



**UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**



**CONSTRUCCIÓN Y PUESTA EN FUNCIONAMIENTO  
DE UNA COLUMNA DE SUELO PARA ESTIMAR EL  
COEFICIENTE DE DISPERSIÓN LONGITUDINAL**

**CARLA G. VIRREIRA O.**

**TUTOR: Ing. ADRIANA MÁRQUEZ**

**VALENCIA, JULIO 2005**



UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA



## CONSTRUCCIÓN Y PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DE UNA COLUMNA DE SUELO A ESCALA PILOTO PARA ESTIMACIÓN DEL COEFICIENTE DE DISPERSIÓN LONGITUDINAL

**Autor:**  
Carla G. Virreira O.

**Tutor Académico:**  
Ing. Adriana Márquez

### RESUMEN

Cada día es mayor la dependencia del abastecimiento de agua potable de los recursos hídricos subterráneos, lo cual pone en relevancia la importancia que adquiere el conocer si la calidad del agua subterránea está siendo alterada. Por tal motivo, el objetivo de esta investigación es realizar la construcción y poner en funcionamiento una columna de suelo a escala piloto para estimar el coeficiente de dispersión longitudinal. Para realizar la investigación; se construyó una columna de acrílico de sección transversal cuadrada de 25x25 cm y de 1 m. de altura, con 1 válvula de paso rápido para tomar la muestra a la salida; el medio poroso seleccionado fue arena de granulometría entre el tamiz 20 (0,85 mm) y 40 (0,425 mm); la sustancia trazadora seleccionada fue NaCl, la concentración utilizada fue de 0.2 y 0.6 % en peso; luego de pruebas hidráulicas se decidió trabajar con un caudal de 0.012 L/seg para el primer grupo de pruebas y 0.017 L/seg para el segundo grupo de pruebas. Se realizaron pruebas de permeabilidad y porosidad, la concentración del NaCl se midió mediante un Espectrofotómetro de Absorción Atómica, y para estimar el coeficiente de dispersión longitudinal se usaron los modelos matemáticos de Ogata (1958) y Singh (1999). La sustancia trazadora tardó aproximadamente una hora para saturar un metro de columna de suelo. De acuerdo a los resultados obtenidos, se concluye que la variación en los resultados se debe al que el Método de Ogata depende de más factores, tales como; permeabilidad, porosidad, función de error; mientras que Singh toma en cuenta sólo la relación entre concentraciones de salida y entrada y el tiempo, además el coeficiente de dispersión no varió significativamente debido al cambio de caudal para un mismo método. Por otro lado, al conocer el coeficiente de dispersión se puede determinar el tiempo que tardaría un contaminante en dispersarse por un acuífero.



**UNIVERSIDAD DE CARABOBO**  
**FACULTAD DE INGENIERIA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**



**CONSTRUCCIÓN Y PUESTA EN FUNCIONAMIENTO  
DE UNA COLUMNA DE SUELO PARA ESTIMAR EL  
COEFICIENTE DE DISPERSIÓN LONGITUDINAL**

Trabajo Especial de Grado, Presentado Ante la ilustre

**Universidad de Carabobo**

Para optar al título de **Ingeniero Civil**

**CARLA G. VIRREIRA O.**

**TUTOR: Ing. ADRIANA MÁRQUEZ**

**VALENCIA, JULIO 2005**



**UNIVERSIDAD DE CARABOBO**  
**FACULTAD DE INGENIERIA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**



## **CERTIFICADO DE APROBACIÓN**

Los abajo firmantes, miembros del jurado asignado para evaluar el trabajo de grado titulado: **“Construcción y Puesta en Funcionamiento de una Columna de Suelo para Estimar el Coeficiente de Dispersión Longitudinal”**, realizado por la bachiller: Carla Virreira portadora de la C.I.: 15.333.700, estudiante de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad de Carabobo, dejan constancia de que fue presentado y aprobado el día 18 de Julio de 2005.

---

**Prof. Adriana Márquez**

**Presidente del Jurado**

---

**Prof. Arnoldo Gómez**

**Jurado**

---

**Prof. Rosalba García**

**Jurado**



## INTRODUCCIÓN

La explotación del agua subterránea para consumo humano cada día es mayor, lo cual ha despertado un gran interés en conocer su calidad.

En muchas regiones del mundo, la explotación del agua subterránea constituye la única fuente de abastecimiento, razón por la cual nos vemos en la necesidad de plantear modelos que nos permitan obtener el grado de dispersión de los contaminantes en el suelo.

Es a raíz de esta necesidad que alrededor de las últimas dos décadas un gran número de modelos han aparecido para simular el movimiento de soluciones inorgánicas y contaminantes orgánicos en suelos homogéneos.

En el siguiente trabajo de investigación se construirá una columna de suelo y se pondrá en funcionamiento para así poder estimar el coeficiente de Dispersión Longitudinal.

También se busca presentar las ecuaciones que describen el transporte de los contaminantes en medios porosos, a partir de las cuales se obtendrá el coeficiente de dispersión longitudinal.

En general, la estimación cuantitativa del coeficiente de dispersión constituye un prerequisite en la solución de los problemas hidrológicos sobre el transporte de contaminantes.

Con los resultados obtenidos a partir de las pruebas realizadas a la columna de suelo se determinará la concentración del contaminante a través de un medio poroso. La variación de la concentración indicará la calidad del fluido a medida que atraviesa toda la columna.



## CAPÍTULO IV

### 4.1. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO USADO

Como se expuso en el Capítulo I, el equipo experimental fue construido por José Rodríguez como Trabajo Especial de Grado de Rodríguez con la finalidad de filtrar agua residual, por lo tanto para esta investigación fue preciso modificarlo para que pudiese trabajar como columna de suelo. El detalle de la columna de suelo se encuentra en el Anexo 1.

### 4.2. RESULTADOS OBTENIDOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos según la metodología propuesta en el capítulo anterior, dichos resultados corresponden a:

- Concentraciones medidas para obtener la curva concentración relativa versus tiempo.
- Concentraciones medidas para obtener la curva concentración relativa versus distancia.
- Mediciones para la obtención del gradiente hidráulico.
- Mediciones para la obtención de la permeabilidad.
- Mediciones para la obtención de la porosidad.

Se realizaron dos grupos de pruebas, cada uno con concentración de la sustancia trazadora distinta. Cada grupo de pruebas posee las siguientes características:

- 1<sup>er</sup> grupo de pruebas: Realizado con un caudal de 0,012 L/s y con una concentración inicial de 0,2% (p/p) (2 gr NaCl/L).



- 2<sup>do</sup> grupo de pruebas: Realizado con un caudal de 0,017 L/s y con una concentración inicial de 0,6% (p/p) (6 gr NaCl/L).

Es importante recordar que por cada grupo de pruebas se tomaron dos veces las muestras, esto se hizo con la finalidad de conocer el comportamiento de la concentración en cada grupo de pruebas.

A continuación se presenta de nuevo la tabla 3.1 que indica la cantidad de Cloruro de Sodio (NaCl) que fue necesario agregar al recipiente plástico de 78 L lleno de agua destilada para obtener las concentraciones antes señaladas.

0.2 % (por peso)	156 gr NaCl
0.6 % (por peso)	468 gr NaCl

**Tabla 3.1.** Cantidad de NaCl agregado para conseguir las concentraciones deseadas  
Fuente: Elaboración propia

El uso de agua destilada se debe principalmente a la necesidad de diluir Cloruro de Sodio en agua que no posea elevadas cantidades de sales, ya que esto alteraría los resultados de las concentraciones en las muestras.

#### **4.2.1. CONCENTRACIONES MEDIDAS PARA OBTENER LA CURVA CONCENTRACIÓN RELATIVA VERSUS TIEMPO**

##### **4.2.1.1. Concentraciones medidas para el primer grupo de pruebas**

Estas pruebas fueron realizadas el día 16/03/05

##### **1<sup>era</sup> Toma de muestras:**

Las concentraciones leídas en el equipo fueron:



**TABLA 4.1** Concentraciones leídas para la primera toma de muestras del primer grupo de pruebas

<b>Nº muestra</b>	<b>Tiempo (s)</b>	<b>Concentración (p.p.m.)</b>
1	1018	12,00
2	1318	13,00
3	1618	14,74
4	1918	16,60
5	2218	19,20
6	2518	19,90

Fuente: Elaboración propia

Aplicando el factor de dilución se tiene:

**TABLA 4.2** Concentraciones originales para la primera toma de muestras del primer grupo de pruebas

<b>Nº Muestra</b>	<b>Tiempo (s)</b>	<b>Concentración Leída (p.p.m.)</b>	<b>Concentración Original (g/L)</b>
1	1018	12,00	3,000
2	1318	13,00	3,250
3	1618	14,74	3,685
4	1918	16,60	4,150
5	2218	19,20	4,800
6	2518	19,90	4,975

Fuente: Elaboración propia

Es importante recordar que una unidad de p.p.m. (partes por millón) equivale a mg/L.



Para medir la concentración inicial, se tomó la muestra a la salida de la válvula.

$C_0 = 27,56$  p.p.m. (6,89 gr/L).

