una vez empacado el modelo experimental hasta la altura del vertedero se procedió a realizar el hincado de los pozos de monitoreo. Para ello fue necesario seguir las siguientes consideraciones:

- ⇒ Utilizar un tubo hueco de 40 mm de diámetro interior con filo en la parte inferior. El diámetro de este tubo es mayor que el diámetro de los pozos.
- ⇒ Se introduce el tubo en cada uno de los puntos dispuestos según la conformación de malla elegida.
- ⇒ Se retira el material de empaque del interior del tubo, utilizando una cucharilla de metal con mango largo.
- ⇒ Se retira el tubo hueco. Con la ayuda de un mazo de hule se hincan los pozos de monitoreo hasta alcanzar la profundidad máxima, cuidando mantener la verticalidad de los pozos de monitoreo. (Figura 5.3).

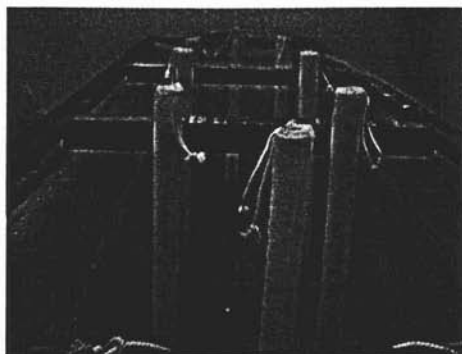


Figura 5.3. Instalación de los pozos de monitoreo antes de rellenar la zona no saturada

Si el estudio en consideración va a considerar existencia de zona no saturada, después del hincado de los pozos se debe continuar con el empacado del material hasta alcanzar la altura máxima.

5.4. ACONDICIONAMIENTO DE MUESTREADORES

Una vez instalado los pozos de monitoreo, se procedió a introducir los muestreadores en ellos (Figura 5.4). En cada muestreador se dispusieron los tres tubos flexibles a 15, 30 y 45 cm con respecto al fondo del muestreador y a su vez estos se conectaron a la bomba para probar el sistema (Figura 5.55).

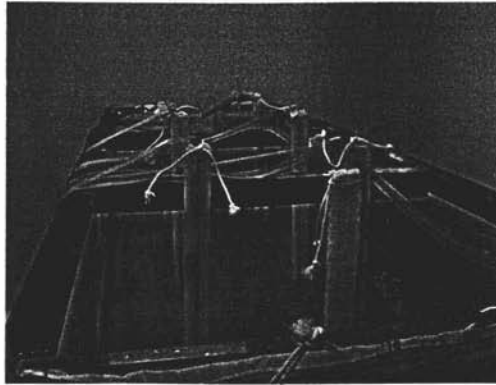


Figura 5.4. Instalación de los muestreadores en los pozos de monitoreo

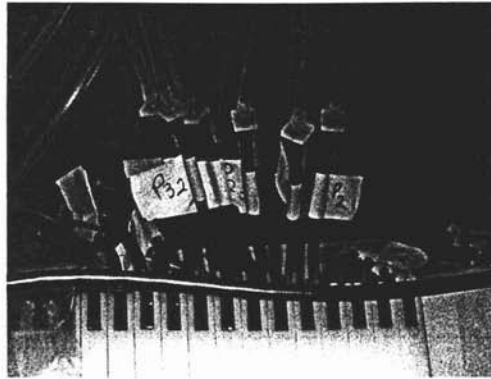


Figura 5.5. Conexión de los tubos flexibles a la bomba de cabezales múltiples

5.5. PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE INDUCCIÓN DE FLUJO HIDRÁULICO

Para la puesta en funcionamiento del sistema de inducción de flujo hidráulico se tiene el siguiente procedimiento:

- ⇒ Cerrar completamente la válvula reguladora para evitar pérdida de agua; se mantendrá cerrada hasta que el tanque de alimentación primario esté lleno y se cierre la válvula con flotador. Este punto se tiene que realizar por primera vez y se mantendrá así, para garantizar las condiciones de homogeneidad de flujo a la entrada del modelo experimental.

- ⇒ Verificar que todas las válvulas del sistema de drenaje se encuentren cerradas.
- ⇒ Abrir la válvula reguladora y esperar a que la sección de empacado se inunde hasta la altura del vertedero.
- ⇒ Abrir la válvula principal de drenaje, para permitir la salida del agua y evitar inundación arriba de la altura del vertedero.

Una vez establecidos estos pasos, se considera que se ha estabilizado el sistema de inducción de flujo hidráulico y el modelo experimental se encuentra listo para la experimentación.

5.6. SELECCIÓN DEL TRAZADOR

Fue necesario definir la sustancia a emplear como trazador. Un trazador es una sustancia que se puede monitorear de forma sencilla y que permite describir su distribución en la matriz en estudio; estableciendo líneas de flujo y tiempos de tránsito, así como para simular el comportamiento real de contaminantes en el subsuelo, en la zona saturada.

El trazador que se va utilizar no debe de tener interacciones con la matriz del suelo, siendo estable química y biológicamente y además que se pueda detectar en bajas concentraciones. Por lo cual se decidió utilizar una sal inorgánica como el NaCl (Barth et al., 2001) para la prueba del funcionamiento del modelo experimental.

5.7. CURVA DE CALIBRACIÓN

La conductividad eléctrica de un medio se define como la capacidad que tienen el medio (que por lo general contiene las sales inorgánicas en solución o electrolitos) para conducir la corriente eléctrica. El agua pura, prácticamente no conduce la corriente, sin embargo, el agua con sales disueltas conduce la corriente eléctrica. Los iones cargados positiva y negativamente son los que conducen la corriente, y la cantidad conducida dependerá del número de iones presentes y de su movilidad. En la mayoría de las soluciones acuosas, entre mayor sea la cantidad de sales disueltas, mayor será la conductividad.

Para medir la concentración del NaCl disuelto y obtener la curva de calibración que permita conocer la relación que existe entre la concentración de la sal y la conductividad eléctrica, se utilizó un conductímetro portátil marca YSI modelo 85 (Figura 5.6).

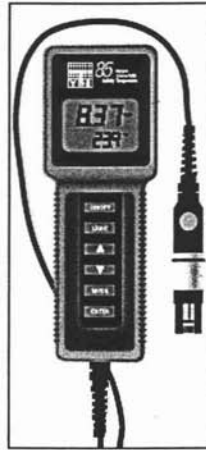


Figura 5.6. Conductímetro portátil para la detección de sales inorgánicas

Se prepararon 22 disoluciones de NaCl y con el conductímetro se midió su conductividad eléctrica. En la tabla 5.3 se muestran la curva de calibración de conductividad eléctrica (μS) contra concentración de NaCl (g/l) y en la figura 5.7 se muestra la representación gráfica de la tabla 5.3.

Tabla 5. 3 Curva de calibración de la conductividad eléctrica (μS) contra la concentración de NaCl (g/l)

Conductividad eléctrica μS	NaCl g/l	Conductividad eléctrica μS	NaCl g/l
228.60	0.22	8730.00	13.35
237.80	0.32	12400.00	19.35
310.70	0.42	17570.00	25.00
352.90	0.56	20850.00	31.64
400.50	1.00	33260.00	47.80
698.00	0.80	41260.00	63.10
1460.00	2.60	45250.00	66.10
2470.00	2.42	51750.00	78.02
2850.00	5.60	58250.00	85.00
4760.00	6.30	64750.00	93.10
5630.00	10.90	71250.00	106.70

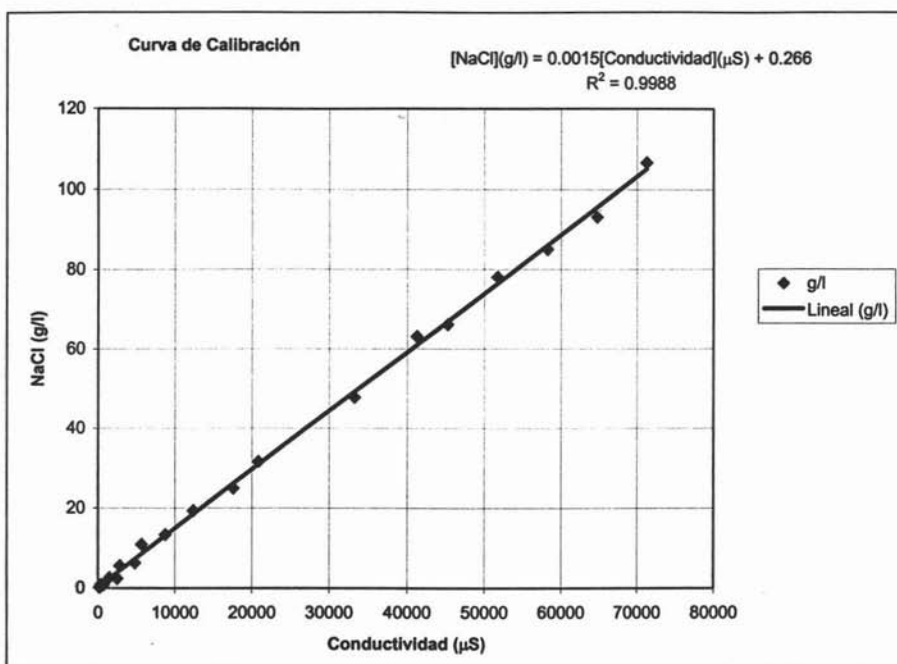


Figura 5.7. Curva de calibración concentración de cloruro de sodio (g/l) vs conductividad eléctrica (μS)

5.8. PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO DEL MODELO EXPERIMENTAL

Con el modelo experimental ya empacado, los pozos de monitoreo y los muestreadores instalados, el sistema de inducción de flujo en operación, la selección del trazador y la curva de calibración; se procedió a realizar la prueba de funcionamiento del modelo experimental.

Se prepararon 20 litros de solución de cloruro de sodio con una concentración de 110 g/l.

Se alimentó la solución de cloruro de sodio en la sección de inundación de entrada (Figura 5.8.).



Figura 5.8. Alimentación de la solución de NaCl en la sección de inundación de entrada

Se realizó la identificación de los pozos de monitoreo (Figura 5.9) y de los tubos flexibles (Figura 5.10).

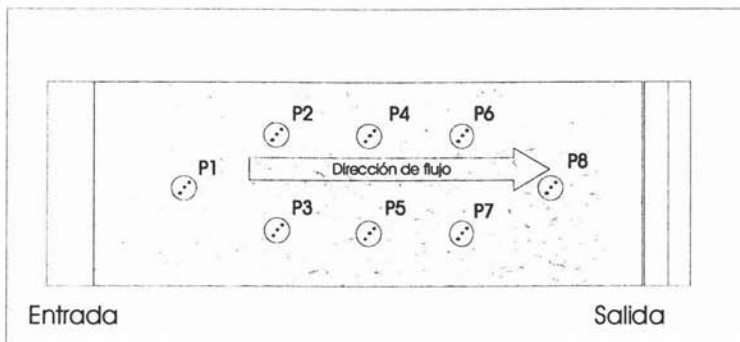


Figura 5.9. Identificación de los pozos de monitoreo



Figura 5.10. Etiquetado de los tubos flexibles

Se inició el muestreo en los 8 pozos, a 3 diferentes profundidades en cada pozo, además (Figura 5. 11) de los 6 puntos de muestreo en el fondo del modelo experimental. El muestreo se realizó cada 2 horas, durante un tiempo total de operación de 60 horas.



Figura 5. 11 Sistema de muestreo en operación

A cada muestra se le determinó por triplicado la conductividad eléctrica, utilizando el conductímetro portátil.

5.9. RESULTADOS DE LA PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO DEL MODELO EXPERIMENTAL

Una vez terminada la prueba del funcionamiento del modelo experimental se procedió a la interpretación de la información obtenida.

La ubicación de los 30 puntos muestreados a través de todo el volumen del modelo experimental se muestra en la Figura 5.12 y en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4. Ubicación de los Pozos de monitoreo y de los puntos de drenado

Pozo de monitoreo (#, nivel)	Ubicación (cm)		
	X	Y	Z
Pozo 1	30	36	45
	29	37	30
	29.5	38	15
Pozo 2	61	51.25	45
	62	50.25	30
	63	49.25	15
Pozo 3	60	17.25	45
	59	18.25	30
	58	19.25	15
Pozo 4	91	50.5	45
	92	49.5	30
	93	48.5	15
Pozo 5	90	16.5	45
	89	17.5	30
	88	18.5	15
Pozo 6	121	51	45
	122	50	30
	123	49	15
Pozo 7	120	17	45
	119	18	30
	118	19	15
Pozo 8	151	35	45
	150	34	30
	149	33	15
Punto de drenado en el fondo	Ubicación (cm)		
	X	Y	Z
PD1	64	48.25	0
PD2	57	20.25	0
PD3	94	47.5	0
PD4	87	19.5	0
PD5	124	48	0
PD6	117	20	0

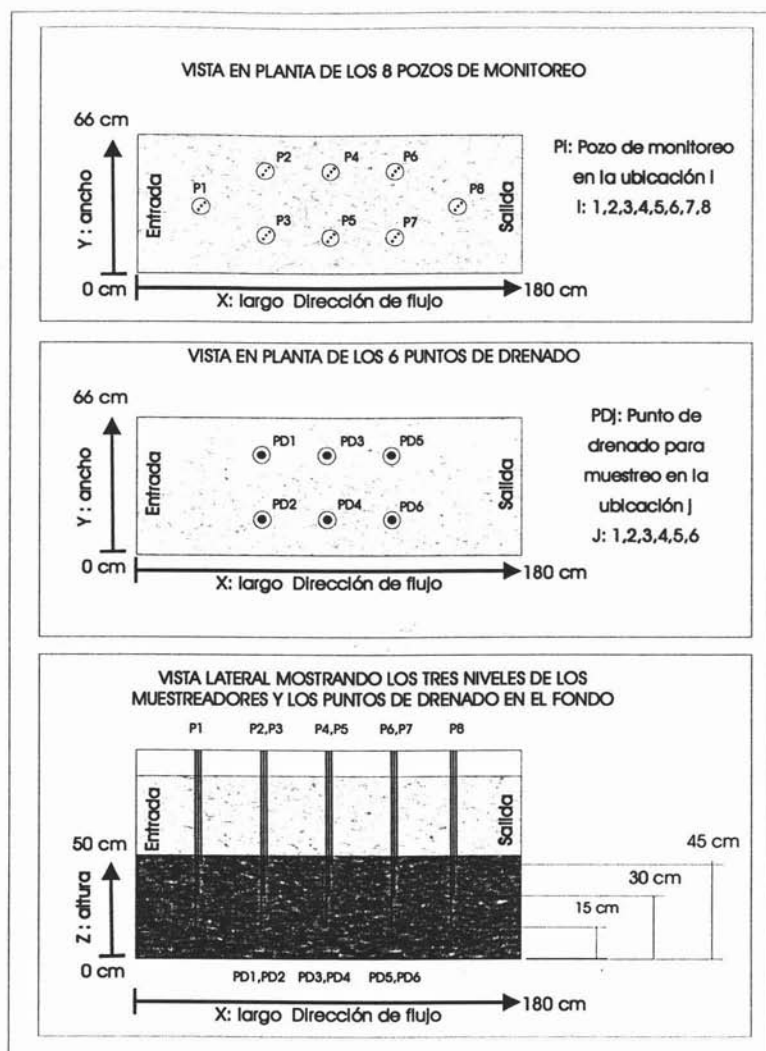


Figura 5.12. Vista en planta de los pozos de monitoreo (arriba) Vista en planta de los puntos de drenado (en medio) y Vista lateral mostrando los tres niveles de los muestreadores y los puntos de drenado en el fondo

Las concentraciones de NaCl se obtuvieron a partir de la curva de calibración. En la tabla 5.5 se presentan las concentraciones promedio en cada punto de muestreo lo cual corresponde a la distribución del NaCl dentro de la sección de empaque del modelo experimental en el tiempo que duró la prueba que fueron 60 horas (En el Anexo I se presenta en detalle esta tabla, mostrando porcentaje de variabilidad, desviación estándar, promedio y las tres repeticiones).