A continuación se presenta en la Gráfica 1, la curva de concentración relativa versus el tiempo (llamada también curva de desarrollo) para los datos de la primera toma de muestras del primer grupo de pruebas:





**2<sup>da</sup> Toma de muestras:**

Las concentraciones leídas en el equipo fueron:

**TABLA 4.3** Concentraciones leídas para la segunda toma de muestras del primer grupo de pruebas

<b>Nº muestra</b>	<b>Tiempo (s)</b>	<b>Concentración (p.p.m.)</b>
1	1018	13,70
2	1318	15,40
3	1618	15,00
4	1918	18,60
5	2218	19,80
6	2518	20,40

Fuente: Elaboración propia

Aplicando el factor de dilución se tiene:

**TABLA 4.4** Concentraciones originales para la segunda toma de muestras del primer grupo de pruebas

<b>Nº Muestra</b>	<b>Tiempo (s)</b>	<b>Concentración Leída (p.p.m.)</b>	<b>Concentración Original (g/L)</b>
1	1018	13,70	3,425
2	1318	15,40	3,850
3	1618	15,00	3,750
4	1918	18,60	4,650
5	2218	19,80	4,950
6	2518	20,40	5,100

Fuente: Elaboración propia



La concentración inicial fue:  $C_0 = 27,56$  p.p.m. (6,890 g/L)

A continuación se presenta en la Gráfica 2, la curva de concentración relativa versus el tiempo para la segunda toma de muestras del primer grupo de pruebas.





#### 4.2.1.2. Concentraciones medidas para el segundo grupo de pruebas

Estas pruebas fueron realizadas el día 18/04/05

##### 1<sup>era</sup> Toma de muestras:

Las concentraciones leídas en el equipo fueron:

**TABLA 4.5** Concentraciones leídas para la primera toma de muestras del segundo grupo de pruebas

<b>Nº muestra</b>	<b>Tiempo (s)</b>	<b>Concentración (p.p.m.)</b>
1	2640	47,00
2	2940	47,30
3	3240	48,80
4	3540	49,70
5	3840	50,40
6	4140	51,02

Fuente: Elaboración propia

Aplicando el factor de dilución se tiene:

**TABLA 4.6** Concentraciones originales para la primera toma de muestras del segundo grupo de pruebas

<b>Nº Muestra</b>	<b>Tiempo (s)</b>	<b>Concentración Leída (p.p.m.)</b>	<b>Concentración Original (g/L)</b>
1	2640	47,00	11,750
2	2940	47,30	11,825
3	3240	48,80	12,200
4	3540	49,70	12,425



5	3840	50,40	12,600
6	4140	51,02	12,755

Fuente: Elaboración propia

La concentración inicial fue:  $C_o = 53,5$  p.p.m. (13,375g/L).

A continuación se presenta en la Gráfica 3, la curva de concentración relativa versus el tiempo (llamada también curva de desarrollo) para la primera toma de muestras del segundo grupo de pruebas:



**2<sup>era</sup> Toma de muestras:**

Las concentraciones leídas en el equipo fueron:

**TABLA 4.7** Concentraciones leídas para la segunda toma de muestras del segundo grupo de pruebas

<b>N° muestra</b>	<b>Tiempo (s)</b>	<b>Concentración (p.p.m.)</b>
1	2640	47,40
2	2940	48,00
3	3240	47,60
4	3540	50,60
5	3840	51,20
6	4140	52,00

Fuente: Elaboración propia

Aplicando el factor de dilución se tiene:

**TABLA 4.8** Concentraciones leídas para la segunda toma de muestras del segundo grupo de pruebas

<b>N° Muestra</b>	<b>Tiempo (s)</b>	<b>Concentración Leída (p.p.m.)</b>	<b>Concentración Original (g/L)</b>
1	2640	47,40	11,850
2	2940	48,00	12,000
3	3240	47,60	11,900
4	3540	50,60	12,650
5	3840	51,20	12,800
6	4140	52,00	13,000

Fuente: Elaboración propia



La concentración inicial fue:  $C_0 = 53,5$  p.p.m. (13,375 g/L).

A continuación se presenta la Gráfica 4, la curva de concentración relativa versus el tiempo (llamada también curva de desarrollo) para la segunda toma de muestras del segundo grupo de pruebas:





## 4.2.2. CONCENTRACIONES MEDIDAS PARA REALIZAR LA CURVA CONCENTRACIÓN RELATIVA vs. DISTANCIA

### 4.2.2.1. Concentraciones medidas en el primer grupo de pruebas.

Estos datos se recolectaron con la finalidad de conocer el cambio de la concentración de la sustancia trazadora a lo largo de la columna. Se realizaron dos tomas de muestras y el tiempo de recolección entre cada una fue de 5 minutos. Esto ayudó a observar como la sustancia trazadora va aumentando su concentración a lo largo de la columna a medida que aumenta el tiempo.

Las concentraciones leídas en el equipo para un tiempo de 3138 segundos fueron:

**TABLA 4.9.** Concentraciones leídas en cada válvula a los 3138 seg.

<b>Distancias (m)</b>	<b>Concentraciones (p.p.m.)</b>
0,125	28,30
0,375	26,50
0,625	25,80
0,875	23,60

Fuente: Elaboración propia

Aplicando el factor de dilución se tiene:

**TABLA 4.10.** Concentraciones originales en cada válvula a los 3138 seg

<b>Distancias (m)</b>	<b>Concentración Leída (p.p.m.)</b>	<b>Concentración Original (g/L)</b>
0,125	28,30	7,075
0,375	26,50	6,625
0,625	25,80	6,450
0,875	23,60	5,900

Fuente: Elaboración propia



Las concentraciones leídas en el equipo para un tiempo de 3480 segundos (transcurridos 5 minutos) fueron:

**TABLA 4.11.** Concentraciones leídas en cada válvula a los 3480 seg.

<b>Distancias (m)</b>	<b>Concentraciones (p.p.m.)</b>
0,125	29,00
0,375	27,70
0,625	26,60
0,875	24,80

Fuente: Elaboración propia

Aplicando el factor de dilución se tiene:

**TABLA 4.12.** Concentraciones leídas en cada válvula a los 3360 seg

<b>Distancias (m)</b>	<b>Concentración Leída (p.p.m.)</b>	<b>Concentración Original (g/L)</b>
0,125	29,00	7,250
0,375	27,70	6,925
0,625	26,60	6,650
0,875	24,80	6,200

Fuente: Elaboración propia

A continuación se presenta en la Gráfica 5, la curva de la concentración relativa versus la distancia.





#### 4.2.2.2. Concentraciones medidas en el segundo grupo de pruebas.

Las concentraciones leídas en el equipo para un tiempo de 3300 seg fueron:

**TABLA 4.13.** Concentraciones leídas en cada válvula a los 3300 seg

<b>Distancias (m)</b>	<b>Concentraciones (p.p.m.)</b>
0,125	52,50
0,375	52,00
0,625	51,80
0,875	50,90

Fuente: Elaboración propia

Aplicando el factor de dilución se tiene:

**TABLA 4.14** Concentraciones originales en cada válvula a los 3300 seg

<b>Distancias (m)</b>	<b>Concentración Leída (p.p.m.)</b>	<b>Concentración Original (g/L)</b>
0,125	52,50	13,125
0,375	52,00	13,000
0,625	51,80	12,950
0,875	50,90	12,725

Fuente: Elaboración propia



Las concentraciones leídas en el equipo para un tiempo de 3600 segundos (transcurridos 5 minutos) fueron:

**TABLA 4.15** Concentraciones leídas en cada válvula a los 3600 seg

<b>Distancias (m)</b>	<b>Concentraciones (p.p.m.)</b>
0,125	53,40
0,375	53,10
0,625	52,40
0,875	51,50

Fuente: Elaboración propia

Aplicando el factor de dilución se tiene:

**TABLA 4.16** Concentraciones originales en cada válvula a los 3300 seg

<b>Distancias (m)</b>	<b>Concentración Leída (p.p.m.)</b>	<b>Concentración Original (g/L)</b>
0,125	53,40	13,350
0,375	53,10	13,275
0,625	52,40	13,100
0,875	51,50	12,875

Fuente: Elaboración propia

A continuación se presenta en la Gráfica 6, la curva de la concentración relativa versus la distancia.





### 4.2.3. DATOS RECOLECTADOS PARA LA OBTENCIÓN DEL GRADIENTE HIDRÁULICO.

Los datos recolectados para la obtención del gradiente hidráulico fueron medidos usando un banco piezométrico, estos datos representan las caídas de presiones a lo largo de la columna de arena.

Durante la prueba, se espero a que todos los puntos de medición en el banco piezométrico estuviesen a un mismo nivel, lo cual ocurre cuando la columna de arena esta saturada. Luego se midieron las alturas para cada grupo de pruebas.

Es importante resaltar que las mediciones se realizaron cuando las alturas se mantuvieron estables, es decir, cuando estuvieron a una altura constante durante la descarga del caudal.

A continuación se presentan los datos recolectados en el banco piezométrico para cada grupo de pruebas:

#### 4.2.3.1. Datos recolectados para el primer grupo de pruebas.

Las alturas piezométricas medidas para un caudal de  $1,20 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$  fueron:

**TABLA 4.17** Alturas leídas en el banco piezométrico para el primer grupo de pruebas

<b>Distancias (m)</b>	<b>Alturas (m)</b>
0,0625	0,930
0,1875	0,880
0,3125	0,870
0,4375	0,817
0,5625	0,787
0,6875	0,770



0,8125	0,755
0,9375	0,756

Fuente: Elaboración propia

El valor del gradiente hidráulico para este set de pruebas fue:

$$i = 0,208$$

A continuación se presenta en la Gráfica 7, las alturas piezométricas versus distancias, en la misma se presenta la recta más probable de los puntos trazados.





#### 4.2.3.2. Datos recolectados para el segundo grupo de pruebas.

Las alturas piezométricas medidas para un caudal de  $1,673 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$  fueron:

**TABLA 4.18.** Alturas leídas en el banco piezométrico para el segundo grupo de pruebas

<b>Distancias (m)</b>	<b>Alturas (m)</b>
0,0625	0,950
0,1875	0,930
0,3125	0,870
0,4375	0,800
0,5625	0,770
0,6875	0,735
0,8125	0,715
0,9375	0,665

Fuente: Elaboración propia

El valor del gradiente hidráulico para este set de pruebas fue:

$$i = 0,320$$

A continuación se presenta en la Gráfica 8, las alturas piezométricas versus distancias, en la misma se presenta la recta más probable de los puntos trazados.





#### 4.2.4. DATOS DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, POROSIDAD Y PERMEABILIDAD DE LA ARENA

La velocidad de flujo fue calculada por la ecuación (8) presentada en el Capítulo II.

A continuación se presenta en la siguiente tabla los valores de la velocidad de flujo en el poro para cada grupo de datos. Estos valores son los usados para obtener el coeficiente de Dispersión Longitudinal.

**TABLA 4.19.** Valores de velocidad de flujo en el medio poroso

	<b>I Grupo de Datos</b>	<b>II Grupo de Datos</b>
<b>V (m/s)</b>	$9,7882 \times 10^{-4}$	$1,5059 \times 10^{-3}$

Fuente: Elaboración propia

En la siguiente tabla se presentan los valores de la permeabilidad de la arena que se obtuvieron experimentalmente por el procedimiento descrito en el Capítulo III.

**TABLA 4.20.** Valores de permeabilidad experimentales de la arena

<b>Tiempo (s)</b>	<b>Agua Adsorbida (m)</b>	<b>K (m/s)</b>
300	0,62	$2,07 \times 10^{-3}$
600	0,96	$1,60 \times 10^{-3}$

Fuente: Elaboración propia

De los valores obtenidos, se decidió trabajar con el valor de permeabilidad obtenido para los 10 minutos, ya que para ese tiempo la arena se encontraba saturada.

El cambio de los valores de la permeabilidad para esos tiempos, se debe a que para los 5 minutos el agua tiene caminos por donde pasar (la arena se encuentra seca), mientras que para los 10 minutos los poros se encuentran llenos de agua, es decir, la arena se encuentra saturada.



Es importante señalar que, el valor de la permeabilidad se encuentra entre los valores establecidos de acuerdo al tamaño de la arena.

Por otra parte, para obtener la porosidad de la arena se realizó dos veces el experimento descrito en el Capítulo III. El valor obtenido experimentalmente de la porosidad fue:

**TABLA 4.21.** Valores de porosidad experimentales de la arena

<b>N°</b>	<b>Agua (mL)</b>	<b>Arena (mL)</b>	<b><math>\theta</math> (%)</b>
1	103	300	34,3
2	102	300	34

Fuente: Elaboración propia



### **4.3. APLICACIÓN DE LAS ECUACIONES EN EL ESTUDIO.**

#### **4.3.1. MÉTODO DE OGATA**

A continuación se presenta en las siguientes Tablas los datos arrojados del coeficiente de Dispersión Longitudinal al aplicar la ecuación de Advección – Dispersión simplificada por Ogata.

La ecuación simplificada por Ogata usada para obtener el coeficiente de dispersión longitudinal se presentó en el capítulo III.

##### **4.3.1.1. Aplicación del Método de Ogata al primer grupo de pruebas**

Antes de aplicar la ecuación reducida por Ogata es necesario calcular el valor del número de Péclet, para así demostrar que se puede aplicar esta ecuación. Su obtención se explica a continuación:

El valor teórico de la dispersión longitudinal, se obtiene haciendo uso de la ecuación (11) del capítulo III del presente trabajo especial de grado. Este valor fue usado para conocer el valor del número de Péclet y así demostrar que se puede aplicar la ecuación simplificada por Ogata de la ecuación de Advección – Dispersión.

Los valores a utilizar son:

$v$  = velocidad de poros =  $9,7882 \times 10^{-4}$  m/s

$d_{50}$  = promedio del tamaño de las partículas entre (tamiz 20) 0,85 mm y tamiz (40) 0,425 mm =  $6,375 \times 10^{-4}$  m.

$\nu$  = viscosidad cinemática, valor obtenido del libro de mecánica de fluidos de Potter y Wighert, se trabajará con un valor igual a  $0.804 \times 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s

Sustituyendo en la ecuación y despejando el valor de la dispersión, se obtiene:



$$D = 3,1824 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

El número de Péclet es:

$$\text{Péclet} = 269,13 > 100 \quad \text{O.K.}$$

***Como el número de Péclet resultó mayor a 100 se puede utilizar la Ecuación de Ogata.***

A continuación se presenta un ejemplo de cálculo del coeficiente de Dispersión Longitudinal aplicando la ecuación simplificada por Ogata.

Teniendo  $C/C_0$  se multiplica por 2, obteniéndose el valor 0,8708272; con este valor se obtiene el valor de  $\beta$  interpolando en la gráfica de la función de error, obteniéndose el valor de 0,118560; el cálculo del coeficiente de Dispersión Longitudinal se realiza usando la ecuación 13 del Capítulo III.

Sustituyendo:

$$D = \left( \frac{0,875 - 9,7882 \times 10^{-4}(1018)}{2(0,118560)} \right)^2 / 1018$$

$$D = 2,7566 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$

A continuación se presentan en las siguientes tablas los demás valores calculados:

**1<sup>era</sup> Toma de Muestras****TABLA 4.22.** Valores de dispersión de la primera toma del primer grupo de pruebas

N° de Muestra	C/Co	$\beta$	Coefficiente de Dispersión Longitudinal (m <sup>2</sup> /s)	
1	0,4354136	0,11856	0,0002757	
2	0,4716981	0,05030	0,0129100	
3	0,5348331	-0,06490	0,0184300	
4	0,6023222	-0,19338	0,0035021	
5	0,6966618	-0,36367	0,0014315	
6	0,7220610	-0,41480	0,0014582	
Fuente: Elaboración propia			<b>D promedio</b>	<b>0,0062596</b>

**2<sup>da</sup> Toma de Muestras****TABLA 4.23.** Valores de dispersión de la segunda toma del primer grupo de pruebas

N° de Muestra	C/Co	$\beta$	Coefficiente de Dispersión Longitudinal (m <sup>2</sup> /s)	
1	0,4970972	$5,14972 \times 10^{-3}$	0,1366000	
2	0,5587808	-0,10550	0,0029363	
3	0,5442671	-0,08608	0,0104700	
4	0,6748911	-0,32150	0,0012670	
5	0,7184325	-0,40797	0,0013750	
6	0,7402032	-0,45493	0,0012123	
Fuente: Elaboración propia			<b>D promedio</b>	<b>0,025600</b>



#### 4.3.1.2. Aplicación del Método de Ogata al segundo grupo de pruebas

De igual manera, antes de calcular el coeficiente de Dispersión Longitudinal se calculó el número de Péclet, como se explica a continuación:

El valor teórico de la dispersión longitudinal, se obtiene haciendo uso de la ecuación (11) del capítulo III del presente trabajo especial de grado. Este valor fue usado para conocer el valor del número de Péclet y así demostrar que se puede aplicar la ecuación simplificada por Ogata de la ecuación de Advección – Dispersión.

Los valores a utilizar son:

$v$  = velocidad de poros =  $1,5059 \times 10^{-3}$  m/s

$d_{50}$  = promedio del tamaño de las partículas entre (tamiz 20) 0,85 mm y tamiz (40) 0,425 mm =  $6,375 \times 10^{-4}$  m.

$\nu$  = viscosidad cinemática, valor obtenido del libro de mecánica de fluidos de Merle y Potter, se trabajará con un valor igual a  $0,804 \times 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s

Sustituyendo en la ecuación y despejando el valor de la dispersión, se obtiene:

$$D = 4,8961 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

El número de Péclet es:

$$\text{Péclet} = 269,13 \gg 100 \quad \text{O.K.}$$

***Como el número de Péclet resultó mayor a 100 se puede utilizar la Ecuación de Ogata.***

A continuación se muestran los valores del coeficiente de Dispersión Longitudinal:

**1<sup>era</sup> Toma de Muestras****TABLA 4.24.** Valores de dispersión de la primera toma del segundo grupo de pruebas

N° de Muestra	C/Co	$\beta$	Coefficiente de Dispersión Longitudinal (m <sup>2</sup> /s)	
1	0,8785047	-0,808518	0,0013926	
2	0,8841121	-0,814925	0,0016158	
3	0,9121495	-0,913138	0,0014837	
4	0,9289720	-1,005700	0,0013863	
5	0,9420561	-1,101176	0,0012931	
6	0,9536449	-1,108154	0,0014125	
Fuente: Elaboración propia			<b>D promedio</b>	<b>0,0014307</b>

**2<sup>da</sup> Toma de Muestras****TABLA 4.25.** Valores de dispersión de la segunda toma del segundo grupo de pruebas

N° de Muestra	C/Co	$\beta$	Coefficiente de Dispersión Longitudinal (m <sup>2</sup> /s)	
1	0,8859813	-0,85068	0,0012580	
2	0,8971963	-0,86245	0,0014426	
3	0,8897196	-0,85460	0,0016939	
4	0,9457944	-1,10342	0,0011517	
5	0,9570093	-1,20090	0,0010235	
6	0,9719626	-1,30181	0,0010235	
Fuente: Elaboración propia			<b>D promedio</b>	<b>0,0012762</b>



### 4.3.2. MÉTODO DE SINGH

A continuación se presenta en las siguientes Tablas los datos arrojados del coeficiente de Dispersión Longitudinal al aplicar el método gráfico propuesto por Sushil Singh.