Tabla 5. 5. Concentración promedio de NaCl en los 8 pozos de monitoreo y en los 6 puntos de drenado en el fondo, durante la prueba de funcionamiento del modelo experimental

Tiempo (h)	Concentración de NaCl (g/l)																															
	Pozo 1			Pozo 2			Pozo 3			Pozo 4			Pozo 5			Pozo 6			Pozo 7			Pozo 8			Puntos de drenado en el fondo							
	Altura a partir del fondo (cm)			Altura a partir del fondo (cm)			Altura a partir del fondo (cm)			Altura a partir del fondo (cm)			Altura a partir del fondo (cm)			Altura a partir del fondo (cm)			Altura a partir del fondo (cm)			Altura a partir del fondo (cm)			Altura a partir del fondo (cm)			1	2	3	4	5
0	0.21	0.21	0.22	0.22	0.21	0.21	0.21	0.21	0.20	0.21	0.22	0.21	0.21	0.22	0.22	0.21	0.22	0.24	0.22	0.23	0.23	0.24	0.24	0.25	0.23	0.21	0.21	0.20				
2	1.07	2.36	4.27	0.48	0.54	0.60	1.60	1.78	1.98	0.71	0.79	0.88	0.40	0.46	0.52	0.23	0.24	0.26	0.26	0.26	0.27	0.26	0.27	0.28	0.27	0.27	0.60	0.98	2.20	0.90		
4	64.93	82.58	87.08	0.53	1.32	1.88	7.01	7.79	8.66	3.84	4.27	4.75	1.18	1.35	1.55	0.26	0.28	0.30	0.30	0.31	0.32	0.37	0.37	0.39	0.32	0.32	1.77	5.27	9.62	3.49		
6	65.14	74.94	81.60	0.92	4.07	8.38	21.08	23.42	26.03	8.74	9.71	10.79	2.07	2.36	2.71	0.32	0.34	0.36	0.38	0.39	0.40	0.46	0.46	0.48	0.40	0.38	3.10	11.99	28.92	9.26		
8	55.22	68.96	74.16	1.10	4.88	10.04	23.74	26.38	29.31	12.44	13.82	15.35	2.66	3.05	3.49	0.35	0.36	0.40	0.45	0.46	0.47	0.52	0.52	0.55	0.48	0.43	3.99	17.06	32.56	11.53		
10	46.59	61.87	62.42	1.48	6.82	13.18	26.50	29.44	32.71	13.55	15.06	16.73	4.61	5.27	6.03	0.44	0.47	0.50	0.60	0.61	0.63	0.69	0.70	0.73	0.64	0.53	6.90	18.59	36.34	17.53		
12	39.66	53.50	56.20	2.41	8.09	17.63	28.77	31.97	35.52	15.20	16.89	18.76	5.27	6.03	6.90	0.54	0.58	0.62	0.87	0.89	0.91	0.88	0.89	0.94	0.93	0.85	7.89	20.85	39.46	27.27		
14	34.37	49.20	51.52	3.79	11.79	25.90	31.91	35.45	39.39	17.08	18.98	21.08	6.06	6.94	7.93	0.61	0.65	0.69	1.19	1.22	1.25	1.03	1.04	1.09	1.27	0.74	9.08	23.43	43.77	45.02		
16	29.60	43.22	46.33	5.23	17.31	43.15	35.96	39.96	44.40	18.75	20.83	23.15	7.18	8.21	9.39	2.79	2.96	3.15	1.73	1.77	1.80	1.30	1.31	1.37	1.84	3.36	10.75	25.72	49.33	63.85		
18	25.90	40.24	40.98	7.96	24.36	60.58	43.51	48.34	53.71	20.46	22.73	25.25	7.69	8.80	10.07	6.36	6.76	7.19	2.03	2.07	2.11	1.55	1.57	1.64	2.16	7.85	11.52	28.06	59.68	82.52		
20	24.20	35.22	37.47	9.35	26.32	75.30	48.96	54.39	60.44	22.45	24.95	27.72	8.66	10.14	11.60	7.27	7.73	8.22	3.28	3.35	3.42	1.90	1.92	2.01	3.49	8.75	13.28	30.80	67.15	98.27		
22	22.13	32.25	35.69	8.10	23.51	65.49	53.22	59.14	65.71	24.69	27.44	30.49	10.31	11.80	13.50	8.60	9.15	9.73	3.98	4.07	4.15	2.54	2.57	2.69	4.24	10.35	15.44	33.87	73.01	91.80		
24	21.18	28.29	32.36	6.88	22.19	59.62	55.74	61.94	68.82	28.96	32.17	35.75	11.81	13.51	15.46	10.60	11.28	12.00	4.77	4.88	4.98	3.45	3.48	3.64	5.09	12.76	17.68	39.72	76.46	80.69		
26	18.50	25.92	28.69	6.10	20.72	51.62	62.20	69.12	76.80	31.78	35.31	39.24	13.48	15.42	17.64	12.40	13.19	14.03	5.72	5.85	5.97	4.54	4.58	4.80	6.10	14.92	20.19	43.59	85.33	74.06		
28	16.07	21.87	25.59	5.18	18.44	47.72	71.56	79.51	88.34	34.13	37.92	42.13	15.27	17.47	19.99	15.25	16.22	17.25	6.74	6.89	7.04	6.22	6.28	6.58	7.19	18.36	22.87	46.81	98.16	67.38		
30	13.08	19.75	23.10	4.61	16.21	41.10	71.27	79.18	87.98	38.48	42.76	47.51	18.45	21.11	24.15	18.14	19.30	20.53	8.06	8.24	8.41	7.49	7.57	7.92	8.59	21.84	27.63	52.79	97.76	60.96		
32	11.84	17.33	21.84	4.01	14.13	37.45	62.00	68.89	76.55	42.40	47.12	52.35	20.86	23.86	27.30	21.39	22.75	24.20	8.77	8.96	9.18	10.07	10.17	10.85	9.35	25.75	31.24	58.17	85.05	55.74		
34	9.62	15.30	18.55	3.48	11.93	32.38	56.35	62.61	69.57	47.77	53.07	58.97	23.67	27.08	30.99	23.36	24.85	26.44	10.12	10.33	10.56	12.55	12.68	13.27	10.78	28.12	35.45	65.52	77.30	51.97		
36	8.83	14.13	15.97	3.23	11.13	28.20	48.84	54.26	60.29	55.70	61.89	68.77	26.64	30.48	34.88	26.07	27.73	29.50	11.30	11.54	11.79	14.75	14.90	15.60	12.04	31.39	39.91	76.41	66.99	46.69		
38	7.97	12.63	13.31	2.89	10.11	25.80	43.71	48.57	53.96	62.06	68.95	76.61	28.23	32.30	36.95	33.13	35.24	37.49	15.00	15.32	15.65	17.45	17.63	18.46	15.99	39.89	42.28	85.13	59.96	42.09		
40	6.90	10.70	12.35	2.54	9.38	21.63	38.30	42.55	47.28	66.06	73.40	81.55	33.64	38.49	44.04	41.14	43.77	46.56	17.66	18.03	18.42	20.16	20.36	21.32	18.82	49.53	50.39	90.61	52.54	38.87		
42	6.14	9.07	11.74	2.17	8.49	19.57	36.35	40.39	44.88	58.77	65.30	72.56	39.31	44.98	51.46	52.12	55.45	58.99	20.33	20.76	21.21	23.34	23.58	24.69	21.66	62.75	58.88	80.62	49.87	34.50		
44	5.17	7.91	10.58	1.94	7.99	16.49	34.51	38.34	42.60	52.45	58.28	64.75	47.09	53.88	61.85	55.81	59.37	63.16	24.39	24.91	25.44	26.23	26.50	27.75	25.99	67.20	70.53	71.95	47.34	31.26		
46	4.56	7.39	9.53	1.66	7.00	14.40	30.83	34.25	38.06	49.02	54.46	60.52	52.85	60.47	69.18	72.00	76.87	81.48	27.82	28.42	29.03	30.83	31.14	32.61	29.65	86.68	67.24	42.29	27.96			
48	4.12	6.35	8.90	1.44	6.09	12.39	29.01	32.24	35.82	44.61	49.57	55.07	60.17	68.85	78.77	75.28	80.08	85.20	35.44	36.20	36.97	36.54	36.91	38.65	37.77	90.63	90.13	61.19	39.80	25.73		
50	3.56	5.51	7.75	1.26	5.15	11.06	27.53	30.58	33.98	39.56	43.96	48.84	54.35	62.19	71.15	67.08	71.36	75.91	42.50	43.41	44.34	41.33	41.74	43.71	45.29	80.76	81.41	54.27	37.76	22.30		
52	3.00	4.53	6.91	1.12	4.69	10.05	23.70	26.33	29.26	34.14	37.93	42.14	46.58	53.29	60.97	57.63	61.31	65.22	50.87	51.96	53.08	50.73	51.24	53.66	54.22	69.38	69.76	46.83	32.51	21.29		
54	2.60	4.11	5.90	1.00	4.25	8.35	20.43	22.69	25.22	30.41	33.79	37.55	41.11	47.03	53.81	53.53	56.95	60.58	61.87	63.19	64.55	55.13	55.69	58.32	65.93	64.45	61.57	41.72	28.02	19.14		
56	2.31	3.79	5.50	0.94	3.60	7.29	18.23	20.25	22.50	27.27	30.30	33.67	36.79	42.10	48.17	46.84	49.82	53.00	76.03	77.66	79.33	66.41	67.08	70.24	81.03	56.39	55.11	37.41	25.00	16.65		
58	2.08	3.22	5.12	0.81	3.23	6.10	17.43	19.37	21.52	24.23	26.92	29.92	34.33	39.27	44.94	43.81	46.60	49.58	79.66	81.37	83.12	79.81	80.61	84.41	84.90	52.74	51.42	33.24	23.91	15.17		
60	1.67	2.99	4.66	0.72	2.83	5.19	15.45	17.17	19.08	22.57	25.08	27.96	29.53	33.79	38.66	39.51	42.03	44.72	71.74	73.28	74.85	71.55	72.27	75.68	76.45	47.57	44.23	30.96	21.20	12.26		

5.10. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO DEL MODELO EXPERIMENTAL

Con la información obtenida se construyeron las curvas por pozos y por niveles para observar el comportamiento de la concentración del cloruro de sodio con respecto al tiempo de operación. De la figura 5.13 a la figura 5.16 se muestran las representaciones gráficas correspondientes a dicho comportamiento.

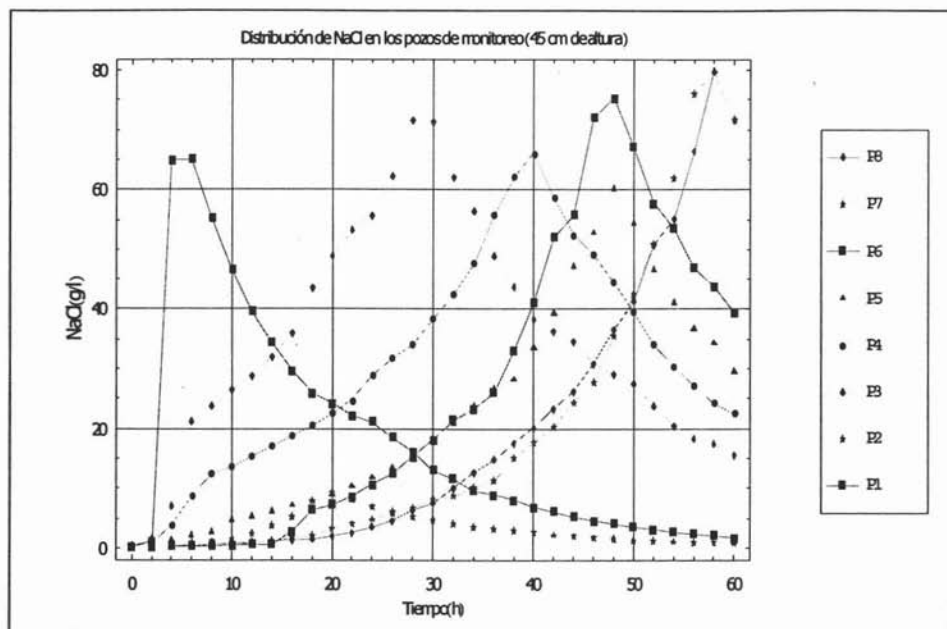


Figura 5.13. Comportamiento de la concentración de NaCl (g/l) vs tiempo de operación (h) en cada pozo a 45 cm a partir del fondo

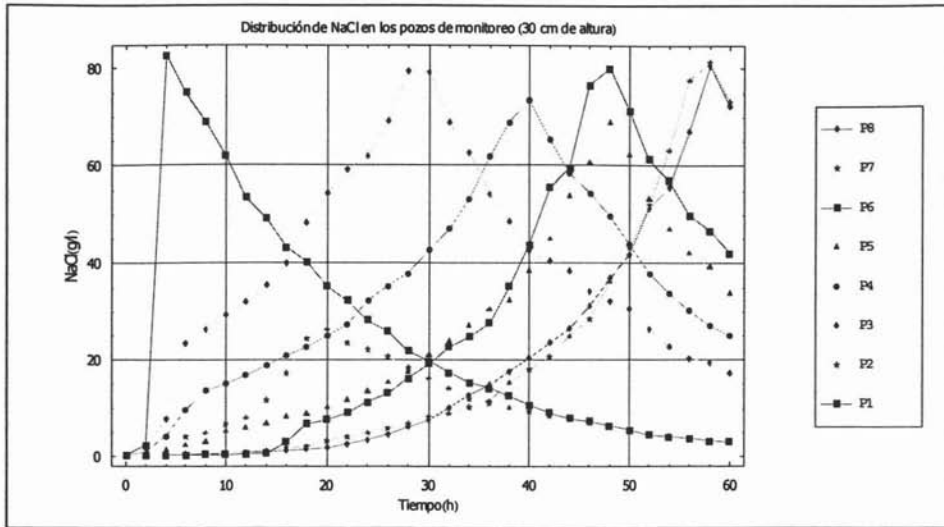


Figura 5.14. Comportamiento de la concentración de NaCl (g/l) vs tiempo de operación (h) en cada pozo a 30 cm a partir del fondo

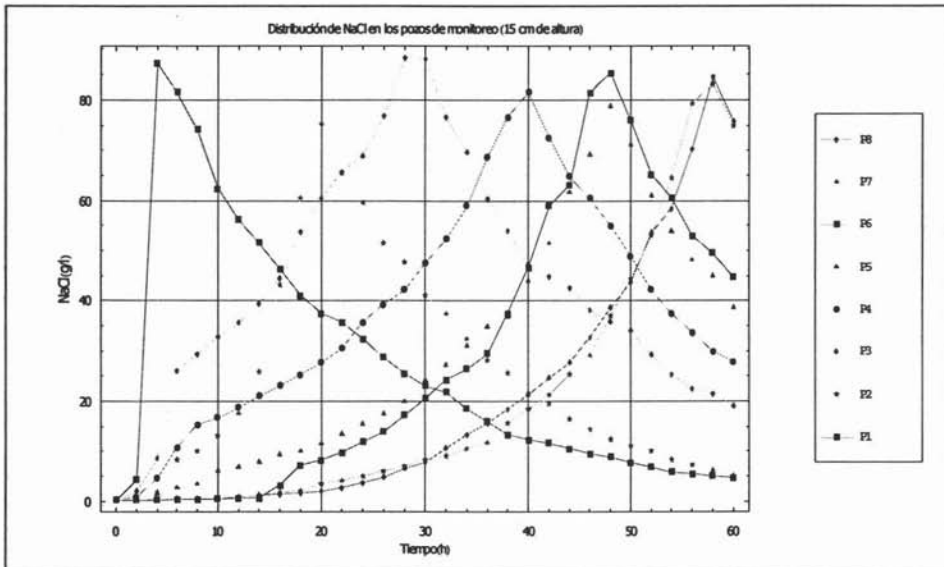


Figura 5.15. Comportamiento de la concentración de NaCl (g/l) vs tiempo de operación (h) en cada pozo a 15 cm a partir del fondo