Se presenta además, en las tablas, los valores que se requieren para obtener las gráficas que proporcionan los valores de las coordenadas del pico y así obtener el valor del coeficiente de Dispersión Longitudinal.

#### 4.3.2.1. Aplicación del Método de Singh al primer grupo de pruebas

A continuación se presentan los valores de  $t$  y  $m$ , a partir de los cuales se obtiene la ubicación exacta del pico y posteriormente el valor del coeficiente de Dispersión Longitudinal.

El procedimiento empleado es el descrito en el diagrama 2 del Capítulo III.

#### 1<sup>era</sup> Toma de Muestras

**TABLA 4.26.** Valores de  $t$  y  $m$  de la primera toma del primer grupo de pruebas

Nº de Muestra	C/Co	t	m
1	0,4354136		
2	0,4716981	659	0,000357889
3	0,5348331	1318	0,000165699
4	0,6023222	1618	0,000217707
5	0,6966618	1918	0,000269715
6	0,7220610	2218	0,000199565

Fuente: Elaboración propia

Valor de las coordenadas del pico:

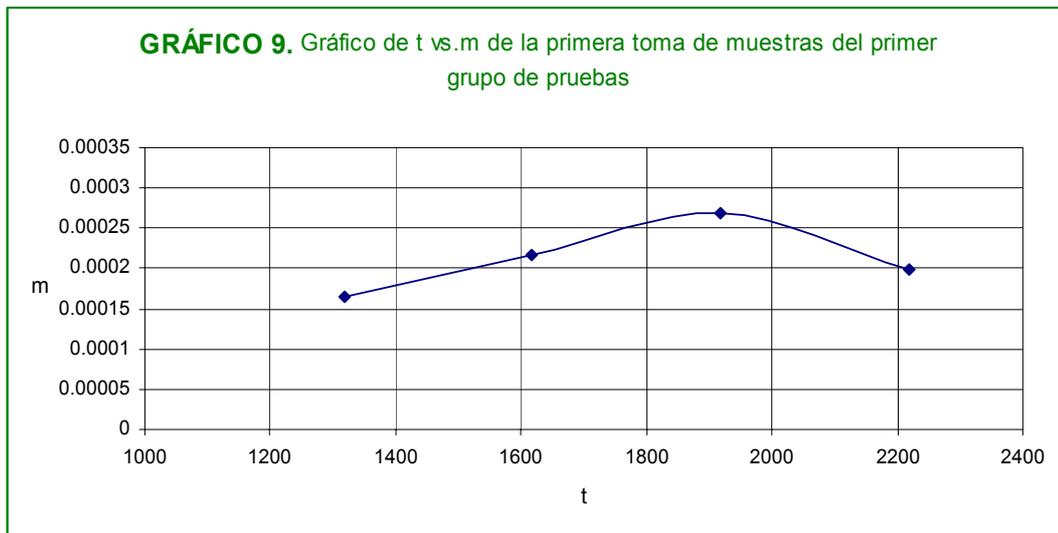


$t_0$	$m_0$
1895,70	$2,70048 \times 10^{-4}$

El valor del coeficiente de Dispersión Longitudinal

$$D = 1,22635 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$

A continuación se presenta la Gráfica 9 que representa la curva de t versus m.



**2<sup>da</sup> Toma de Muestras****TABLA 4.27.** Valores de t y m de la segunda toma del primer grupo de pruebas

<b>N° de Muestra</b>	<b>C/Co</b>	<b>t</b>	<b>m</b>
1	0,4970972		
2	0,5587808	659	0,000423961
3	0,5442671	1318	$7,86164 \times 10^{-5}$
4	0,6748911	1618	0,000193517
5	0,7184325	1918	0,000290276
6	0,7402032	2218	0,000108853

Fuente: Elaboración propia

Valor de las coordenadas del pico

<b>t<sub>o</sub></b>	<b>m<sub>o</sub></b>
1872,35	$2,9350 \times 10^{-4}$

El valor del coeficiente de Dispersión Longitudinal

$$D = 1,07751 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$

A continuación se presenta la Gráfica 10 que representa la curva de t versus m.





#### 4.3.2.2. Aplicación del Método de Singh al segundo grupo de pruebas

##### 1<sup>era</sup> Toma de Muestras

**TABLA 4.28.** Valores de t y m de la primera toma del segundo grupo de pruebas

Nº de Muestra	C/Co	t	m
1	0,8785047		
2	0,8841121	1470	0,000300718
3	0,9121495	2940	$5,60745 \times 10^{-5}$
4	0,9289720	3240	$7,47664 \times 10^{-5}$
5	0,9420561	3540	$4,98442 \times 10^{-5}$
6	0,9536449	3840	$4,11215 \times 10^{-5}$

Fuente: Elaboración propia

Valor de las coordenadas del pico

$t_0$	$m_0$
3218,66	$7,48836 \times 10^{-5}$

El valor del coeficiente de Dispersión Longitudinal

$$D = 3,2586 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$

A continuación se presenta la Gráfica 11 que representa la curva de t versus m.



**2<sup>da</sup> Toma de Muestras****TABLA 4.29.** Valores de t y m de la segunda toma del segundo grupo de pruebas

<b>N° de Muestra</b>	<b>C/Co</b>	<b>t</b>	<b>m</b>
1	0,8859813		
2	0,8971963	1470	0,0003052
3	0,8897196	2940	$6,23053 \times 10^{-6}$
4	0,9457944	3240	$8,09969 \times 10^{-5}$
5	0,9570093	3540	0,00011215
6	0,9719626	3840	$4,36137 \times 10^{-5}$

Fuente: Elaboración propia

Valor de las coordenadas del pico

<b>t<sub>o</sub></b>	<b>m<sub>o</sub></b>
3481,50	$1,1410 \times 10^{-4}$

El valor del coeficiente de Dispersión Longitudinal

$$D = 1,1090 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$

A continuación se presenta la Gráfica 12 que representa la curva de t versus m.





#### **4.4. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LA CURVA DE CONCENTRACIÓN RELATIVA VERSUS TIEMPO.**

Una vez aplicados los tratamientos y realizadas las mediciones, los datos fueron sometidos a un proceso de organización a efecto de proceder a realizar el respectivo análisis.

Si se observan los gráficos 1 y 2 del primer grupo de pruebas, nos damos cuenta de que ambas tienden a llegar a 1, lo cual ocurre cuando la concentración del trazador tiende a igualar la concentración inicial, es decir, existe una presencia marcada del trazador en la arena.

Por otro lado, si se superpone ambas curvas se puede observar que tienen un comportamiento similar, es decir, no ocurren situaciones extrañas durante el desarrollo del experimento.

De igual manera ocurre si observamos los gráficos 3 y 4 del segundo grupo de pruebas.

Es importante destacar que la dispersión de los datos puede tener distinto origen: presencia de inhomogeneidades en la columna de suelo, distribución no uniforme de la sustancia trazadora, errores de medición, etc.

Los resultados arrojados al analizar las concentraciones de NaCl a la salida del recipiente plástico dieron distintos a lo que en realidad se preparó. En el primer grupo de pruebas, se preparó para que la concentración fuese de 2 gr/L y se obtuvo una concentración de 6,89 gr/L, con lo cual se evidencia el hecho de que el agua destilada tenía contenido de sales y al preparar la concentración deseada lo que se obtuvo fue una concentración mayor.



De igual manera ocurre para el segundo set de pruebas, solo que en este caso se ve influenciado por otro factor: La arena usada para el segundo set fue la misma del primer set de pruebas, a pesar de que se le agregó agua destilada antes de comenzar la prueba, parece que no fue suficiente ya que la concentración obtenida fue más del doble para la que se preparó.

#### **4.5. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LA CURVA CONCENTRACIÓN RELATIVA VERSUS DISTANCIA.**

En las curvas trazadas de concentración relativa versus distancia se puede apreciar el aumento de la concentración del contaminante a lo largo de la columna. En las gráficas 5 y 6 se encuentran dos curvas, las cuales representan la recolección simultánea de muestras para dos tiempos distintos.

Para el primer grupo de pruebas se puede observar el comportamiento de la sustancia trazadora. En la primera curva trazada para un tiempo igual a 3138 segundos ocurre un cambio brusco en la segunda válvula, lo cual puede ser a que en ese momento la sustancia trazadora se movió de distinta forma. Por el rozamiento de la sustancia trazadora con las superficies sólidas del medio, ó que en ese momento la manguera de recolección de muestra se llenó de arena ocasionando que no fuese muy representativa la recolección de la muestra, errores de medición, etc.

Para el segundo grupo de pruebas, se podría decir de la segunda curva trazada que su comportamiento es normal, es decir, comparada con la primera curva no existen cambios bruscos a lo largo de la misma.

Por otro lado, en ambas curvas del primer grupo de pruebas, ocurre una situación muy característica, ambas pasan el valor de 1 en la válvula 1 y 2. Situación que no debió ocurrir, ya que el valor máximo de la concentración medida (recolectada en la



válvula) en la arena no puede ser mayor que la concentración de la sustancia agregada (original) o en su defecto debe tener un valor igual a 1.

Esto puede ser ocasionado por las siguientes razones:

- La arena estuvo expuesta al aire libre, es decir, estuvo expuesta a agentes externos que pudieron aumentar el contenido de sales.
- El agua destilada con la que se preparó la sustancia trazadora, tenía contenidos de sales.

La segunda razón puede influir, ya que se utilizó agua destilada y no agua desionizada. El agua desionizada es más pura que el agua destilada.

#### **4.6. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS POR EL MÉTODO DE OGATA.**

Para cada grupo de pruebas los valores obtenidos de la dispersión longitudinal por el método de Ogata, dan con una clara tendencia a la disminución, ya que a medida que aumenta el tiempo la sustancia trazadora tiende a aumentar su concentración a lo largo de la columna y esta variación de la concentración con el tiempo tiende a estabilizarse debido a fenómenos físico – químicos como la difusión molecular o puramente físicos como la dispersión mecánica.

La disminución en los valores obtenidos puede ser ocasionado por:

- El rozamiento de la sustancia trazadora con las superficies sólidas del medio.
- A la formación de canales intergranulares, es decir, se pudo acumular más arena fina por un lado ocasionando un desvío del líquido hacia los canales donde se encuentran las partículas más grandes.



Antes de emplear la forma reducida de la ecuación de Advección – Dispersión se comprobó que el número de Péclet fuese mayor de 100. Para llevar a cabo el cálculo de este valor fue necesario calcular un valor de la dispersión longitudinal teórico.

Los promedios de los valores de la dispersión longitudinal en las dos tomas de muestras del primer grupo de pruebas dan levemente lejanos.

Sin embargo, los promedios de las dos tomas de muestras del segundo set de datos dan muy cercanos.

Para el primer set de datos se pudo observar lo siguiente: los valores de beta ( $\beta$ ) que se obtienen de la función de error complementaria, tienen un cambio de positivos a negativos, es decir, se trabaja con dos partes diferentes de la curva, una parte positiva y una parte negativa.

Si se promedian los valores de la dispersión en los que se trabajo con valores de beta de un mismo signo se podrá observar que dan muy cercanos los valores de la dispersión.

Lo dicho anteriormente lo podría afirmar el segundo grupo de pruebas, ya que en las dos tomas de muestras se usaron valores negativos de beta y los promedios de los valores de la dispersión longitudinal dan muy cercanos.

También, pudo influir los valores del tiempo en las tomas de las muestras, en el primer grupo los tiempos fueron largos mientras que para el segundo grupo los tiempos fueron cortos.



#### **4.7. INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS POR EL MÉTODO DE SINGH.**

Los valores del coeficiente de dispersión longitudinal obtenidos por el método de Singh en las dos tomas de muestras del primer grupo de pruebas dan muy cercanos, de igual manera ocurre con el segundo grupo de pruebas.

Antes de emplear la ecuación propuesta por Singh, se buscó la ubicación exacta del pico en la gráfica de  $t$  versus  $m$ , el valor de las coordenadas del pico son necesarios para conocer el valor de la Dispersión.

La ubicación de las coordenadas del pico consistió en seleccionar tres puntos dentro de la curva descrita por ellos mismos y que además, se tenga certeza de que el pico se encuentra entre ellos tres.

En el presente estudio se tomó como criterio para la selección de estos puntos, que ellos describan una parte de la curva bien pronunciada, es decir, la parte en la que se forme como una campana. Si se seleccionan estos puntos en una parte lisa de la curva el resultado puede tender a confusión.

La aplicación de este método resulta mucho más sencilla si lo comparamos con el método propuesto por Ogata.

Sin embargo, los valores obtenidos por el método de Ogata dan levemente mayores a los obtenidos por el método de Singh. Esto puede ser ocasionado a que las ecuaciones usadas para la obtención del valor de la dispersión longitudinal por el método de Ogata necesitan valores que se obtienen experimentalmente, como son la permeabilidad y la porosidad los cuales pueden estar influenciados por errores humanos y de medición, pudiéndose contribuir a incrementar el valor final.



## CAPÍTULO III

### 3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN

De acuerdo a los objetivos propuestos, el tipo de investigación en la cual se basó el presente trabajo especial de grado fue de carácter descriptivo, el cual consiste en la determinación de las particularidades de un hecho, fenómeno o grupo establecido, es decir, la comparación de este con un hecho de características similares con el fin de establecer su estructura o comportamiento. Entre las definiciones de este tipo de investigación está la de Carlos A. Sabino (1992), el cual señala: “Las investigaciones descriptivas se proponen conocer grupos homogéneos de fenómenos utilizando criterios sistemáticos que permitan poner de manifiesto su estructura o comportamiento. No se ocupa, pues, de la verificación de hipótesis, sino de la descripción de hechos a partir de un criterio o modelo teórico definido previamente”. Otra definición es la de Tevni Grajales (1998), el cual señala: “Los estudios descriptivos buscan desarrollar una imagen o fiel representación (descripción) del fenómeno estudiado a partir de sus características. Describir en este caso es sinónimo de medir. Miden variables o conceptos con el fin de especificar las propiedades importantes de personas, grupos o fenómenos bajo análisis. El énfasis está en el estudio independiente de cada característica, es posible que de alguna manera se integren las mediciones de dos o más características con el fin de determinar cómo es o cómo se manifiesta el fenómeno. Pero en ningún momento se pretende establecer la forma de relación entre estas características. En algunos casos los resultados pueden ser usados para predecir”.

Fundamentándonos en las ideas anteriores, el presente trabajo se basó en la obtención de una variable como lo es la Dispersión Longitudinal, la cual se obtuvo al partir de pruebas realizadas a una columna de suelo.



En este capítulo se señala la metodología empleada para llevar a cabo el estudio, donde se establece el proceso investigativo de dicho trabajo, el cual permite indagar y relacionar los datos que se obtengan.

### **3.2. TIPO DE ESTUDIO**

La estrategia que se adoptará para responder al problema planteado corresponde a una investigación de campo, ya que la recolección de datos se efectuara directamente de la realidad, sin manipular o controlar variable alguna, la cual se basa en la obtención y análisis provenientes de las pruebas realizadas sobre una columna de suelo.

Según F. Arias (1999) “Investigación de Campo: consiste en la recolección de datos directamente de la realidad donde ocurren los hechos, sin manipular o controlar variable alguna”.

Es importante destacar el hecho de que, en el presente estudio se creó un ambiente artificial para realizar la investigación y así poder obtener las variables necesarias para alcanzar el objetivo principal, como es obtener el coeficiente de dispersión longitudinal.

### **3.3. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA**

#### **3.3.1. RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN**

Para realizar el presente estudio, se buscó la información disponible sobre estudios (artículos científicos) realizados acerca de la dispersión de contaminantes en medios porosos, así como también información sobre ecuaciones que relacionan el transporte de contaminantes de solutos en el suelo y sobre los métodos o procedimientos aplicados para obtener los datos necesarios para describir el transporte de fluidos en medios porosos.



### 3.3.2. DESCRIPCIÓN DE LAS ACTIVIDADES DEL ESTUDIO

#### 3.3.2.1. Construcción de la columna de suelo

Para la elaboración de la columna de suelo que se utilizó en el presente estudio, se buscó que esta fuese de material acrílico para que así se pudiese observar el experimento, la columna que se adecuó para que trabajase como columna de suelo fue el filtro piloto elaborado por Jesús María Rodríguez Galea como Trabajo Especial de Grado.

Dicho filtro tiene una altura de aproximadamente de 2 metros, a continuación se da una descripción más detallada de los componentes y materiales que se usaron en la construcción del filtro:

- ❖ 4 Láminas de acrílico de 9 mm de espesor
- ❖ 4 Láminas de acrílico de 12 mm de espesor
- ❖ 3 Válvulas de paso de 1" de diámetro
- ❖ 1 Válvula de paso de  $\frac{3}{4}$ " de diámetro
- ❖  $\frac{1}{2}$  mts de goma para empacaduras
- ❖ 48 tornillos tipo Allen de  $\frac{5}{16}$ " de diámetro
- ❖ 1 Tubo de plástico de 1" de diámetro
- ❖ 1 Tubo plástico de  $\frac{3}{4}$ " de diámetro
- ❖ 10 Tubos de pegamento acrílico

Adicionalmente este filtro estaba lleno de diferentes tamaños de arenas y gravas que sirven como materiales filtrantes.

Para que el filtro piloto pudiese trabajar como columna de suelo, se tuvieron que realizar varias modificaciones, las cuales se detallan a continuación:



1.- Se procedió a separar el filtro a la altura de 1 m medido desde la base por una parte que estaba unida con goma para empacaduras.

2.- Se retiró el material que se encontraba dentro del filtro. Cada material se tamizo para separarlo de los demás y se colocó en recipientes identificados con el tamaño del mismo.

3.- Se tuvo que perforar el filtro, para que se pudiesen realizar las mediciones que requiere el experimento, dichas perforaciones son para medir la caída de presiones, para la toma las muestras y así realizar los análisis de concentraciones, como el filtro esta compuesto por láminas de acrílico de 25 cm x 25 cm unidas por una junta, se procedió a realizar las perforaciones de la siguiente manera:

- ❖ Por un lado de la columna se realizaron 8 perforaciones para medir las caídas de presión
- ❖ Por otro lado de la columna se realizaron 4 perforaciones de la toma de muestras.

Dichas perforaciones se realizaron con un taladro, utilizando una mecha de 3/8”.