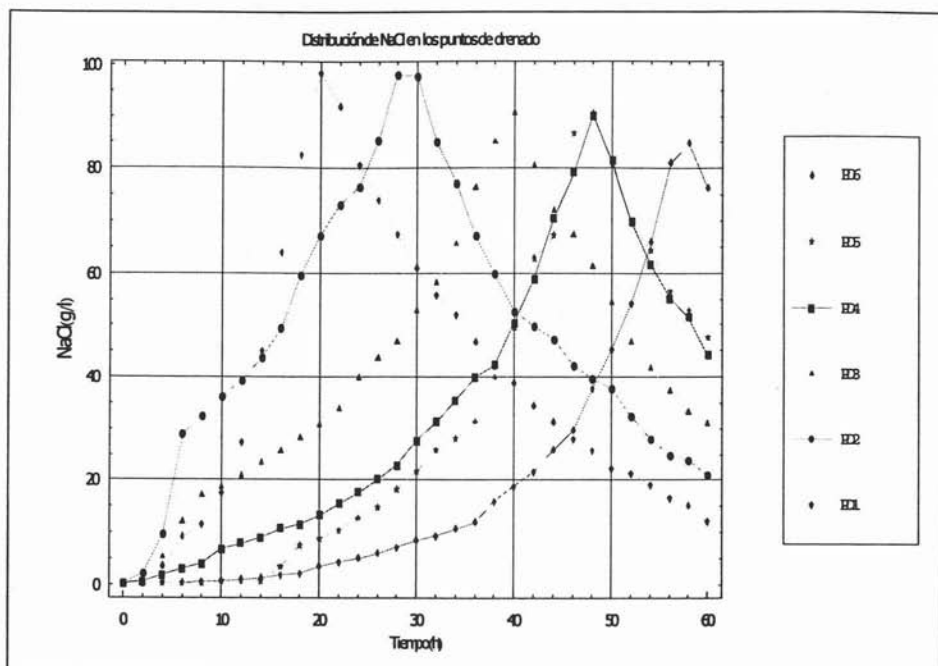


Figura 5.16. Comportamiento de la concentración de NaCl (g/l) vs tiempo de operación (h) en cada punto de drenaje en el fondo del modelo experimental

Una vez que se conoció la concentración de NaCl en cada punto de muestreo con respecto al tiempo, se representó en forma gráfica el perfil de distribución del cloruro de sodio en la zona saturada durante el tiempo de operación del modelo experimental, por lo que se hicieron gráficas de contorno y de superficie, para las cuales se empleó el programa *Golden Software Surfer* versión 8. El algoritmo de trazado para estas gráficas se calculó a partir del modelo geoestadístico de interpolación lineal Kriging (Cressie, N. A. C., 1990), que considera las variaciones de los puntos experimentales, así como las condiciones de isotropía y anisotropía en el modelo experimental.

A partir de lo anterior se obtuvieron gráficas de contorno como se describe enseguida durante todo el tiempo que duro la prueba con lecturas cada 2 horas: (Figura 5.17).

- en el plano X-Y que corresponde a largo-ancho del modelo experimental, esto es vista en planta.
- en el plano X-Z que corresponde a largo-altura del modelo experimental, esto es vista de sección.
- en X-Y-Z que corresponde a una vista tridimensional

Figura 5. 17. Mapas de contorno y superficie obtenidos durante la prueba de funcionamiento del modelo experimental utilizando NaCl como trazador

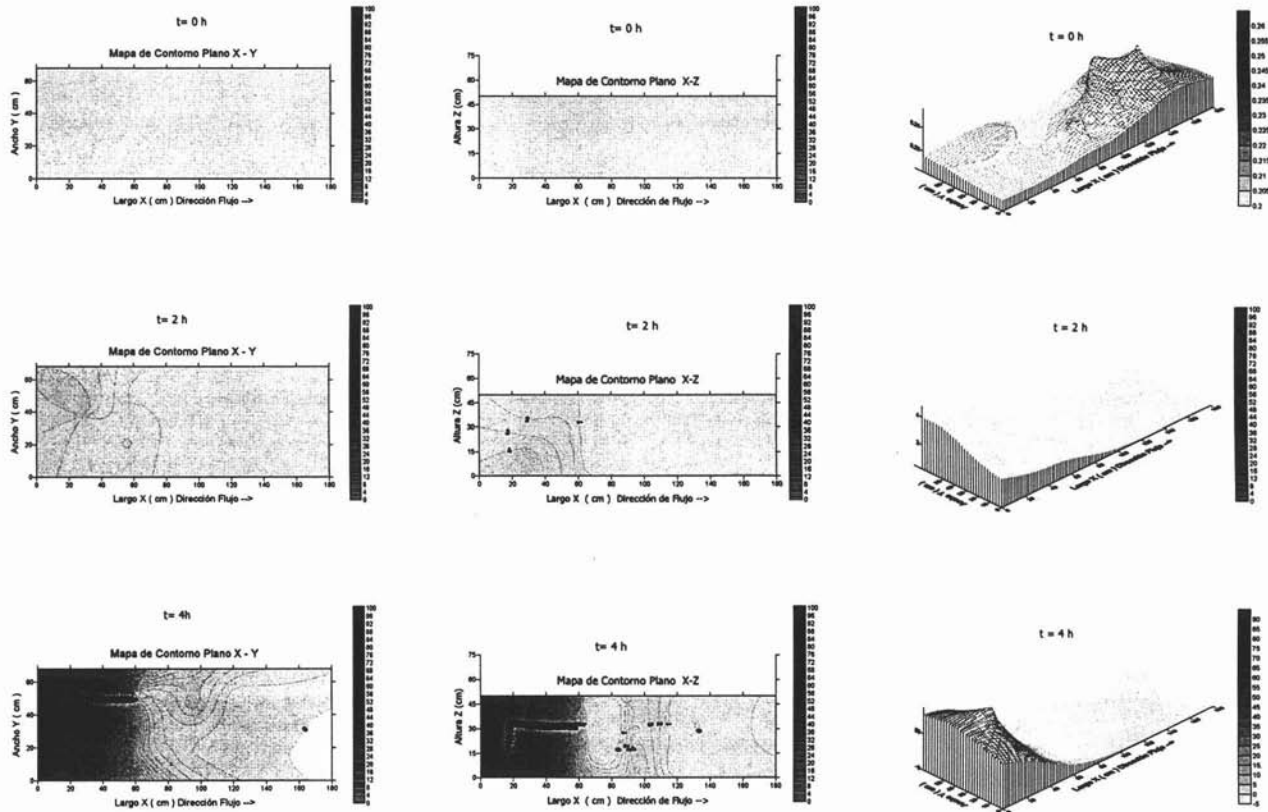


Figura 5. 17. Mapas de contorno y superficie obtenidos durante la prueba de funcionamiento del modelo experimental utilizando NaCl como trazador

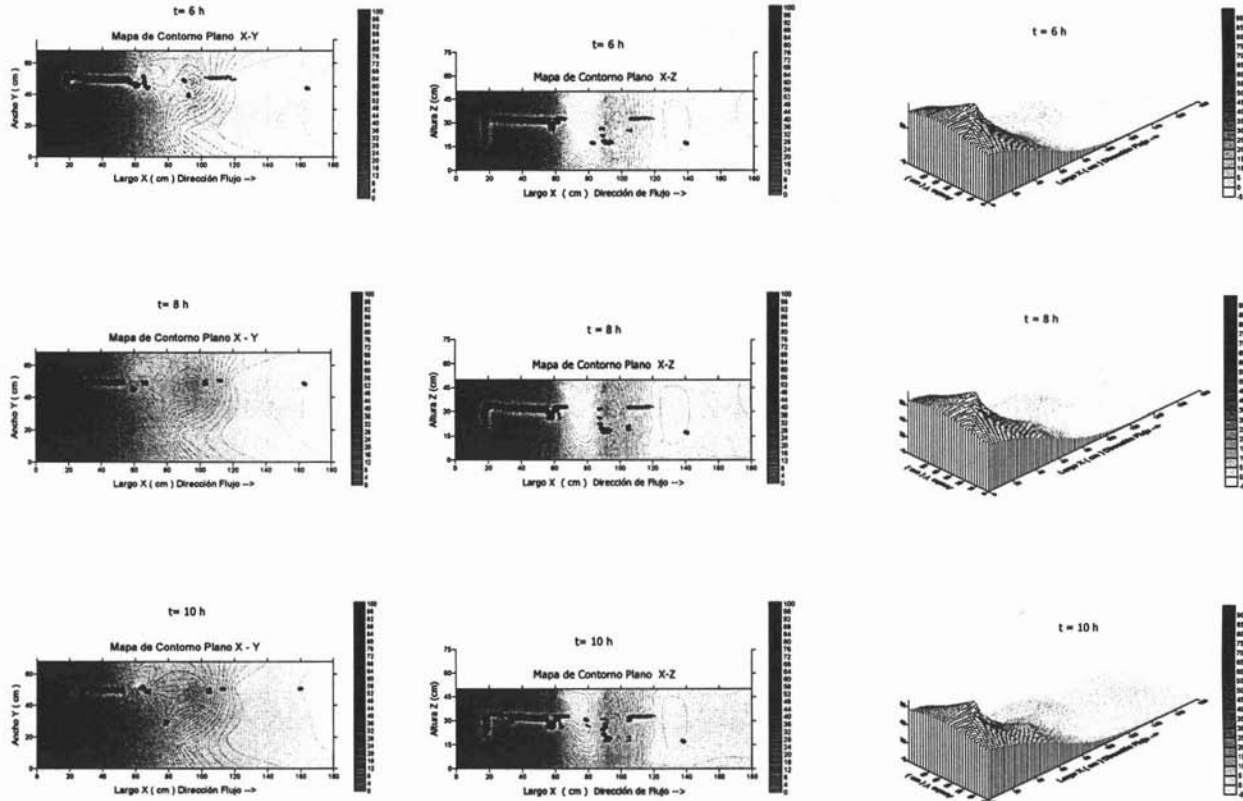


Figura 5. 17. Mapas de contorno y superficie obtenidos durante la prueba de funcionamiento del modelo experimental utilizando NaCl como trazador

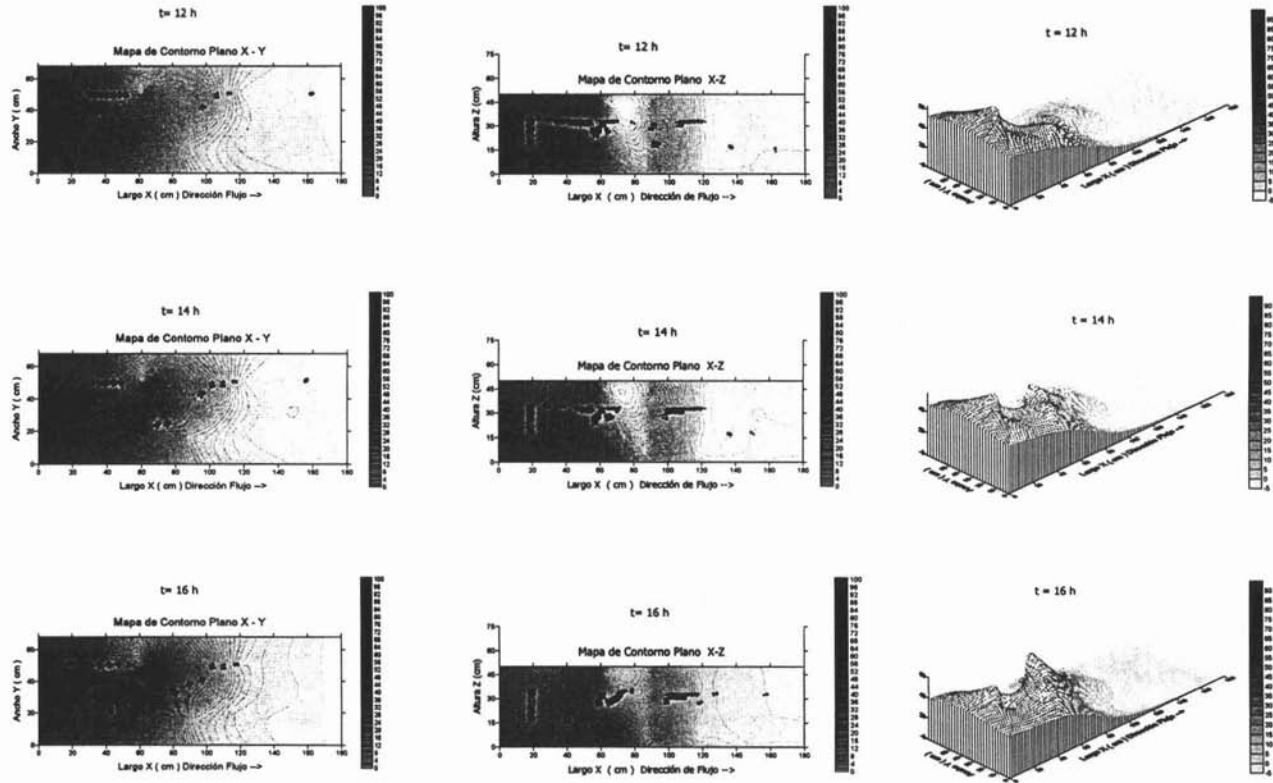


Figura 5. 17. Mapas de contorno y superficie obtenidos durante la prueba de funcionamiento del modelo experimental utilizando NaCl como trazador