Del lado donde se realizaron las 8 perforaciones se pegaron pequeños pedazos de tubo de cobre a los cuales se les colocarían las mangueras que van al banco piezométrico. Por el otro lado se pegaron válvulas de paso.

En ambos lados, por la parte de adentro se colocaron mangueras perforadas, para que el flujo que se recoja sea por varias partes de la columna y no solo de los bordes de la misma. (Ver Registro fotográfico 2)

Además de todas estas modificaciones, se procedió a reforzar las juntas de la base con silicone.



### 3.3.2.2. Selección del Medio Poroso

La arena que se utilizó en el presente estudio, se seleccionó realizando un análisis de todos los estudios hechos sobre el transporte de fluidos en medios porosos. Para su selección se tomaron en cuenta dos criterios: que la arena fuese un medio homogéneo e isotrópico.

De acuerdo a la variedad de tamaños y de permeabilidades de las arenas utilizadas en varios estudios, se tomó la decisión de utilizar la misma del artículo científico titulado: **Dispersion in Layered Porous Media (Dispersión en Medio Poroso Estratificado)**, por Uri Shamir y Donald Harleman. En dicho artículo se trabaja con arena de sílice de varios tamaños para simular la dispersión en un medio estratificado.

Como en el presente estudio se hace el análisis para un solo estrato, se seleccionó un solo tipo de arena, la cual consistió en arena de sílice de tamaño comprendido entre los tamices o mallas 20 (0,85 mm) y 40 (0,425 mm), dichos tamaños se encuentran dentro de los tipos de arenas utilizadas por el artículo científico mencionado en el párrafo anterior.

Esta arena fue adquirida en Suministros e Inversiones SIDCA, los cuales se encargan de la venta de arenas para filtros.

Según la clasificación de Lambe y Whitman (1994), la arena utilizada se encuentra dentro de la clasificación Mediana y Gruesa.

### 3.3.2.3. Acondicionamiento del Banco Piezométrico

Fue necesario la utilización de un banco piezométrico para medir las caídas de presiones durante el desarrollo de las pruebas, las cuales son necesarias para conseguir el objetivo principal del presente estudio.



Cada perforación que se hizo en la columna de suelo, fue hecha para medir la caída de presión en el punto donde se tomo la muestra, es decir, el punto donde se toma la muestra es el punto medio donde se miden las caídas de presiones.

El banco piezométrico usado, fue tomado del Laboratorio de Hidráulica, el cual se encontraba en completo desuso. Dicho banco piezométrico se limpio y además se probaron cuales de los tubos servían (no todos sirven), después de hacer todos los acondicionamientos respectivos se puso en uso. (Ver Registro fotográfico 1)

### **3.3.2.4 Selección de la sustancia trazadora**

Al igual que la selección de la arena, la sustancia trazadora se eligió analizando varios estudios relacionados con el transporte de fluidos en medios poroso. Entre las sustancias que se utilizaron en estos estudios se encuentran: NaCl, CaCl<sub>2</sub>, CaBr<sub>2</sub>, KBr.

Recordando el planteamiento del problema del presente estudio en el se hablo sobre la contaminación de aguas subterráneas provocadas por infiltración de aguas contaminadas que provienen de los ríos y canales, recargas artificiales y también por la intrusión del agua de mar hacia el interior de los acuíferos costeros. Se tomó como criterio principal para la selección de la sustancia trazadora la contaminación de estas fuentes por la intrusión del agua de mar.

Por lo que la sustancia trazadora seleccionada fue NaCl, esta sustancia representa el 80 por ciento de las sales en solución en el agua de mar, es importante aclarar que no se tomo directamente agua salada de mar porque esta contiene muchos elementos además de cloruro de sodio.

Es importante resaltar el hecho que, el cloruro de sodio tiene una considerable historia como trazador. Una de sus principales aplicaciones ha sido en la búsqueda de



contaminación en pozos. Es admirablemente eficaz para estos fines por cinco razones:

1. Su presencia no es visualmente detectable
2. Es un constituyente normal del agua y no tiene efectos tóxicos
3. El ión cloruro no es adsorbido por las formaciones del suelo
4. No es alterado ni combinado no cambiado en los proceso biológicos
5. El ión cloruro se puede medir fácilmente.

Para un grupo de pruebas, la concentración de la sustancia se tomo igual que la del artículo científico titulado: Dispersion in Layered Porous Media (Dispersión en Medio Poroso Estratificado), por Uri Shamir y Donald Harleman. En dicho artículo se uso una solución salda de 0.2% de NaCl (por peso). Para otro grupo de pruebas, la concentración fue del 0.6% de NaCl (por peso).

La cantidad de NaCl agregada fue:

0.2 % (por peso)	156 gr NaCl
0.6 % (por peso)	468 gr NaCl

**Tabla 3.1.** Cantidad de NaCl agregado para conseguir las concentraciones deseadas  
Fuente: Elaboración propia

### 3.3.2.5. Selección del caudal

Para la selección del caudal, primero se realizaron pruebas hidráulicas para definir el mismo.

Dichos caudales fueron regulados por una válvula de paso, el mismo fue fijado a partir de las pruebas hidráulicas realizadas y tomando en consideración la permeabilidad de la arena, se decidió trabajar con un caudal de 0.012 L/seg para el primer grupo de pruebas y 0.017 L/seg para el segundo grupo de pruebas.



### 3.3.2.6. Recolección de datos

Para realizar la curva de tiempo versus concentración relativa se esperó a que saliera la sustancia trazadora de la válvula 4, una vez que empezó a salir se tomó la primera muestra y luego se esperó un tiempo de cinco (5) minutos para tomar la siguiente muestra, y así sucesivamente.

Se recolectaron dos muestras por cada grupo de pruebas, esto se realizó con la finalidad de conocer el comportamiento de la concentración en cada grupo de pruebas, ya que se pueden presentar comportamientos extraños que no se pueden explicar en una sola toma de muestra.

En total se recolectaron 12 muestras por cada grupo de pruebas.

Por otra parte, para realizar la curva de distancia versus concentración relativa, se esperó a que de las cuatro válvulas saliera la sustancia trazadora, una vez ocurrido esto se recolectó las muestras simultáneamente de cada válvula, luego se esperó por un espacio de cinco (5) minutos y se volvió a recolectar las muestras simultáneamente.

En total se recolectaron 8 muestras por cada grupo de pruebas.

Adicionalmente, para cada set de pruebas, se recolectó la sustancia que sale de la válvula del tanque con la finalidad de conocer su concentración, ya que como se uso agua destilada para su preparación y no agua desionizada, esta pudiese contener sales y esto pudiese aumentar la concentración de Sal en el tanque.

Las muestras recolectadas se colocaron en envases de plásticos de 60 cc.



### 3.3.2.7. Análisis de permeabilidad al medio poroso

El análisis a realizar para conocer la permeabilidad de la arena seleccionada es mediante el uso del permeámetro de cabeza constante.

Lamentablemente, en la Escuela de Ingeniería Civil el equipo no se encuentra en funcionamiento.

Debido a esto, fue necesario realizar un experimento sencillo que nos permitió conocer el valor de la permeabilidad. El mismo se detalla a continuación:

Los materiales usados fueron:

- Un recipiente plástico sin fondo
- Un martillo
- Una tabla de madera
- Una regla
- Un recipiente para contener el agua
- Un reloj
- Cinta adhesiva
- Lápiz y papel

El procedimiento realizado fue el siguiente:

- Se colocó el recipiente plástico en el suelo con la tabla de madera encima. Luego, se hundió el recipiente unos 5 cm dentro del suelo golpeándolo con un martillo.
- Se colocó un trozo de cinta en la parte superior del recipiente de modo que quedase paralela al borde.
- Se midió la distancia desde la parte inferior de la cinta hasta el suelo.



- Se agregó el agua dentro del recipiente plástico hasta que llegase al nivel inferior de la cinta. Se anotó la hora.
- Se determinó la cantidad de agua que penetró en el suelo midiendo la distancia entre la marca de la altura al comenzar y la superficie del agua. Se midió la distancia a los 5 minutos y a los 10 minutos.
- Como el agua fue absorbida toda durante el experimento, se llenó el recipiente inmediatamente hasta la marca de la cinta. Las mediciones hechas a partir de este momento se anotan como la distancia total desde el suelo hasta la cinta más la distancia del agua hasta la cinta.
- Para obtener la permeabilidad se dividió la cantidad de agua absorbida entre el tiempo.

El detalle del experimento realizado se encuentra en el anexo 7.

#### **3.3.2.8. Análisis de porosidad al medio poroso**

Para determinar la porosidad a la arena se usaron vasos graduados llenos de arena hasta la marca de 300 mL

Luego, se agregó agua hasta que la arena no pudiese absorber más.

Para determinar la porosidad de la arena se dividió el volumen del agua que se pudo verter entre el volumen total del material.

#### **3.3.2.9. Análisis de las concentraciones**

Los análisis de las concentraciones se realizaron en el Centro de Investigaciones Químicas de la Facultad de Ingeniería, dichos análisis fueron hechos por la Técnico Zuelima Pérez. A continuación se presenta una descripción del equipo usado:



El equipo es un Espectrofotómetro de Absorción Atómica, marca PERKIN ELMER, modelo 3100.

Debido a que se midió la concentración del Sodio (Na), el tipo de análisis realizado fue de emisión.

Las condiciones estándares a las que debe trabajar el equipo para los análisis son:

- Wavelength (nm) = 589
- Slit (nm) = 0,2

Las especificaciones del equipo para poder realizar este tipo de análisis se encuentran en los Anexos.

Es importante resaltar, que en los análisis de concentraciones, sólo se obtiene la concentración del elemento.

Recordando que se eligió NaCl como sustancia trazadora, es necesario, explicar que se pudo medir la concentración de Na tanto como la de Cl, ya que por ser una relación uno a uno, teóricamente están presentes ambos elementos en concentraciones iguales. Sin embargo, se decidió medir la concentración del Na, por lo rápido y sencillo que resulta el empleo del equipo de Absorción Atómica.

De acuerdo a las especificaciones del equipo, la concentración máxima que mide el equipo es de 100 p.p.m., y las concentraciones de las muestras llevadas eran muy altas por lo que fue necesario diluirlas para que el equipo pudiese medir la concentración de las muestras.

La dilución de las muestras fue: se diluyó 1 mL de la muestra en balones de 250 mL, es decir, a balones de 250 mL se le agregó un 1 mL de la muestra y luego se le agregó agua destilada hasta llegar al aforo de los balones.



Antes de añadir el agua destilada se le agregó un (1) mL de KCl, esto se realizó con la finalidad de eliminar posibles interferencias (sustancias disueltas en las muestras) que se pudiesen presentar en la lectura del equipo durante el proceso de medición.

De acuerdo a lo señalado en los párrafos anteriores, las muestras fueron diluidas para poder medir las concentraciones, esto quiere decir, que para obtener la concentración de la muestra original hay que aplicar un factor de dilución a la concentración medida por el equipo.

El factor de dilución mencionado anteriormente, es el número por el cual se debe multiplicar la concentración de un soluto en una dilución, para reproducir la concentración de la muestra original.

Expresado en forma de ecuación:

$$\text{Factor de Dilución} = \frac{\text{Volumen Total}}{\text{Volumen de la Alicuota}} \quad (1)$$

Aplicando la ecuación anterior se obtiene que el factor de dilución es:

$$\text{Factor de Dilución} = \frac{250 \text{ mL}}{1 \text{ mL}}$$

**Factor de Dilución: 250**



### 3.4. METODOS USADOS EN EL ESTUDIO

A continuación se presenta una breve explicación de los métodos usados para obtener el coeficiente de dispersión longitudinal experimentalmente:

#### 3.4.1. Ogata, A., y Banks, R.B. (1961). “Una solución de la ecuación diferencial de la dispersión longitudinal en medios porosos”.

Para obtener la ecuación que describe el cambio en la calidad del agua a medida que fluye a través del medio poroso, se establecen las siguientes condiciones a la ecuación de advección – dispersión:

$$C(x, 0) = 0 \text{ para } X \geq 0$$

$$C(0,t) = C_0 \text{ para } t \geq 0$$

$$C(\infty,t) = 0 \text{ para } t \geq 0$$

Para el caso de solutos conservativos ( $r = 0$ ), la solución analítica es dada por:

$$\frac{C(x,t)}{C_0} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[ \frac{x-ut}{2\sqrt{DLt}} \right] + \frac{1}{2} \exp \left\{ \frac{ux}{DL} \right\} \operatorname{erfc} \left[ \frac{x+ux}{2\sqrt{DLt}} \right] \quad (2)$$

Este método presenta una forma simplificada de la ecuación anterior. Se omite el segundo término de la ecuación para valores de  $Ux/D > 100$ . Con lo cual se produce un error máximo del 3%.

El término anterior es conocido como el número de Péclet, el cual es un parámetro dimensional. Describe la influencia relativa de los efectos caracterizados por los problemas de advección – dispersión que envuelve el uso de componentes conservativos y no conservativos. También domina la naturaleza del problema, si el



valor es bajo indica que la dispersión domina el problema y si el valor es grande la advección domina el problema.

La ecuación reducida es:

$$C(x, t) = \frac{C_0}{2} \left[ \operatorname{erfc} \left( \frac{x - Ut}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] \quad (3)$$

### 3.4.2. Método de Sushil Sinhg para la estimación del coeficiente de dispersión y porosidad a partir de pruebas con columnas de suelo.

En este estudio se propone un método simple para la estimación del coeficiente de dispersión, no se requiere conocer los valores de porosidad, la sección transversal de la columna de suelo y del caudal que fluye a través de la columna. Esto evita completamente los posibles errores que envuelven las mediciones de esas cantidades. Hace uso de un pico máximo de las observaciones hechas a la curva de desarrollo (BTC).

Derivando la ecuación reducida de Ogata y Banks (1961) con respecto al tiempo se obtiene:

$$D = \frac{x^2}{4\pi m_0^2 t_0^2} \quad (4)$$

Donde  $t_0$  es el tiempo correspondiente para  $\bar{c} = 0.5$  y  $m_0$  es el valor en la BTC para ese tiempo.

Existen dos métodos para obtener los valores de  $m_0$  y  $t_0$ :

1.- Por construcción gráfica: Se grafican los valores de  $m$  vs  $t$  y se obtiene directamente de la gráfica el valor del pico ( $m_0; t_0$ ). Los valores de  $m$  y  $t$  son:



$$m_{\bar{i}} = \frac{\bar{c}_i - \bar{c}_{i-2}}{t_i - t_{i-2}} \quad (5)$$

$$\bar{t} = \frac{t_i + t_{i-2}}{2} \quad (6)$$

2.- Por selección de una terna de puntos consecutivos: En este método se busca que el pico se encuentre dentro de la terna,  $m_0$  y  $t_0$  son dados por las ecuaciones:

$$m_0 = m_1 + \frac{k_1^2}{4k_2k_3} \quad (7)$$

$$t_0 = t_1 + \frac{k_1}{2k_2} \quad (8)$$

Donde:

$$k_1 = (m_2 - m_1)(t_3 - t_1)^2 - (m_3 - m_1)(t_2 - t_1)^2 \quad (9)$$

$$k_2 = (m_2 - m_1)(t_3 - t_1) - (m_3 - m_1)(t_2 - t_1) \quad (10)$$

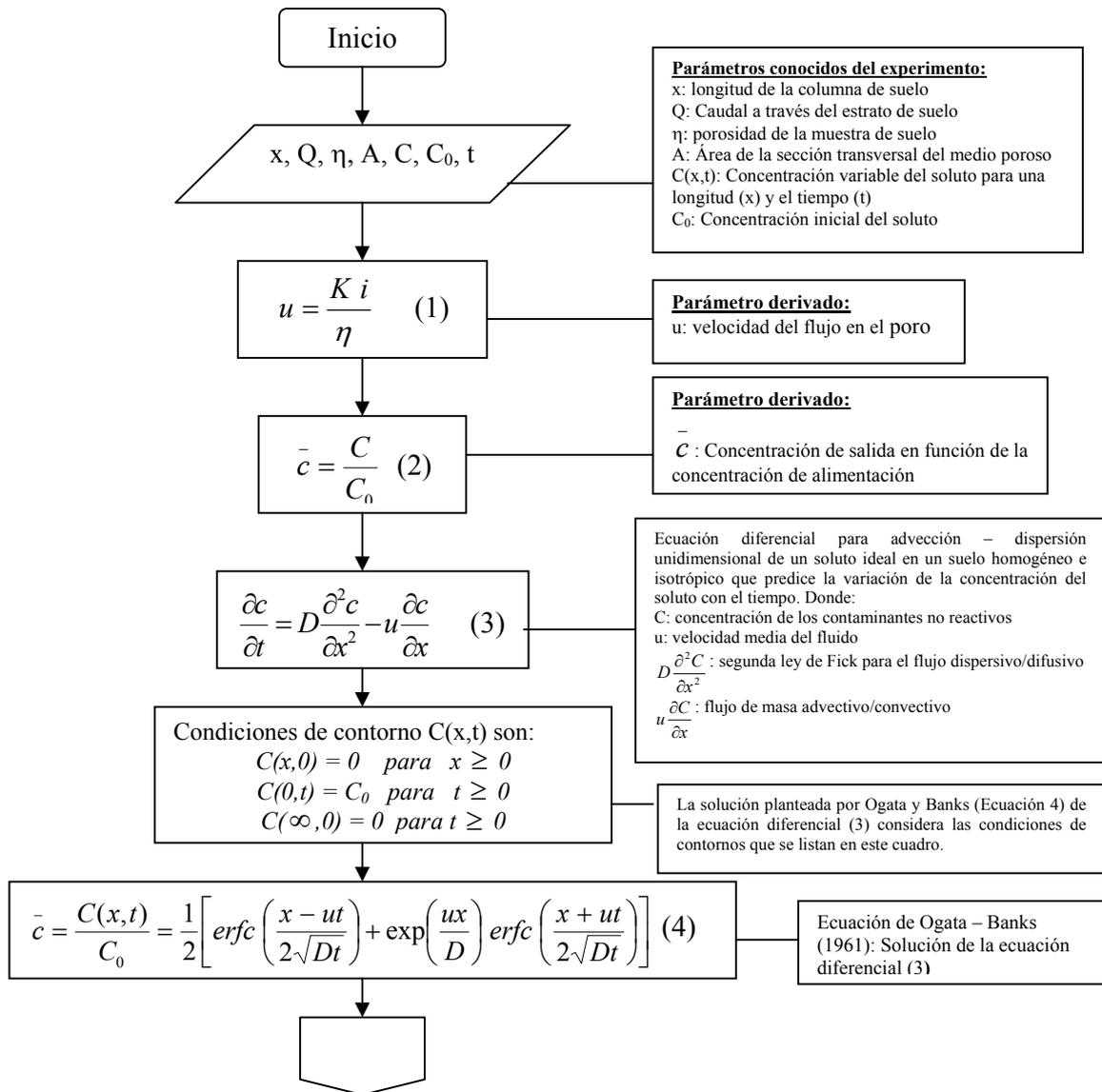
$$k_3 = (t_1 - t_2)(t_2 - t_3)(t_3 - t_1) \quad (11)$$