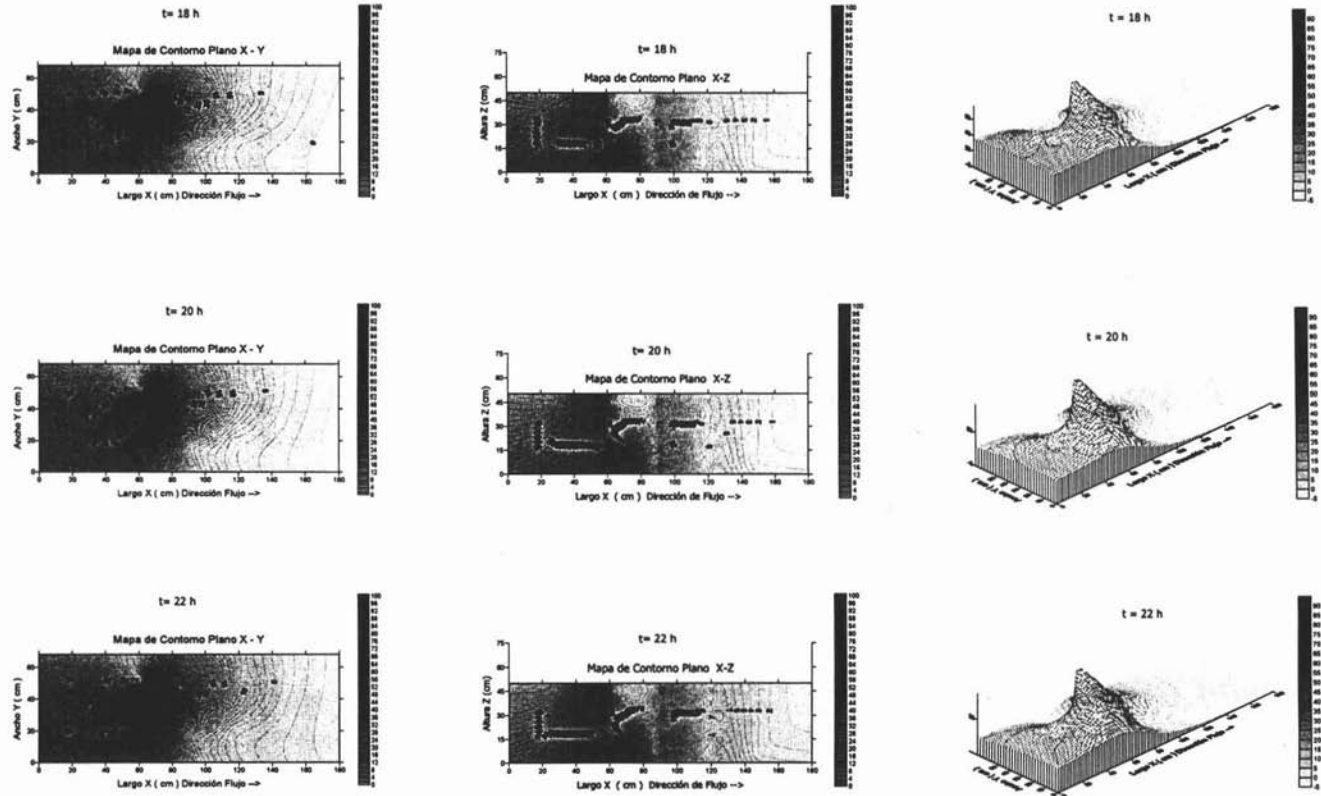


Figura 5. 17. Mapas de contorno y superficie obtenidos durante la prueba de funcionamiento del modelo experimental utilizando NaCl como trazador

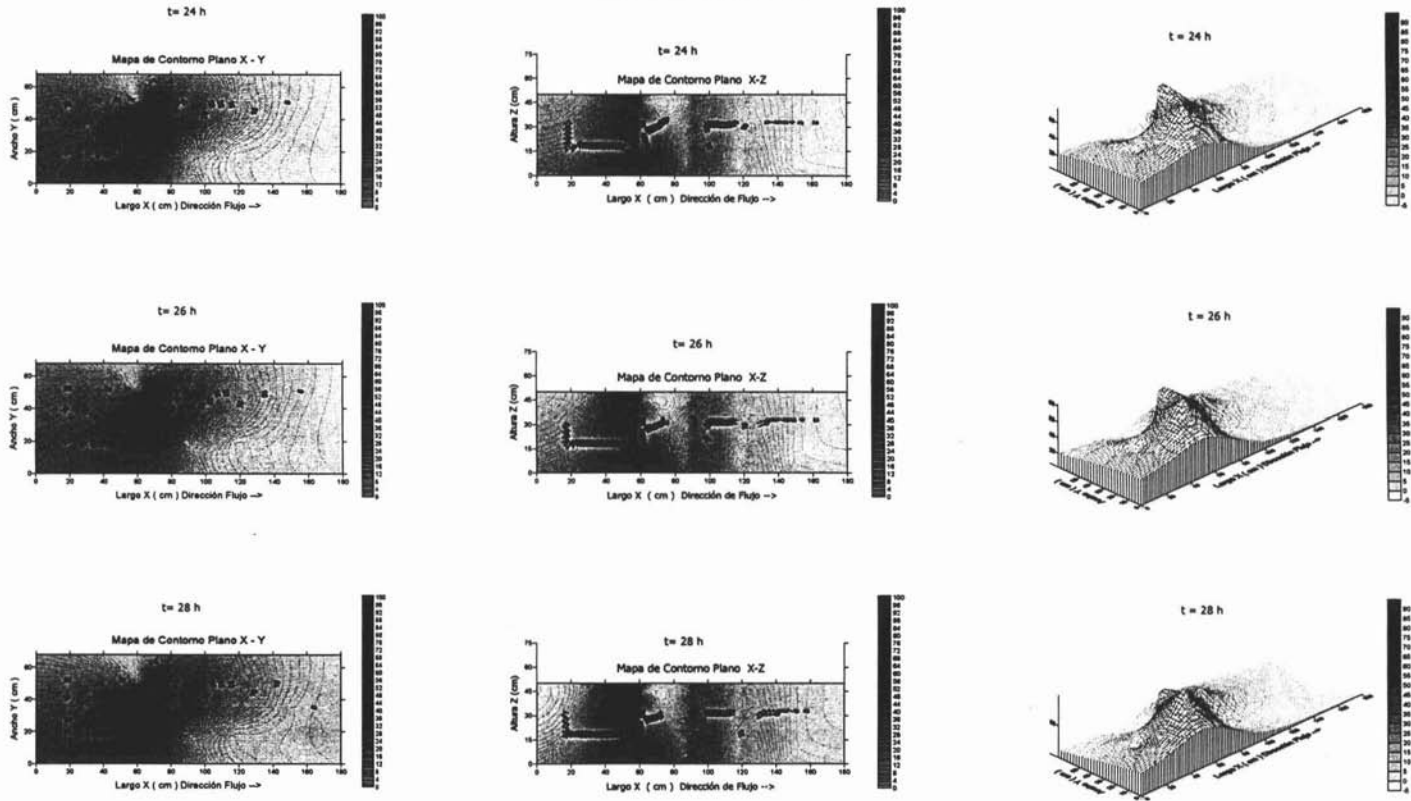


Figura 5. 17. Mapas de contorno y superficie obtenidos durante la prueba de funcionamiento del modelo experimental utilizando NaCl como trazador

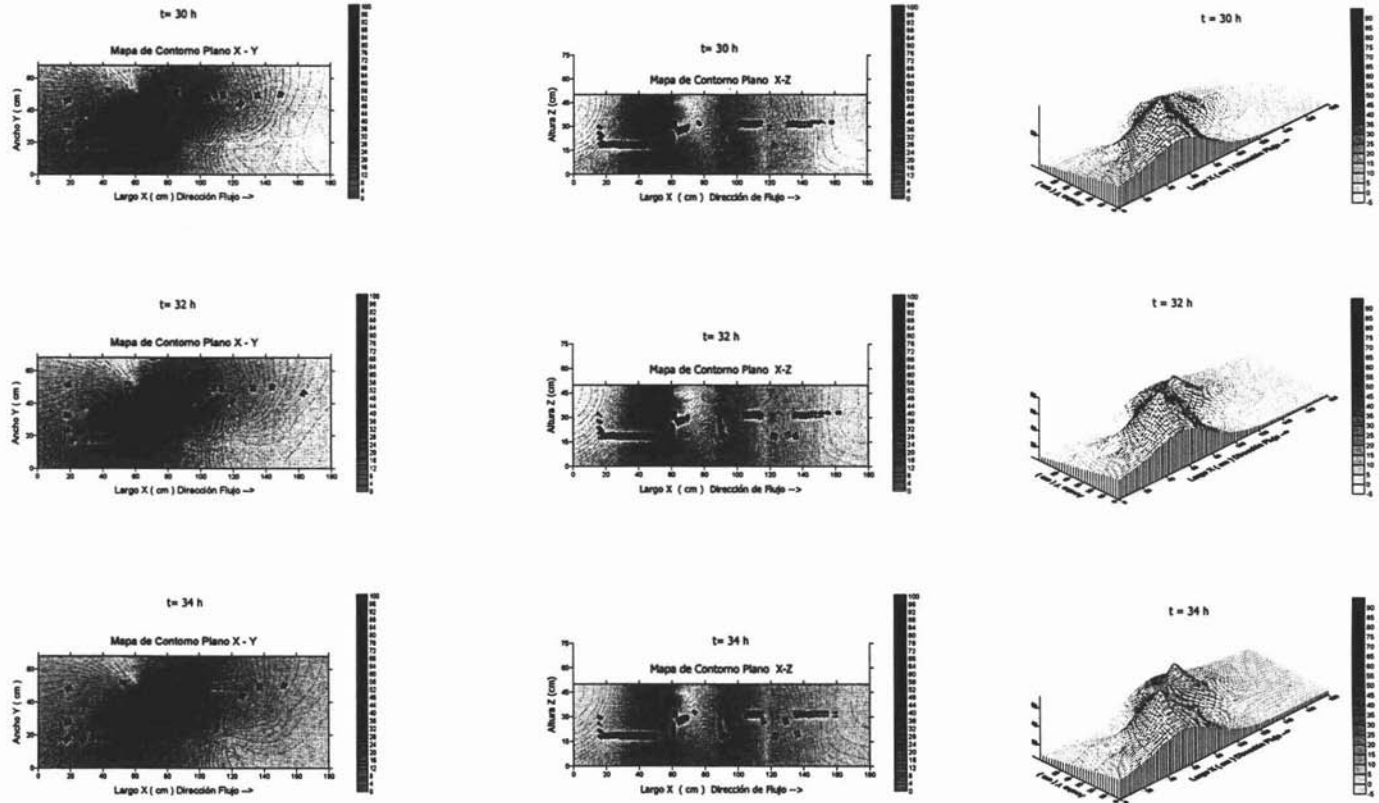
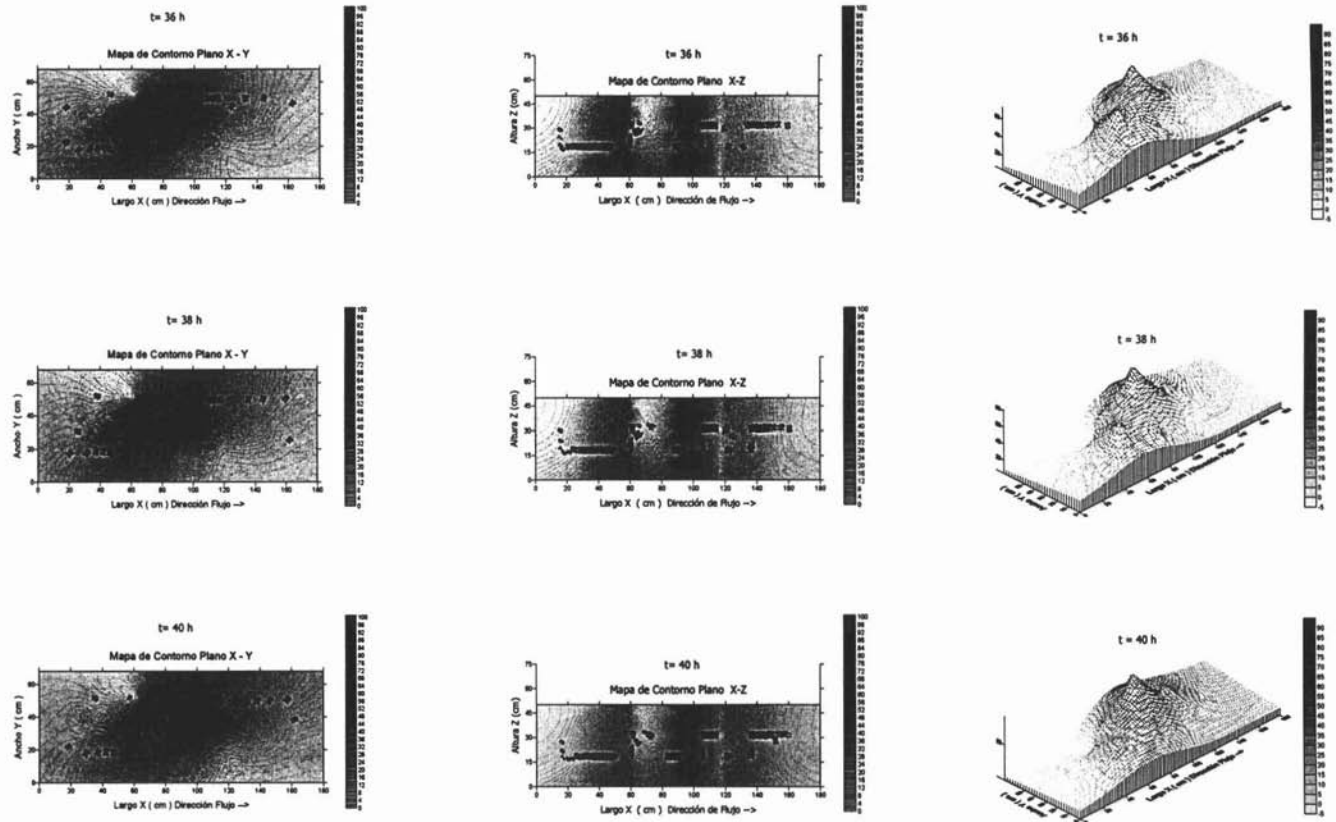


Figura 5. 17. Mapas de contorno y superficie obtenidos durante la prueba de funcionamiento del modelo experimental utilizando NaCl como trazador



ESTA TESIS NO SALI
 DE LA BIBLIOTECA

Figura 5. 17. Mapas de contorno y superficie obtenidos durante la prueba de funcionamiento del modelo experimental utilizando NaCl como trazador

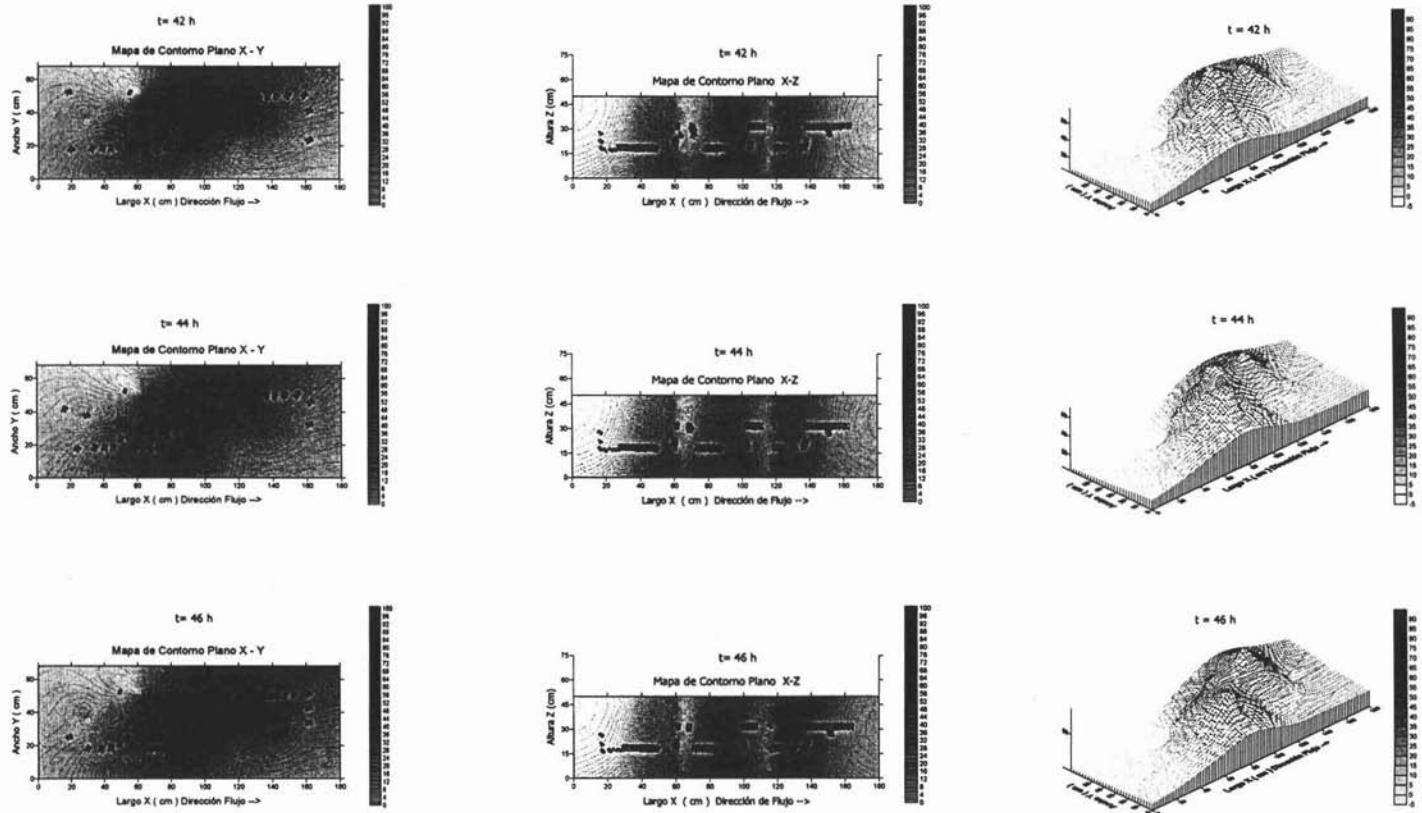


Figura 5. 17. Mapas de contorno y superficie obtenidos durante la prueba de funcionamiento del modelo experimental utilizando NaCl como trazador

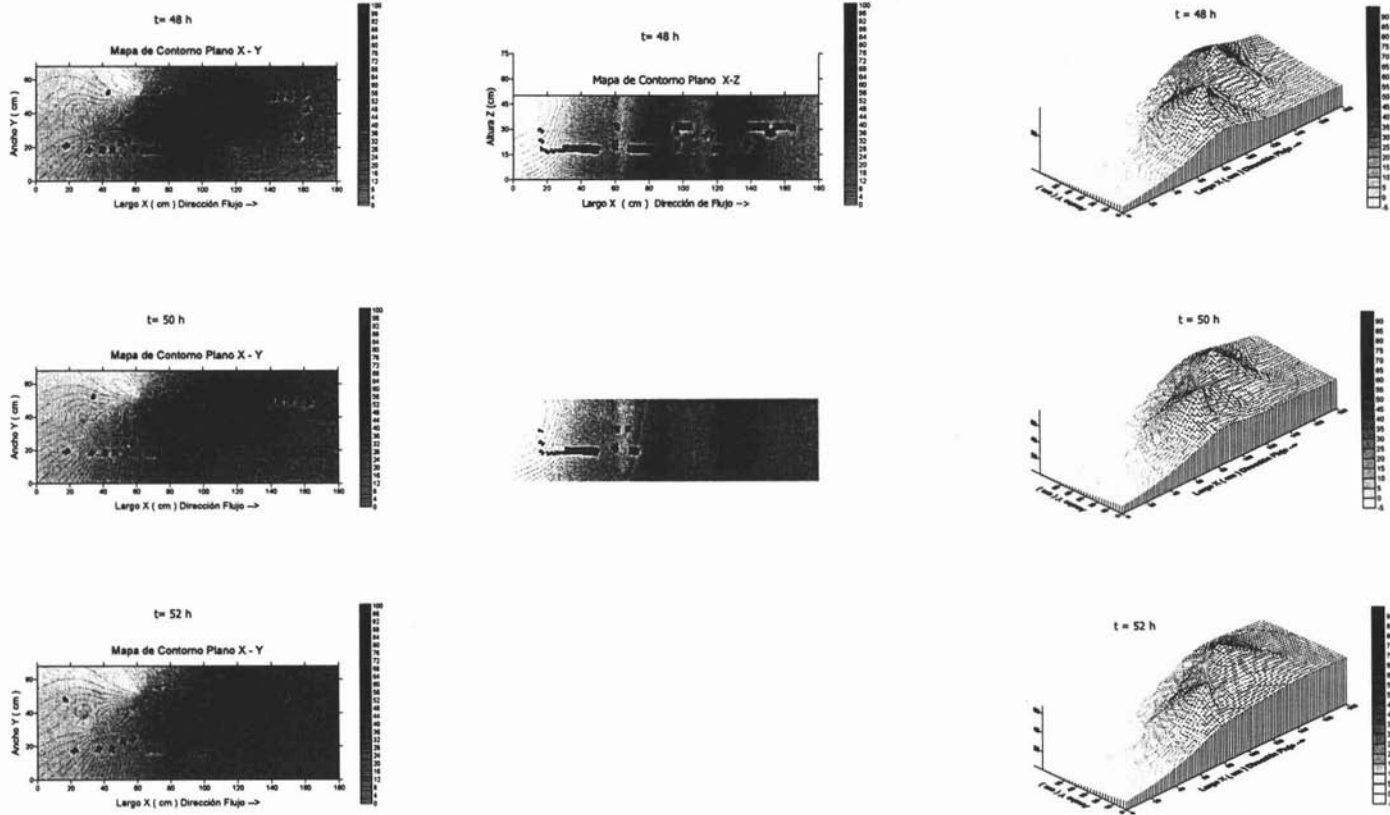


Figura 5. 17. Mapas de contorno y superficie obtenidos durante la prueba de funcionamiento del modelo experimental utilizando NaCl como trazador



En las gráficas de contorno y de superficie se hace evidente que bajo las condiciones de operación aplicadas, el trazador tomó más de 60 horas para recorrer el material empacado.

El tiempo de residencia hidráulico (tr) en la sección empacada fue 9.20 h, se calculó con la ecuación 5.1, a partir del flujo hidráulico (Q) y del volumen efectivo (Ve). El flujo hidráulico que se obtuvo para la prueba de funcionamiento fue $0.6511 \text{ m}^3/\text{s}$ y el volumen efectivo calculado con la ecuación 5.2 fue 0.2495 m^3 donde el volumen del material empacado en la zona saturada (V) fue 0.594 m^3 y la porosidad del material (e) fue 0.42.

$$tr = \frac{Ve}{Q} \quad \text{Ecuación (5.1)}$$

$$Ve = V \times e \quad \text{Ecuación (5.2)}$$

En cuanto al tipo de flujo a través del material empacado, se puede decir que bajo las condiciones de operación utilizadas: una velocidad de alimentación de 2.61 m/día , una porosidad del material de empaque de 0.42 y un tamaño de partícula con diámetro de 0.1 mm , el flujo que se tiene es de tipo transitorio; esto se puede confirmar en las gráficas de contorno X-Y y X-Z, donde se aprecian los cruces de las líneas de acción del flujo características.

En la Figura 5.18 se grafican las concentraciones de NaCl, para comparar el comportamiento en el pozo 2 con respecto al pozo 3 y a los puntos de drenado 1 y 2. Respecto al patrón de flujo o de distribución que imponen las condiciones de operación establecidas en la prueba de funcionamiento. En el Pozo 2 a una profundidad entre 45 y 30 cm. Se obtuvo una concentración de NaCl muy por debajo de la observada en el mismo pozo a otras profundidades e incluso a la misma profundidad en el Pozo 3. Esta baja concentración podría estar asociada con la existencia de una zona muerta. Es muy probable que esto se deba a un mal empacado en esa zona o a una mayor compactación del material de empaque al momento de hincar el pozo.

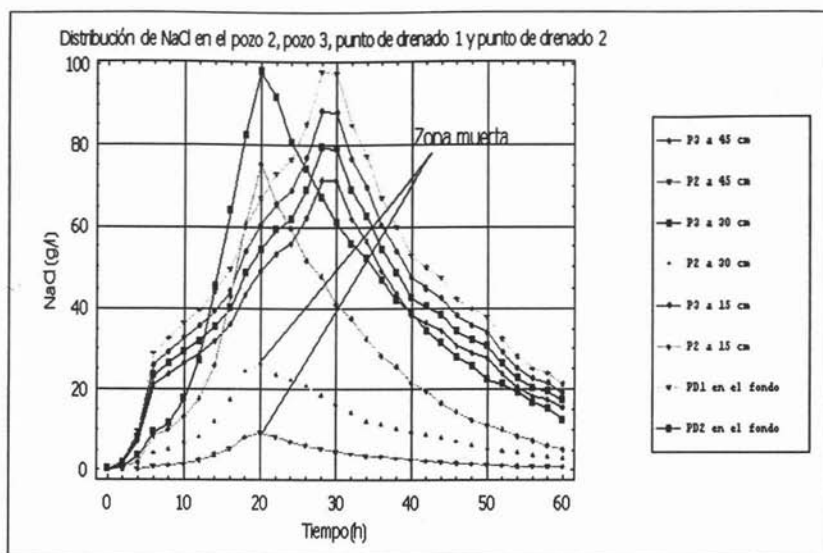


Figura 5.18. Identificación de zonas muertas en el pozo de monitoreo 2

Con base en los resultados obtenidos en la prueba del funcionamiento se puede decir que el modelo experimental cumple con las expectativas planteadas, ya que los patrones de flujo o distribución obtenidos son similares a los publicados por MacIntyre (1991), Silliman (1998), Barth (2001) y Levy (2003). El patrón de flujo o distribución obtenido respeta el comportamiento característico de un trazador soluble en agua que se alimenta en un pulso (Morgan, 1997), la cual consiste en que la totalidad del trazador se inyecte en el menor tiempo posible.

6 MANTENIMIENTO DEL MODELO EXPERIMENTAL

El mantenimiento del modelo experimental constituye una parte importante, ya que un adecuado manejo de su estructura y sus dispositivos, puede garantizar sus condiciones de funcionamiento y asegurar su durabilidad para realizar una gran variedad de experimentos a futuro.

A continuación se describen los 4 pasos básicos para el mantenimiento del modelo experimental:

- ⇒ Limpieza.
- ⇒ Desinstalación de los muestreadores.
- ⇒ Vaciado del material de empaque.
- ⇒ Cambio de filtros de nylon.

6.1. LIMPIEZA

La limpieza del modelo experimental tiene como principal objetivo evitar que los compuestos y/o microorganismos utilizados en un experimento pudieran ocasionar interferencias en estudios posteriores.

La limpieza del modelo experimental consiste en hacer pasar una corriente de agua manteniendo abiertas todas las válvulas de muestreo, así como la válvula principal de salida, incluso se podría usar un agente tensoactivo que facilite el lavado del material de empaque. Si es necesario se puede bombear agua o inyectar aire para promover el desprendimiento de ciertos compuestos de las partículas sólidas, para pasar a la fase líquida.

El modelo experimental se debe mantener en presencia de agua y un agente antimicrobiano mientras se realiza un siguiente experimento, siempre y cuando se vaya a utilizar el mismo material. El agente antimicrobiano puede ser una solución de hipoclorito de sodio al 5%. Se recomienda mantener el modelo experimental en ausencia de luz, ya que se podría generar crecimiento de algas, en las paredes que quedan expuestas a la luz.

6.2. DESINSTALACIÓN DE LOS MUESTREADORES

Al terminar un experimento es necesario desinstalar los tubos muestreadores. Para ello primero se tiene que garantizar que éstos no contengan residuos de compuestos, por lo que se sugiere poner en flujo inverso la bomba de canales múltiples para alimentar agua limpia y realizar la limpieza. Se puede agregar también una solución diluida de un agente tensoactivo para facilitar la limpieza.

Si esto último se aplica, se deberá dejar pasar agua limpia hasta haber retirado el tensoactivo en su totalidad. Una vez realizada esta operación se procede a retirar cada uno de los 8 tubos muestreadores instalados dentro de los pozos de monitoreo, jalando verticalmente hacia arriba.

En caso de que no vayan a realizarse experimentos durante un periodo de tiempo largo, se recomienda desarmar los tubos muestreadores y guardar cada uno de sus componentes por separado. Es muy importante que éstos se encuentren completamente limpios y secos.

Los pozos de monitoreo no se deben mover, ya que al ejercer presión lateral contra el material de empaque, pueden fracturarse o romperse y las camisas filtrantes que los cubren también se pueden romper. Tampoco es conveniente retirarlos, a menos que la estrategia experimental considere un arreglo de pozos diferente al anterior, o bien, se vaya a utilizar otro material de empaque. En cualquiera de estos casos, lo más indicado es vaciar el modelo, para empacarlo nuevamente.

6.3. VACIADO DEL MATERIAL DE EMPAQUE

Cuando sea necesario vaciar el material de empaque, se debe utilizar una pala con recubrimiento plástico para transferirlo a sacos o bolsas, para su almacenamiento.

Si el material de empaque contiene agua, es necesario secarlo antes de su almacenamiento; para ello el material se debe extender sobre una superficie plana, sobre algún material plástico, y dejarlo a la intemperie para que el agua contenida sea eliminada por evaporación. Una vez seco el material de empaque, se guarda en bolsas o sacos.

En ocasiones existe resistencia de adherencia de algún compuesto al material de empaque, por lo cual es necesario realizar un muestreo aleatorio para determinar si quedaron residuos, si es el caso, realizar las acciones correctivas que correspondan.

Durante el vaciado del material de empaque se debe evitar golpear las paredes o el fondo de la caja, para evitar fractura o ruptura. El acrílico de alta densidad tiene una gran resistencia a cargas repartidas, pero poca resistencia a presiones puntuales que pueden romper la estructura química del polímero que lo conforma.

6.4. CAMBIO DE FILTROS DE NYLON

Cuando el modelo experimental se encuentre vacío y limpio, es conveniente retirar los filtros de los paneles transversales, así como la rejilla de retención del fondo y los filtros de los pozos de monitoreo para lavarlos por separado con agua a presión. Los filtros se deben secar para evitar que se deterioren, alargando con ello el tiempo de vida de estos dispositivos.

Es recomendable revisar la integridad física de los filtros antes de volverlos a utilizar para garantizar que sigan cumpliendo con su función filtrante. En caso de que se detecte alguna ruptura, se recomienda reemplazarlo por uno nuevo.

CONCLUSIONES

Con base en los objetivos planteados en este trabajo, la revisión bibliográfica, la experiencia adquirida y las pruebas de funcionamiento realizadas, se puede concluir lo siguiente:

- La geometría del modelo experimental en forma de caja rectangular es adecuada y versátil; las proporciones elegidas (3:1:1.5), así como las dimensiones (2.2 m X 0.7 m X 1 m) están fundamentadas en las experiencias reportadas por otros autores que han realizado estudios similares.
- El soporte estructural desarrollado satisface las características de resistencia a la carga, por lo cual se puede afirmar que el modelo será duradero y resistente, siempre que se sigan las recomendaciones para su uso y mantenimiento.
- El sistema de ruedas instalado facilita el transporte y movilización del modelo experimental dentro del laboratorio; incluso, será posible trasladarlo a cualquier parte siempre que exista maquinaria auxiliar para su carga y descarga.
- La utilización de acrílico de alta densidad para construir la caja rectangular del modelo experimental fue una alternativa económica, sencilla y versátil, ya que este material permite que se puedan realizar modificaciones o sustituciones posteriores adecuadas a las particularidades de cada estudio que se pretenda realizar.
- Los materiales seleccionados para la construcción del modelo experimental no se verán afectados por el uso de hidrocarburos en estudios enfocados a problemas de contaminación y remediación de acuíferos ocasionados por derrames o fugas de combustibles.
- El diseño hidráulico del modelo experimental favorece condiciones de flujo predominante en una sola dirección.
- El sistema de inducción de flujo hidráulico utilizado, en el modelo experimental resultó ser una alternativa de bajo costo energético al no utilizar sistemas de bombeo accionados por energía eléctrica.

- La elección de una arena fina como material de empaque permitió minimizar las zonas muertas, debido a las características de homogeneidad en cuanto a forma y tamaño.
- La utilización de una bomba de canales múltiples para el sistema de muestreo fue una opción adecuada, ya que hace eficiente y rápida la obtención de un gran número de muestras en poco tiempo.
- Los resultados obtenidos en la prueba de funcionamiento del modelo experimental demuestran que es factible analizar problemas de transporte de sustancias a través de la zona saturada del suelo.
- El cloruro de sodio utilizado como trazador durante la prueba de funcionamiento del modelo experimental es representativo de contaminantes que podrían estar disueltos en el agua subterránea, como es el caso de algunos componentes de las gasolinas.
- El flujo que se obtuvo en la prueba de funcionamiento fue de tipo transitorio, esto se debe fundamentalmente a la velocidad de flujo y al tipo de material de empaque utilizado.
- El modelo experimental desarrollado representa una valiosa herramienta para abatir los costos de las pruebas piloto en campo; sin embargo, debido a la complejidad del problema ambiental en materia de subsuelo, representa todavía un reto lograr que las pruebas experimentales simulen las condiciones reales en campo.
- Las actividades realizadas durante este trabajo de tesis sólo son el principio de gran diversidad de estudios que podrían ser representativos de los problemas de contaminación del subsuelo y de la búsqueda de alternativas de remediación. Sin embargo, se requiere de mucho tiempo y dedicación para obtener resultados confiables que puedan garantizar su escalamiento a las condiciones reales de campo.

RECOMENDACIONES

- En la sección de salida del modelo experimental, se podría cambiar el vertedero de altura fija, por un vertedero de altura variable, para así poder modificar la altura de la zona saturada en la sección de empacado.
- Para poder aumentar los flujos de alimentación, se recomienda aumentar la altura del tanque de alimentación primario, para que permita tener una mayor caída de presión.
- Realizar mediciones de la conductividad hidráulica, para contar con un patrón de flujo más representativo.
- Para tener más conocimiento sobre las bondades del modelo experimental, se recomienda realizar un perfil de conductividades hidráulicas con diferentes tipos de material de empaque y realizar estudios de trazado con diferentes tipos de alimentación de un contaminante.
- Al utilizar arcillas, limos o una combinación de ellos como material de empaque se deberá tomar en cuenta que el tipo de flujo será laminar.

Anexo 1. Detalle de las lecturas de concentración de NaCl en los 50 puntos de muestreo durante la prueba del funcionamiento del modelo experimental.

Tiempo (h)	Concentración de NaCl (g/l)																Puntos de drenado en el fondo															
	Pozo 1			Pozo 2			Pozo 3			Pozo 4			Pozo 5			Pozo 6						Pozo 7			Pozo 8							
	Altura a partir del fondo (cm)			Altura a partir del fondo (cm)			Altura a partir del fondo (cm)			Altura a partir del fondo (cm)			Altura a partir del fondo (cm)			Altura a partir del fondo (cm)			Altura a partir del fondo (cm)			Altura a partir del fondo (cm)			Altura a partir del fondo (cm)							
	45	30	15	45	30	15	45	30	15	45	30	15	45	30	15	45	30	15	45	30	15	45	30	15	45	30	15	1	2	3	4	5
0	% de var	6.71	7.60	8.83	4.59	5.46	7.16	8.32	4.41	5.11	5.20	1.31	5.43	9.41	8.83	8.04	8.59	3.13	6.74	8.80	7.92	5.69	8.33	2.71	2.01	8.65	3.49	7.28	8.04	8.00	6.87	
	Dev. Est	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.00	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01
	Prom	0.21	0.21	0.22	0.22	0.21	0.21	0.21	0.20	0.21	0.22	0.21	0.22	0.21	0.22	0.22	0.21	0.22	0.24	0.22	0.23	0.23	0.22	0.23	0.24	0.24	0.25	0.23	0.21	0.21	0.21	0.20
	R1	0.20	0.20	0.19	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.19	0.21	0.20	0.19	0.20	0.19	0.20	0.22	0.21	0.22	0.22	0.20	0.22	0.22	0.20	0.22	0.23	0.24	0.24	0.22	0.19	0.21	0.19
2	R2	0.22	0.23	0.23	0.23	0.22	0.23	0.23	0.22	0.22	0.21	0.22	0.21	0.23	0.24	0.23	0.23	0.25	0.24	0.22	0.24	0.22	0.24	0.23	0.23	0.24	0.26	0.25	0.23	0.23	0.21	
	R3	0.21	0.20	0.22	0.21	0.21	0.20	0.21	0.20	0.20	0.21	0.22	0.22	0.23	0.23	0.21	0.19	0.22	0.24	0.22	0.24	0.23	0.22	0.24	0.23	0.22	0.24	0.23	0.26	0.21	0.20	0.20
	% de var	4.94	1.98	8.95	4.61	3.91	5.51	6.05	6.85	8.85	7.12	1.59	6.75	9.01	8.83	7.12	6.04	1.15	5.54	4.03	3.98	7.48	5.06	7.80	6.80	7.27	7.49	3.10	6.06	5.73	8.14	
	Dev. Est	0.05	0.05	0.38	0.02	0.02	0.03	0.10	0.12	0.18	0.05	0.01	0.06	0.01	0.03	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.06	0.13	0.07	
4	Prom	1.07	2.36	4.27	0.48	0.54	0.60	1.60	1.78	1.98	0.71	0.79	0.88	0.40	0.46	0.52	0.23	0.24	0.26	0.26	0.26	0.27	0.26	0.27	0.26	0.27	0.26	0.27	0.26	0.98	2.20	0.90
	R1	1.01	2.31	3.85	0.48	0.52	0.56	1.50	1.64	1.84	0.66	0.79	0.82	0.38	0.46	0.51	0.21	0.22	0.25	0.25	0.26	0.26	0.26	0.26	0.25	0.25	0.25	0.25	0.98	2.11	0.84	
	R2	1.08	2.39	4.60	0.51	0.56	0.61	1.61	1.85	2.17	0.75	0.81	0.89	0.40	0.48	0.52	0.24	0.26	0.27	0.26	0.28	0.28	0.28	0.29	0.30	0.29	0.29	0.62	1.04	2.34	0.98	
	R3	1.12	2.41	3.82	0.51	0.56	0.61	1.61	1.85	2.17	0.75	0.81	0.89	0.40	0.48	0.52	0.24	0.26	0.27	0.26	0.28	0.28	0.28	0.29	0.30	0.29	0.29	0.62	1.04	2.34	0.98	
6	% de var	9.55	3.25	2.00	7.17	6.80	8.95	5.38	7.24	6.23	5.74	4.53	7.08	6.98	5.18	8.67	7.56	5.62	3.39	6.63	5.69	3.31	3.52	5.08	3.28	6.80	8.04	7.05	6.51	5.00	9.46	
	Dev. Est	6.20	2.69	1.74	0.04	0.09	0.17	0.38	0.56	0.54	0.22	0.19	0.34	0.08	0.07	0.13	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.00	0.01	0.02	0.01	0.03	0.03	0.12	0.34	0.48	0.33	
	Prom	64.93	82.58	87.08	0.53	1.32	1.88	7.01	7.79	8.66	3.84	4.27	4.75	1.18	1.35	1.55	0.26	0.28	0.30	0.30	0.31	0.32	0.37	0.37	0.39	0.32	0.32	1.77	5.27	9.62	3.49	
	R1	59.04	79.88	85.08	0.50	1.23	1.85	6.75	7.64	8.04	3.73	4.05	4.37	1.14	1.27	1.50	0.26	0.26	0.29	0.30	0.29	0.32	0.36	0.35	0.37	0.30	0.29	1.63	4.92	9.61	3.48	
8	R2	71.40	85.26	87.93	0.58	1.41	2.07	7.45	8.42	8.90	4.10	4.33	5.03	1.28	1.38	1.70	0.29	0.28	0.31	0.32	0.32	0.38	0.38	0.39	0.35	0.33	1.87	5.29	10.11	3.82		
	R3	64.34	82.60	88.23	0.53	1.32	1.74	6.84	7.32	9.03	3.70	4.43	4.83	1.20	1.42	1.64	0.29	0.32	0.31	0.36	0.38	0.39	0.32	0.33	1.80	5.61	9.15	3.16				
	% de var	5.54	1.18	5.07	8.92	2.51	1.56	3.02	4.58	4.36	5.02	8.18	2.37	5.02	6.92	6.62	4.16	1.84	7.25	1.56	4.98	4.43	8.87	5.39	7.76	7.91	7.62	6.50	1.37	3.58	8.46	
	Dev. Est	3.61	0.88	4.14	0.08	0.21	0.13	0.64	1.07	1.13	0.44	0.79	0.26	0.10	0.16	0.18	0.01	0.03	0.03	0.01	0.02	0.02	0.04	0.02	0.04	0.03	0.03	0.20	1.16	1.03	0.78	
10	Prom	55.14	74.94	81.60	0.92	4.07	8.38	21.08	23.42	26.03	8.74	9.71	10.29	2.07	2.36	2.71	0.32	0.34	0.36	0.38	0.39	0.40	0.46	0.42	0.46	0.48	0.40	3.80	3.10	11.99	28.92	9.26
	R1	64.41	73.94	77.88	0.91	3.92	8.33	20.37	22.23	24.80	8.31	8.90	10.50	1.98	2.18	2.50	0.30	0.31	0.35	0.37	0.38	0.38	0.42	0.46	0.46	0.47	0.35	2.99	11.81	27.87	8.37	
	R2	69.06	75.62	86.06	1.00	4.32	8.53	21.27	23.76	27.04	9.19	9.75	10.95	2.18	2.45	2.76	0.32	0.36	0.38	0.38	0.41	0.42	0.50	0.49	0.53	0.43	0.40	3.33	12.13	28.95	9.83	
	R3	61.35	75.27	80.87	0.84	3.98	8.28	21.60	24.29	26.24	8.72	10.48	10.92	2.04	2.47	2.85	0.32	0.33	0.33	0.39	0.38	0.39	0.45	0.44	0.47	0.43	0.40	2.97	12.03	29.94	3.58	
12	% de var	5.14	3.25	6.49	7.19	5.32	5.50	8.86	4.01	4.29	6.02	1.41	2.67	1.42	9.35	7.66	3.77	4.04	9.02	4.83	3.71	7.68	6.45	1.31	7.79	7.59	7.52	5.95	1.24	6.89	7.20	
	Dev. Est	2.84	2.24	4.82	0.08	0.26	0.55	2.10	1.06	1.26	0.75	0.20	0.41	0.04	0.28	0.27	0.03	0.02	0.04	0.02	0.02	0.04	0.03	0.01	0.04	0.04	0.03	0.20	1.69	2.24	0.83	
	Prom	55.22	68.86	74.16	1.10	4.88	10.40	23.74	26.38	29.31	12.44	13.82	15.35	2.66	3.05	3.49	0.35	0.38	0.40	0.45	0.46	0.47	0.52	0.52	0.55	0.48	4.43	3.99	17.07	32.56	11.53	
	R1	53.14	68.50	68.75	1.02	4.58	9.87	21.46	25.23	27.90	11.64	13.59	15.29	2.64	3.02	3.18	0.32	0.38	0.37	0.44	0.44	0.43	0.48	0.51	0.53	0.47	0.42	3.72	16.06	30.40	10.58	
14	R2	58.45	71.25	75.77	1.10	5.03	10.66	24.14	26.58	29.68	13.13	13.94	15.99	2.71	3.34	3.59	0.38	0.39	0.44	0.47	0.46	0.48	0.54	0.52	0.59	0.52	0.46	4.17	17.31	34.88	11.91	
	R3	54.08	66.82	77.97	1.18	5.04	9.59	25.61	27.32	30.33	12.53	13.93	14.98	2.64	2.78	3.69	0.36	0.36	0.39	0.43	0.47	0.49	0.53	0.53	0.52	0.44	4.07	17.80	32.41	12.11		
	% de var	5.60	8.03	8.32	6.15	2.56	6.04	7.94	9.13	8.19	5.46	7.86	2.42	4.72	7.26	3.38	6.65	7.96	5.96	4.20	3.71	7.60	9.90	5.74	3.39	5.49	8.46	8.39	8.80	37.00	7.39	
	Dev. Est	2.61	4.97	5.19	0.09	0.17	0.80	2.10	2.69	2.68	0.74	1.18	0.40	0.22	0.38	0.03	0.03	0.03	0.02	0.05	0.07	0.04	0.06	0.04	0.04	0.61	1.64	5.27	1.29			
16	Prom	46.59	61.87	62.42	1.48	6.82	13.18	26.50	29.44	32.71	13.55	15.06	16.73	4.61	5.27	6.03	0.44	0.47	0.50	0.60	0.61	0.63	0.69	0.70	0.73	0.64	0.53	6.90	18.59	36.34	17.53	
	R1	43.68	57.69	57.45	1.38	6.62	12.32	24.17	26.58	30.70	13.03	14.06	16.33	4.58	4.96	5.95	0.41	0.43	0.47	0.59	0.59	0.62	0.67	0.72	0.60	0.49	6.81	18.00	32.76	16.11		
	R2	48.71	67.36	67.80	1.56	6.90	13.36	27.06	31.91	35.75	14.40	16.37	17.13	4.84	5.70	6.39	0.45	0.50	0.53	0.63	0.63	0.68	0.76	0.74	0.79	0.67	5.58	20.44	37.11	17.86		
	R3	47.36	60.54	62.01	1.49	6.94	13.88	28.25	29.83	31.68	13.22	14.74	16.73	4.41	5.16	5.75	0.47	0.48	0.50	0.58	0.62	0.61	0.69	0.68	0.67	0.65	0.52	6.34	17.33	39.16	18.63	
18	% de var	3.83	8.78	4.86	6.12	3.26	9.86	7.73	1.28	4.42	3.30	7.42	4.89	6.74	1.82	4.96	5.79	4.60	7.66	8.05	7.50	6.94	1.23	3.10	6.77	5.28	3.28	6.73	7.58	7.74		
	Dev. Est	3.34	4.70	2.80	0.26	0.50	2.13	4.80	1.51	0.66	0.68	0.92	0.46	0.11	0.34	0.03	0.07	0.05	0.01	0.03	0.06	0.03	0.05	0.65	0.78	2.99	0.24	2.89	2.04	3.89		
	Prom	39.66	53.50	56.20	2.41	8.09	17.63	28.77	31.97	35.52	15.20	16.89	17.86	5.27	6.03	6.90	0.54	0.58	0.62	0.87	0.89	0.91	0.88	0.89	0.94	0.93	0.65	7.89	20.05	39.46	27.27	
	R1	37.11	48.46	55.46	2.24	7.79	17.47	27.27	31.58	33.77	14.65	16.36	17.77	4.87	5.91	6.50	0.51	0.55	0.61	0.79	0.89	0.85	0.88	0.86	0.86	0.93	0.65	7.86	20.03	37.57	25.45	

Tiempo (h)	Concentración de NaCl (g/l)																								Puntos de drenado en el fondo					
	Pozo 1			Pozo 2			Pozo 3			Pozo 4			Pozo 5			Pozo 6			Pozo 7			Pozo 8								
	Altura a partir del fondo (cm)			Altura a partir del fondo (cm)			Altura a partir del fondo (cm)			Altura a partir del fondo (cm)			Altura a partir del fondo (cm)			Altura a partir del fondo (cm)			Altura a partir del fondo (cm)			Altura a partir del fondo (cm)								
	46	30	16	46	30	16	46	30	16	46	30	16	46	30	16	46	30	16	46	30	16	46	30	16	1	2	3	4	5	6
% de var	9.06	3.95	7.94	9.41	7.54	4.67	6.12	5.13	7.67	8.64	9.20	6.44	5.76	7.93	5.23	8.90	8.77	7.31	8.82	5.70	8.17	5.92	7.71	6.36	9.30	5.63	7.85	6.73	9.10	5.19
Desv. Est	2.19	1.39	2.58	0.88	1.98	3.51	2.99	2.79	4.64	1.94	2.29	1.78	0.51	0.80	0.61	0.65	0.68	0.60	0.29	0.19	0.28	0.11	0.15	0.13	0.33	0.49	1.04	2.07	6.11	5.10
Prom	24.20	35.22	37.47	9.35	26.32	75.30	48.96	54.39	60.44	22.45	24.95	27.72	8.86	10.14	11.60	7.27	7.73	8.22	3.28	3.35	3.42	1.90	1.92	2.01	3.49	8.75	13.38	20.60	67.15	98.27
R1	24.01	35.92	34.41	9.52	25.78	71.79	49.29	53.44	56.58	20.68	22.49	26.77	8.83	9.21	10.94	6.93	6.97	7.95	2.95	3.13	3.13	1.84	1.86	1.87	3.17	8.32	13.14	28.58	60.50	92.55
R2	26.49	36.69	37.64	10.21	28.51	78.82	52.29	57.54	65.58	24.53	27.03	29.67	9.39	10.63	12.13	7.36	7.96	8.91	3.51	3.53	3.69	2.03	2.09	2.12	3.82	9.27	14.38	31.12	72.52	99.90
R3	22.11	35.06	36.35	9.24	25.05	75.30	46.49	52.21	59.18	22.15	25.32	27.31	8.37	10.57	11.73	7.86	8.26	7.81	3.37	3.36	3.45	1.84	1.81	2.04	3.49	8.69	12.31	32.69	64.43	102.35
% de var	5.40	8.76	4.96	6.78	9.20	6.98	7.32	5.00	5.50	4.79	8.52	6.45	7.06	7.84	8.48	7.62	6.50	5.06	8.31	8.42	8.20	0.42	5.73	8.16	4.61	8.32	7.21	8.23	1.91	5.90
Desv. Est	1.20	2.83	1.77	0.55	2.16	4.57	3.89	2.96	3.62	1.18	2.34	1.97	0.73	0.93	1.14	0.66	0.59	0.49	0.33	0.34	0.34	0.01	0.15	0.22	0.20	0.86	1.11	2.79	1.39	5.42
Prom	22.13	32.25	35.69	8.10	23.51	65.49	53.22	59.14	65.71	24.69	27.44	30.49	10.31	11.80	13.50	8.60	9.15	9.73	3.98	4.07	4.15	2.54	2.57	2.69	4.24	10.35	15.44	33.87	73.01	91.80
R1	20.76	31.85	33.65	7.47	23.23	62.24	49.88	56.38	65.48	23.52	24.98	29.09	9.48	10.73	12.52	8.08	8.47	9.27	3.63	4.03	4.04	2.53	2.49	2.44	4.18	9.45	14.22	30.93	72.27	85.58
R2	22.63	35.25	36.80	8.47	25.80	70.72	57.50	62.26	69.43	25.88	27.70	32.74	10.84	12.23	14.76	9.33	9.39	10.25	4.01	4.42	4.54	2.55	2.74	2.84	4.47	11.67	16.41	34.22	74.61	94.34
R3	22.99	29.64	36.62	8.36	21.50	63.53	52.29	58.77	62.21	24.69	29.63	32.63	10.42	13.21	13.21	8.38	9.58	9.66	4.29	3.74	3.88	2.54	2.47	2.79	4.08	10.43	15.70	36.47	72.14	95.48
% de var	3.50	3.55	7.63	6.58	5.97	6.03	7.13	4.65	8.62	8.40	7.91	0.22	8.00	9.30	6.52	8.17	8.61	5.08	3.07	7.86	4.42	5.79	6.64	4.58	7.55	9.42	5.13	8.31	6.63	8.11
Desv. Est	0.74	1.00	2.47	0.45	1.32	3.39	3.98	2.88	5.93	2.43	2.55	0.08	0.94	1.26	1.01	0.87	0.97	0.61	0.15	0.38	0.22	0.20	0.23	0.17	0.38	1.20	0.91	3.07	5.07	6.54
Prom	11.18	28.29	32.36	6.88	22.19	59.62	55.74	61.94	68.82	28.96	32.17	35.75	11.81	13.51	15.46	10.60	11.28	12.00	4.77	4.88	4.98	3.45	3.48	3.64	5.09	12.76	17.68	37.72	76.46	80.69
R1	10.85	28.14	29.67	6.68	20.96	55.56	54.96	61.16	66.33	26.18	29.30	35.66	10.72	12.41	14.34	9.63	10.88	11.38	4.61	4.51	4.73	3.29	3.34	3.46	4.67	12.62	16.76	37.34	74.61	79.85
R2	22.03	28.36	32.90	6.39	23.59	60.06	60.05	65.13	75.58	29.94	33.14	35.77	12.44	14.66	16.75	11.42	12.38	12.60	4.77	5.27	5.13	3.67	3.75	3.79	5.42	14.03	17.71	43.89	82.20	87.61
R3	9.66	27.36	34.51	6.55	22.01	62.36	52.21	59.52	64.54	30.74	33.08	35.82	12.45	13.69	16.28	10.69	10.57	12.01	4.85	4.85	5.08	3.38	3.35	3.69	5.17	11.64	18.58	38.33	72.58	74.61
% de var	9.54	6.00	9.07	6.21	8.31	6.69	7.71	9.00	8.52	6.37	6.53	7.86	2.12	1.19	1.57	7.67	7.93	5.55	6.69	6.66	4.06	8.02	2.12	5.91	5.61	7.55	8.37	6.70	7.55	7.35
Desv. Est	1.77	1.55	2.60	0.42	1.72	3.45	4.80	6.22	6.54	2.02	2.31	3.08	0.29	0.03	1.34	0.95	1.05	0.38	0.39	0.24	0.36	0.10	0.28	0.34	1.13	0.78	2.92	6.44	5.44	
Prom	18.20	25.92	28.69	6.10	20.72	51.62	62.20	69.12	76.80	31.78	35.31	39.24	13.48	15.42	17.64	12.40	13.19	14.03	5.72	5.85	5.97	4.54	4.58	4.80	6.10	14.92	20.79	43.59	85.33	74.06
R1	18.40	25.74	25.87	5.62	19.39	47.70	56.68	62.36	73.01	30.66	33.80	35.79	13.15	15.40	17.53	11.31	12.70	13.64	5.28	5.68	5.69	4.12	4.57	4.51	5.93	13.68	19.37	40.60	85.01	67.83
R2	20.32	27.56	31.01	6.39	22.66	54.22	64.56	70.39	84.35	34.12	37.97	40.20	13.61	15.45	19.03	13.05	14.29	14.59	5.91	6.29	6.12	4.81	4.68	4.81	6.49	15.87	20.27	43.75	91.92	77.87
R3	16.79	24.47	29.19	6.29	20.11	52.93	65.37	74.60	73.02	30.57	34.16	41.72	13.67	15.41	16.36	12.84	12.48	13.86	5.98	5.57	6.10	4.68	4.49	5.07	5.88	15.23	20.92	46.44	79.05	76.48
% de var	6.64	7.91	6.15	6.29	8.40	5.17	8.46	7.28	4.86	2.64	3.31	7.41	5.90	8.64	3.44	8.05	2.04	4.33	5.63	7.96	5.25	7.06	8.21	5.97	8.87	9.41	5.33	2.09		
Desv. Est	1.07	1.73	1.67	0.36	1.55	2.47	6.06	5.79	4.29	0.90	2.77	3.12	0.90	1.51	0.69	1.23	0.31	0.29	0.39	0.56	0.33	0.44	0.54	0.58	1.10	2.03	4.40	5.23	1.41	
Prom	16.07	21.87	25.59	5.18	18.44	47.72	71.56	79.51	88.34	34.13	37.92	42.13	15.27	17.47	19.99	15.25	16.22	17.25	6.74	6.89	7.04	6.22	6.28	6.58	7.59	18.36	22.87	46.81	98.16	67.38
R1	15.35	21.31	25.46	4.77	16.66	44.89	61.70	78.04	83.51	33.76	37.57	39.01	14.78	16.68	19.19	14.53	15.85	15.95	6.43	6.49	6.48	5.93	5.93	6.42	17.24	22.52	42.50	92.32	65.16	
R2	17.30	23.81	27.31	5.34	19.16	48.84	77.87	85.89	91.70	35.16	40.85	45.25	16.31	19.21	20.41	16.66	16.33	17.48	7.01	6.92	7.60	6.57	6.78	7.18	7.60	19.43	24.95	51.30	102.43	68.92
R3	15.58	20.49	23.99	4.83	19.50	49.43	65.79	74.59	89.81	33.47	35.34	42.14	14.72	16.52	20.36	14.54	16.48	18.34	6.80	7.26	7.04	6.15	6.13	6.15	6.13	14.40	20.90	46.64	99.71	67.06
% de var	6.36	5.77	7.74	0.45	7.58	6.80	5.71	6.12	3.86	7.50	7.92	3.00	7.01	2.99	5.43	5.40	7.34	8.20	5.50	5.22	3.77	2.04	9.29	8.40	4.42	4.13	5.98	4.26	8.66	6.54
Desv. Est	0.83	1.14	1.79	0.02	1.23	2.80	4.07	4.85	3.40	2.88	3.38	1.43	1.29	0.63	1.31	0.98	1.42	1.68	0.44	0.43	0.32	0.15	0.70	0.67	0.38	0.90	1.65	2.25	8.47	3.98
Prom	13.08	19.75	23.10	4.61	16.21	41.10	71.27	79.18	87.98	38.48	42.76	47.51	18.45	21.11	24.15	18.14	19.30	20.53	8.06	8.24	8.41	7.49	7.57	7.92	8.59	21.84	27.63	52.79	97.76	60.96
R1	12.13	19.51	21.59	4.61	14.81	39.79	66.79	76.67	84.07	35.74	41.01	45.96	17.42	20.87	23.87	17.04	17.68	19.92	7.56	7.96	8.05	7.33	7.53	7.25	8.19	20.85	25.78	50.20	93.16	56.45
R2	13.71	20.99	25.07	4.64	17.13	44.31	72.28	84.77	90.16	41.49	46.66	47.81	19.90	21.82	25.88	18.90	20.33	22.43	8.23	8.73	8.61	7.63	8.29	7.93	8.65	22.61	28.97	53.88	107.53	63.98
R3	13.38	18.75	22.62	4.59	16.68	39.21	74.73	76.11	89.72	38.21	40.60	48.76	18.02	20.62	23.00	18.48	19.89	19.24	8.04	8.02	8.59	7.52	6.88	5.84	6.54	22.06	28.14	54.28	92.59	62.46
% de var	5.39	4.71	8.10	6.90	7.61	6.05	2.11	7.67	7.55	2.94	2.90	5.18	3.00	1.17	2.72	4.93	4.08	5.08	7.07	8.68	6.95	5.13	4.18	6.70	4.40	5.33	2.93	4.74	5.80	4.65
Desv. Est	0.63	0.82	1.77	0.28	1.08	2.27	3.31	5.29	5.78	1.25	1.37	2.71	0.62	0.28	0.74	1.05	0.93	1.23	0.62	0.78	0.64	0.52	0.42	0.71	0.41	1.37	0.91	2.75	4.93	2.59
Prom	11.64	17.33	21.84	4.01	14.13	37.45	62.00	68.89	76.55	42.40	47.12	52.35	20.06	23.86	27.30	22.29	22.24	24.00	8.77	8.96	9.16	10.07	10.17	10.65	9.35	25.75	31.54	58.17	85.05	55.74
R1	10.38	17.30	20.59	3.81	13.94	34.94	60.66	65.13	71.84	42.34	45.64	50.62	20.30	23.66</																

Tiempo (h)	Concentración de NaCl (g/l)																Puntos de drenado en el fondo																													
	Pozo 1				Pozo 2				Pozo 3				Pozo 4				Pozo 5				Pozo 6				Pozo 7				Pozo 8				fondo													
	Altura a partir del fondo (cm)				Altura a partir del fondo (cm)				Altura a partir del fondo (cm)				Altura a partir del fondo (cm)				Altura a partir del fondo (cm)				Altura a partir del fondo (cm)				Altura a partir del fondo (cm)				Altura a partir del fondo (cm)				Altura a partir del fondo (cm)				fondo									
	45	30	15	45	30	15	45	30	15	45	30	15	45	30	15	45	30	15	45	30	15	45	30	15	45	30	15	45	30	15	45	30	15	45	30	15	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
40	% de var	7.06	4.57	7.02	6.92	7.78	8.56	6.35	2.77	7.69	7.70	8.56	5.15	4.74	6.78	8.14	6.75	5.54	0.93	5.11	7.32	6.96	4.40	1.77	5.83	8.67	6.32	3.53	3.12	8.30	4.68															
	Desv. Est	0.49	0.49	0.87	0.18	0.73	1.85	2.43	1.18	3.64	5.09	6.38	4.20	1.59	2.61	3.59	2.78	2.42	0.43	0.90	1.32	1.28	0.89	0.36	1.32	1.63	3.13	1.78	2.83	4.36	1.82															
	Prom	6.50	10.70	12.35	2.54	9.38	21.63	38.30	42.55	47.28	66.06	73.40	81.55	33.64	38.49	44.04	41.14	43.77	46.56	56.66	18.03	18.42	20.16	20.36	21.32	18.62	18.03	18.42	20.16	20.36	21.32	18.62	18.03	18.42	20.16	20.36	21.32	18.62	18.03	18.42	20.16	20.36	21.32			
42	% de var	7.46	11.17	13.29	2.72	10.22	23.72	41.08	43.91	51.43	71.71	80.61	83.36	34.91	41.35	48.16	44.28	44.04	46.72	56.66	18.03	18.42	20.16	20.36	21.32	18.62	18.03	18.42	20.16	20.36	21.32	18.62	18.03	18.42	20.16	20.36	21.32	18.62	18.03	18.42	20.16	20.36	21.32			
	Desv. Est	0.61	10.75	11.57	2.52	9.00	21.00	36.54	41.98	44.65	61.84	70.50	84.55	34.17	36.23	42.33	40.47	46.04	46.90	57.18	19.38	19.24	17.46	20.48	20.71	21.20	19.38	18.42	20.16	20.36	21.32	18.62	18.03	18.42	20.16	20.36	21.32	18.62	18.03	18.42	20.16	20.36	21.32			
	Prom	5.97	4.62	7.07	4.40	4.66	4.90	8.86	8.39	8.11	8.70	6.71	4.30	4.55	4.97	2.57	7.69	8.66	6.02	6.27	8.14	4.46	7.45	6.72	8.55	8.53	6.05	6.48	7.50	9.13	1.90															
44	% de var	6.14	9.07	11.74	7.37	8.49	19.57	36.35	42.39	44.88	58.77	65.30	72.56	39.31	44.28	51.46	52.12	55.45	58.59	20.33	20.76	21.21	23.34	23.58	24.69	21.62	23.65	23.65	24.69	21.62	23.65	23.65	24.69	21.62	23.65	23.65	24.69	21.62	23.65	23.65	24.69	21.62	23.65			
	Desv. Est	5.72	6.79	10.83	2.20	8.04	19.38	33.05	36.94	41.70	57.76	61.47	69.24	37.32	42.76	49.94	53.81	55.45	56.29	18.95	19.27	20.49	21.36	21.64	22.26	21.36	21.64	22.26	21.36	21.64	22.26	21.36	21.64	22.26	21.36	21.64	22.26	21.36	21.64	22.26						
	Prom	6.12	6.39	9.20	1.47	1.92	20.39	32.31	42.31	45.76	62.51	65.81	73.93	41.41	45.76	51.41	51.41	52.52	52.52	20.50	21.46	22.60	22.60	25.50	25.50	21.46	22.60	22.60	25.50	21.46	22.60	22.60	25.50	25.50	21.46	22.60	22.60	25.50	21.46	22.60						
46	% de var	4.69	5.72	10.34	1.74	7.57	15.51	32.26	35.24	38.61	49.69	55.87	61.52	50.60	63.29	72.31	73.94	82.84	88.25	28.22	30.87	31.72	31.72	31.72	33.49	30.87	31.72	33.49	30.87	31.72	33.49	30.87	31.72	33.49	30.87	31.72	33.49	30.87	31.72	33.49						
	Desv. Est	4.62	7.27	8.98	1.66	7.05	13.39	30.22	34.56	40.38	51.35	55.98	60.30	68.90	75.41	85.88	86.64	27.55	26.70	27.44	32.22	28.87	34.13	30.64	36.75	34.13	30.64	36.75	34.13	30.64	36.75	34.13	30.64	36.75	34.13	30.64	36.75	34.13	30.64	36.75						
	Prom	5.72	1.67	7.54	4.42	7.39	4.03	3.44	6.93	5.56	4.65	1.97	6.52	4.53	4.32	6.53	7.74	7.84	1.25	7.67	8.08	6.69	7.55	6.46	5.07	8.15	7.13	6.32	6.32	4.14																
48	% de var	3.87	6.21	8.22	1.33	9.55	11.66	28.94	30.28	34.77	43.41	45.99	51.21	57.99	68.37	74.65	74.62	73.75	75.28	32.38	33.93	34.49	34.93	35.31	38.49	36.39	38.92	37.95	60.93	37.17	23.17															
	Desv. Est	4.32	6.42	9.77	1.49	6.11	13.17	31.75	32.34	36.57	48.81	54.18	57.38	64.52	72.86	86.21	82.34	80.12	86.40	36.98	38.68	37.87	37.16	40.30	41.50	41.02	91.61	93.87	64.96	41.07	27.25															
	Prom	4.17	6.42	8.72	1.50	6.21	12.34	26.35	34.12	36.12	41.61	48.53	56.64	60.01	65.30	75.45	68.88	86.37	89.91	36.95	35.98	38.56	37.54	35.13	39.97	35.89	35.89	38.56	37.54	35.13	39.97	35.89	35.89	38.56	37.54	35.13	39.97	35.89	35.89	38.56						
50	% de var	3.76	3.54	7.68	1.31	5.02	10.21	27.08	31.73	34.17	38.57	41.71	47.25	54.55	62.74	70.84	65.15	64.85	74.88	43.61	44.59	43.71	37.88	41.13	43.62	42.95	81.00	82.79	56.43	37.03	21.69															
	Desv. Est	3.77	9.24	8.58	2.70	7.47	7.53	6.77	3.89	1.69	8.41	9.50	7.05	7.54	8.01	7.96	6.34	7.06	6.49	8.21	5.17	5.43	2.76	5.34	7.31	6.17	7.86	5.09	8.81	5.99																
	Prom	3.00	4.53	6.91	1.12	4.69	10.05	23.70	26.33	29.26	34.14	39.93	42.14	46.58	53.29	60.97	57.63	61.31	65.22	50.87	51.98	53.08	50.73	51.24	53.66	54.22	69.38	69.76	46.83	32.51	21.29															
52	% de var	2.91	4.12	6.23	1.08	4.44	9.42	22.04	24.56	28.96	30.99	35.98	38.90	42.56	52.66	54.54	54.44	56.53	60.83	49.99	50.61	50.45	49.79	48.15	49.41	52.63	63.33	65.16	46.76	29.49	19.88															
	Desv. Est	3.12	4.95	7.27	1.13	4.87	10.89	23.81	27.43	29.83	34.81	41.69	42.81	48.17	57.84	64.53	61.41	64.98	67.57	55.42	55.06	56.17	52.34	53.36	56.93	59.27	70.91	71.11	49.24	32.86	21.65															
	Prom	2.96	4.52	7.24	1.14	4.75	9.84	25.74	27.01	28.98	36.61	41.51	44.73	49.01	49.37	62.94	56.84	62.40	69.27	43.21	50.22	52.61	50.00	52.61	53.69	50.79	73.08	74.48	44.48	31.18	22.35															
54	% de var	0.25	0.27	0.41	0.07	0.31	0.33	1.54	1.80	0.60	0.46	1.44	2.29	1.94	3.42	4.36	4.62	4.26	4.18	4.66	5.41	5.87	4.72	4.94	4.04	5.52	5.02	5.56	3.42	1.04	1.48															
	Desv. Est	2.60	4.11	5.90	1.20	4.35	22.69	25.22	30.41	33.79	37.55	41.11	47.03	53.31	53.53	56.95	60.58	61.87	63.19	64.55	55.13	55.69	63.53	65.43	65.43	65.43	65.43	65.43	65.43	65.43	65.43	65.43	65.43	65.43	65.43	65.43	65.43	65.43	65.43	65.43	65.43	65.43				
	Prom	2.34	3.94	5.56	0.98	3.98	8.27	18.66	22.55	24.57	30.31	32.35	35.10	38.86	43.83	48.74	48.12	52.14	58.97	56.95	58.72	49.91	55.13	55.92	59.85	62.07	61.37	37.76	27.17	18.78																
56	% de var	1.54	7.77	6.75	3.96	5.40	8.11	7.07	9.37	6.18	4.91	9.34	6.89	3.65	5.13	8.69	3.47	3.45	3.67	4.43	2.58	1.80	7.95	6.52	9.56	7.51	3.37	2.46	7.68	8.07	7.88															
	Desv. Est	0.17	0.29	0.37	0.04	0.19	0.59	1.28	1.90	1.39	1.34	2.83	2.32	1.34	2.16	4.18	2.99	1.72	4.60	3.37	2.00	3.01	5.29	4.37	6.22	6.12	1.90	1.56	2.87	2.02	1.31															
	Prom	2.31	3.79	5.90	3.60	7.29	18.23	20.25	22.20	27.27	30.30	33.67	36.79	42.10	48.17	46.84	49.82	53.00	76.03	77.66	79.33	66.41	67.08	70.24	81.03	66.39	55.11	37.41	25.00	16.65																
58	% de var	2.08	3.22	5.12	0.81	3.23	6.10	17.43	19.37	21.52	24.23	26.92	29.82	34.29	39.27	44.36	43.81	46.60	49.58	79.66	81.37	83.12	79.81	80.61	84.41	84.10	84.10	84.10	84.10	84.10	84.10	84.10	84.10	84.10	84.10	84.10	84.10	84.10	84.10	84.10						
	Desv. Est	2.02	3.06	4.67	0.74	2.98	5.82	15.81	19.18	21.32	22.84	26.29	28.89	31.69	36.60	41.51	42.29	45.65	45.19	72.37	73.86	78.80	79.43	72.66	79.47	77.28	51.39	39.95	30.43	23.65	15.06															
	Prom	2.02	3.18	5.30	0.87	3.26	6.31	18.45	19.53	20.10	23.84	27.40	30.21	35.66	39.78	45.55	42.49	45.26	52.92	82.39	81.20	79.17	76.53	84.30	87.67	86.04	80.88	82.93	80.25	21.99	14.09															
60	% de var	1.67	2.99	4.66	0.72	2.83	5.19	15.45	17.17	19.08	22																																			

ANEXO II: COSTO DE CONSTRUCCIÓN DEL MODELO EXPERIMENTAL

A manera de ejercicio para tener claro el costo de construcción del modelo experimental desarrollado, se elaboró una relación detallada considerando el costo de cada uno de los elementos que fueron contemplados para hacer eficiente su funcionamiento. En la siguiente tabla se incluye cada uno de los conceptos.

Concepto	Costo (\$ M/N)
Estructura física de acrílico	
Paneles transversales de acrílico	
Soporte estructural de acero	\$30,820
7 conectores de CPVC de 1 ½ "	\$805
6 reductores de de CPVC de ½ "	\$300
6 conectores de inserción de CPVC	\$144
15 m de manguera Viton® de ¼ "	\$1,466
6 válvulas de laboratorio de CPVC de ¼ "	\$1,738
Válvula principal de ½ " CPVC	\$374
14 empaques de 1½" de nylon	\$161
8 Pozos de monitoreo de 1½"	\$8,160
8 Muestreadores de niveles múltiples:	
• 8 Barra metálica de acero inoxidable de 5 mm de diámetro	
• 48 anillos guías de acrílico	
• 98 sujetadores de aceros	
• 98 tornillos de fijación de acero	\$7,840
• Llave Allen de 1/16"	\$6
Rejilla de retención metálica de malla 100	\$2,024
8 filtros para pozos de monitoreo de nylon de malla 100	\$570
2 filtros tipo bolsa de nylon para los paneles transversales	\$1,518
Bomba programable de 24 canales	\$50,000
24 cartuchos de bombeo c/accesorios	\$19,000
2 paquetes de 12 tubos flexibles de Viton®	\$3,648
2 paquetes de 15 m de extensión de tubo de Viton® de 2.79 mm de diámetro	\$3,404
2 paquetes de 25 conectores plásticos cónicos	\$256
Tanque de alimentación primario de 450 litros	\$450
Válvula reguladora de flujo de entrada metálica	\$70
Tubo flexible de alimentación de polietileno de ½ " de diámetro	\$60
Válvula con flotador de nivel para tanque de alimentación primario	\$150
1.6 toneladas de arena sílice malla 120	\$2,720
Manguera flexible de PVC de 1/8"	\$50
Total	\$135,734

Adicionalmente, se incluyó una lista de partes reemplazables del modelo experimental que se deben tener en almacén para sustitución en caso de daño, por ser las más vulnerables:

- Conectores de CPVC de 1 ½ '' (nacional).
- Reductores de de CPVC de ½ '' (nacional).
- Conectores de inserción de CPVC (nacional).
- Manguera de Viton® de ¼' (nacional).
- Válvulas de laboratorio de CPVC de ¼'' (nacional).
- Empaques de 1½'' de nylon (nacional).
- Filtros para pozos de monitoreo de nylon de malla 100 (nacional).
- Filtros tipo bolsa de nylon para los paneles transversales (nacional).
- Paquetes de 12 tubos flexibles de Viton® de 2.79 mm de diámetro (importación).
- Paquetes de extensión de tubo de Viton® de 2.79 mm de diámetro (importación).
- Conectores plásticos cónicos (importación).

BIBLIOGRAFÍA

- Barth G., Hill M., Illangasekare T. and Rajaram H., 2001, "Predictive modeling of flow and transport in a two-dimensional intermediate-scale, heterogeneous porous medium", *Water Resources Research*, Vol. 37, No. 10, 2503-2512.
- Beven K.J. and M.J. Kirkby, 1979. "A physically based, variable contributing area model of basin hydrology", *Hydrol. Sci. Bull.*, 24(1), pp. 43-69.
- Chirico G.B., 2001. "Terrain-based distributed modeling for investigating scale issues in hydrology", PhD Dissertation, Department of Hydrologic Engineering, Università Degli Studi Di Napoli Federico II.
- Conwell, P., Silliman S.E. and Zheng L., 1997. "Design of a piezometer network for estimation of the variogram of the hydraulic gradient: the role of the instrument", *Water Resources Research*, 33(11), 2489-2494.
- Cressie, N. A., 1990. "The origins of Kriging", *Mathematical Geology*, Vol. 22, 239-252.
- Gonen O. and Gvirtzman H., 1997. "Laboratory-scale analysis of aquifer remediation by in-well vapor stripping 1. Laboratory results", *Journal of Contaminant Hydrology*, Vol. 29, 23-39.
- Grassi C.J., 1981, "Manual de drenaje agrícola", CIDIAT, Venezuela, Serie Riego y Drenaje RD-10.
- Gvirtzman H. and Gonen O., 1995. "Feasibility study of in-well vapor stripping using airlift pumping", *Ground Water Monitoring and Remediation*, pp.155-162.
- Gvirtzman, H. and Gorelick S.M., 1992. "The concept of in situ vapor stripping for removing VOCs from groundwater", *Transport in Porous Media*, Vol. 8, 71-92.
- Katz and Gvirtzman H., 2000. "Capture and cleanup of a migrating VOC plume by the in-well vapor stripping: a sand tank experiment", *Journal of Contaminant Hydrology*, Vol. 43, 25-44.
- Levy M. and Berkowitz B., 2003. "Measurement and analysis of non-Fickian dispersion in heterogeneous porous media", *Journal of Contaminant Hydrology* 1899,1-24.
- Liu S., Yeh T.-C.J. and Gardiner R., 2000. "Effectiveness of tomography: Sandbox experiments", *Water Resources*, Vol. 38, No.4, 1029.
- MacIntyre W. G., Stauffer T. B. and Antworth C. O., 1991. "A Comparison of sorption coefficients determined by batch, column, and box Methods on a Low Organic Carbon Aquifer Material", *Ground Water*, Vol. 29, No. 6, pp.908-913.
- Mailloux B., Fuller M., et al, 2003. "A Modular Injection System, Multilevel sampler, and Manifold for tracer Tests", *Ground Water*, Vol. 41, No. 6, 816-827.
- Mathematica Version 5.0.0.0, 2003, Wolfram Research, Inc.
- McCarthy J. F., Liang B. and Mas-Pla J., 1996. "Field tracer tests on the mobility of natural organic matter in a sandy aquifer", *Water Resources Research*, Vol. 32, No.5, 1223-1238.
- Morgan Sagastume J.M., 1996. "Mejoras al comportamiento hidráulico de los reactores UASB y Filtro Sumergido Aerobio: Estudios de trazado a escala laboratorio y piloto", Tesis de Maestría, Facultad de Química, División de Estudios de Posgrado UNAM, págs 58-76.
- Pinto M., Gvirtzman H. and Gorelick S. M., 1997. "Laboratory-scale analysis of aquifer remediation by in-well vapor stripping 2. Modeling results", *Journal of Contaminant Hydrology*, Vol. 29, 41-58.
- Saval S., Lara F., Lesser J.M. y Nieto J.M., 2004. Contaminación de acuíferos con hidrocarburos: causas, efectos, riesgos asociados y medidas de prevención. En *El futuro del agua en México*, Academia Mexicana de Ingeniería, págs 233-249.
- Silliman S.E. and Caswel, S., 1998. "Observations of measured hydraulic conductivity in two artificial, confined aquifers with boundaries", *Water Resources Research*, 34(9), 2203-2213.
- Silliman S.E. and Frost, C., 1998. "Monitoring of the hydraulic gradient using a three-point estimator", *Journal of Environmental Engineering*, 124(6), 517-523.

- Silliman S.E., 1995. "Particle transport through two-dimensional, saturated porous media: influence of physical structure of the medium", *Journal of Hydrology*, 167, 79-98.
- Silliman S.E., 1996. "The importance of the third dimension on transport through saturated porous media: case study based on transport of particles", *Journal of Hydrology*, 179, 181-195.
- Silliman S.E., Zheng, L. and Conwell, P., 1998. "The Use of Laboratory Experiments for the Study of Conservative Solute Transport in Heterogeneous Porous Media", *Hydrogeology Journal*, Vol. 6, 166-177.
- Slites, W. and Chambers, L. W., 1991. "A Method for installing Miniature Multilevel Sampling Wells", *Ground Water*, Vol 29, No. 6 pp.430-432.
- Surfer Version 8.00, 2002. Surface Mapping System, Golden Software, Inc.
- Tidwell V.C. and Wilson, R.L., 1997. "Laboratory method for investigating permeability up-scaling", *Water Resources Research*, Vol. 30, No. 7, pp. 1607-1616.
- U.S. Environmental Protection Agency, Design Manual Constructed wetlands and aquatic plant systems for municipal wastewater treatment, 1988.
- Ursino N., Gimmi T. and Föhler H., 2001. "Dilution of non-reactive tracers in variably saturated sandy structures", *Advances in Water Resources*, Vol. 24, 877-885.
- Yamada Y. and McClay K., 2003. "Application of geometric models to inverted listric fault systems in sandbox experiments. Paper 2: insights for possible along strike migration of material during 3D hanging wall deformation", *Journal of Structural Geology*, Vol. 25, 1331-1336.