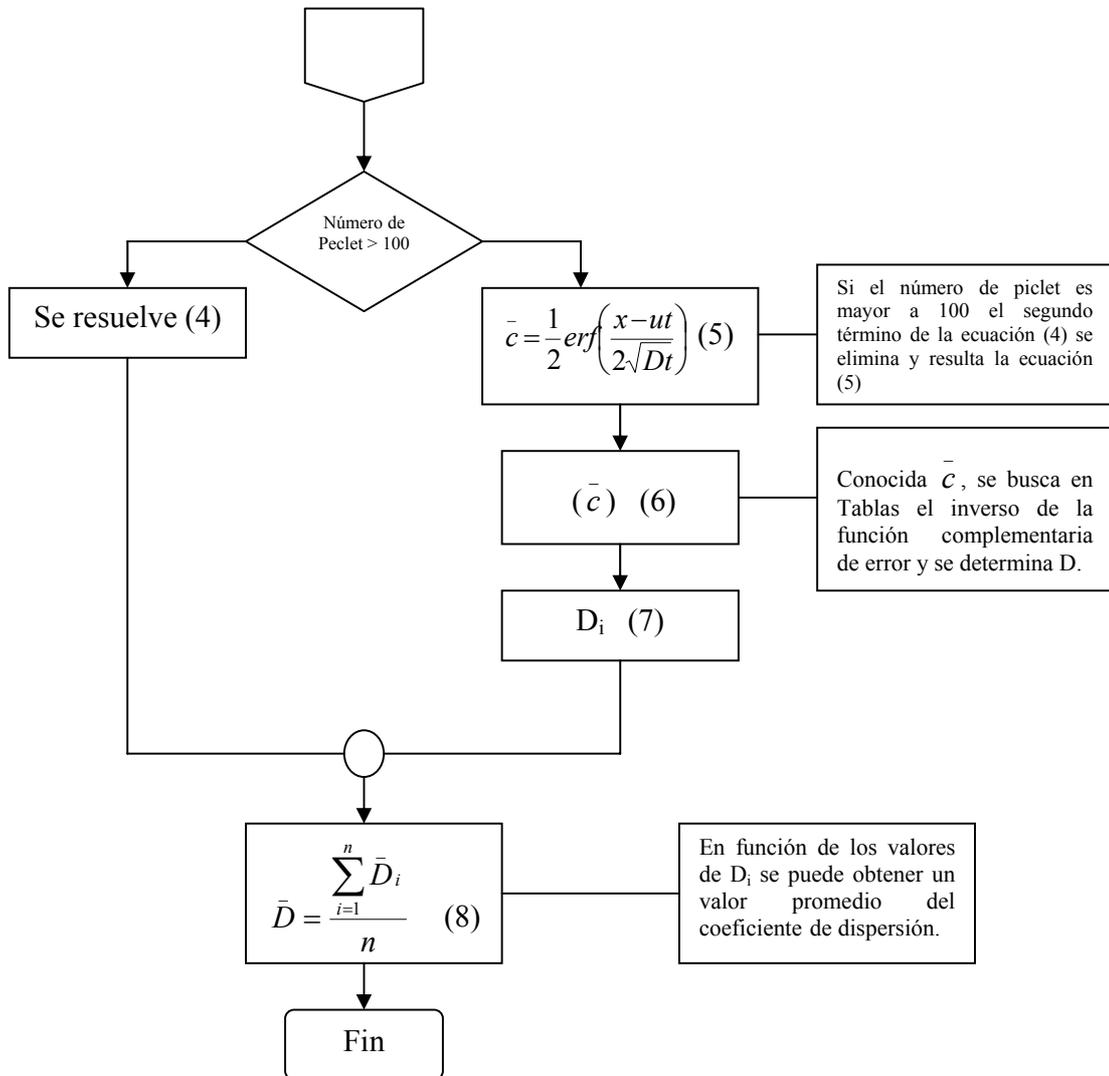


### 3.5. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS EN EL ESTUDIO

A continuación se presenta en forma de diagrama de flujo la aplicación de las ecuaciones de estudio a los datos obtenidos experimentalmente.

#### 3.5.1. Determinación del Coeficiente de Dispersión Longitudinal en una columna de suelo – Método de Ogata (1958).





**Diagrama 3.1. Método propuesto por Ogata para la obtención del coeficiente de Dispersión Longitudinal**  
Fuente: Elaboración propia



La ecuación 6 del diagrama anterior, se obtiene de la siguiente manera:

Primero, conocido el valor de la concentración relativa, se conoce el valor de la función de error complementaria.

Luego, se iguala el argumento de la función de error complementaria a  $\beta$ , quedando la ecuación de la siguiente manera:

$$\beta = \frac{x - ut}{2\sqrt{Dt}} \quad (12)$$

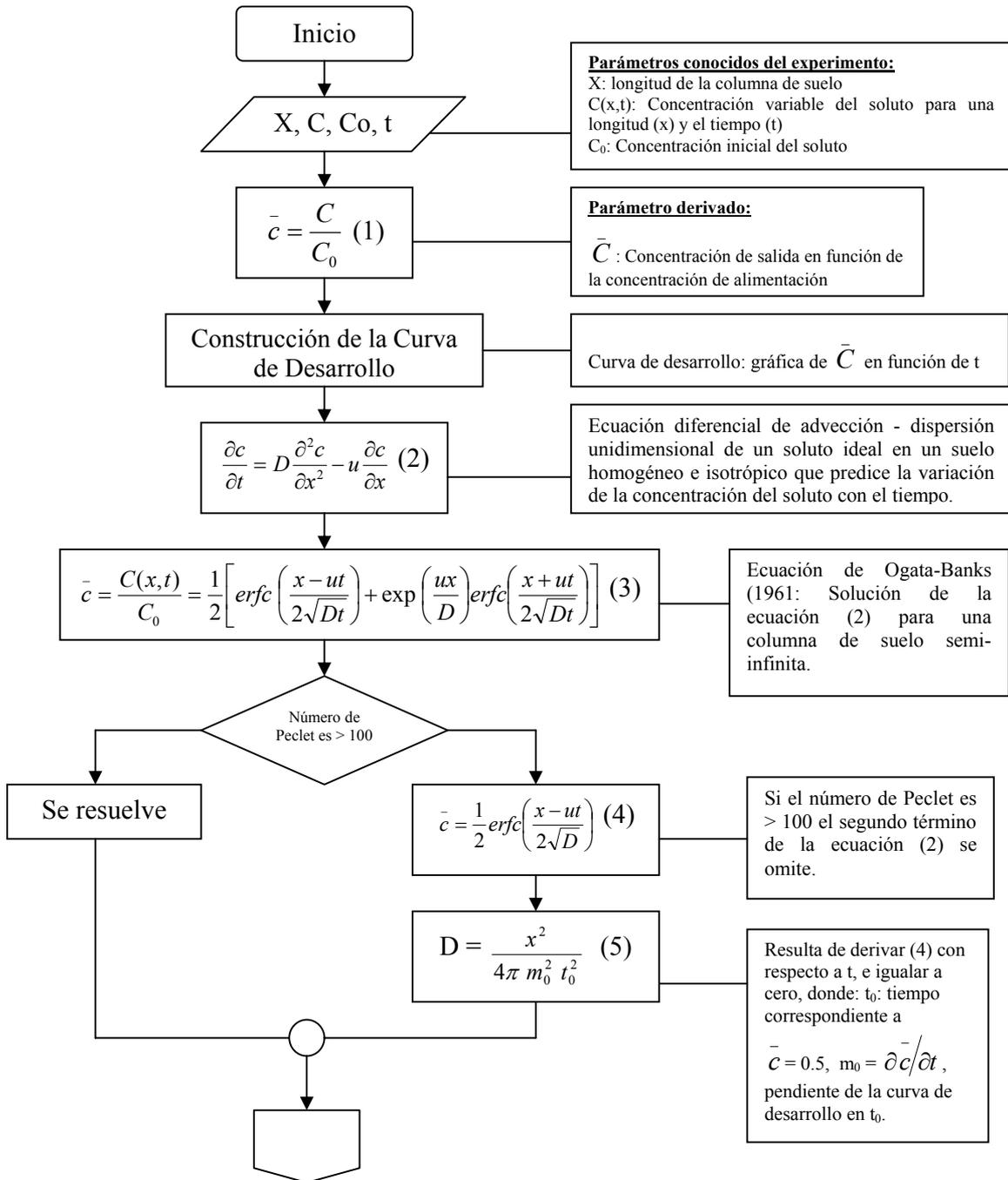
Segundo, usando las igualdades para la función de error y su complementaria y entrando en los valores tabulados para estas funciones se obtiene el valor de  $\beta$ .

Conocido el valor de  $\beta$  se puede obtener el valor de la dispersión de la siguiente manera:

$$D = \left( \frac{x - ut}{2\beta} \right)^2 / t \quad (13)$$



3.5.2. Determinación del coeficiente de dispersión longitudinal en una columna de suelo – Método de Singh.



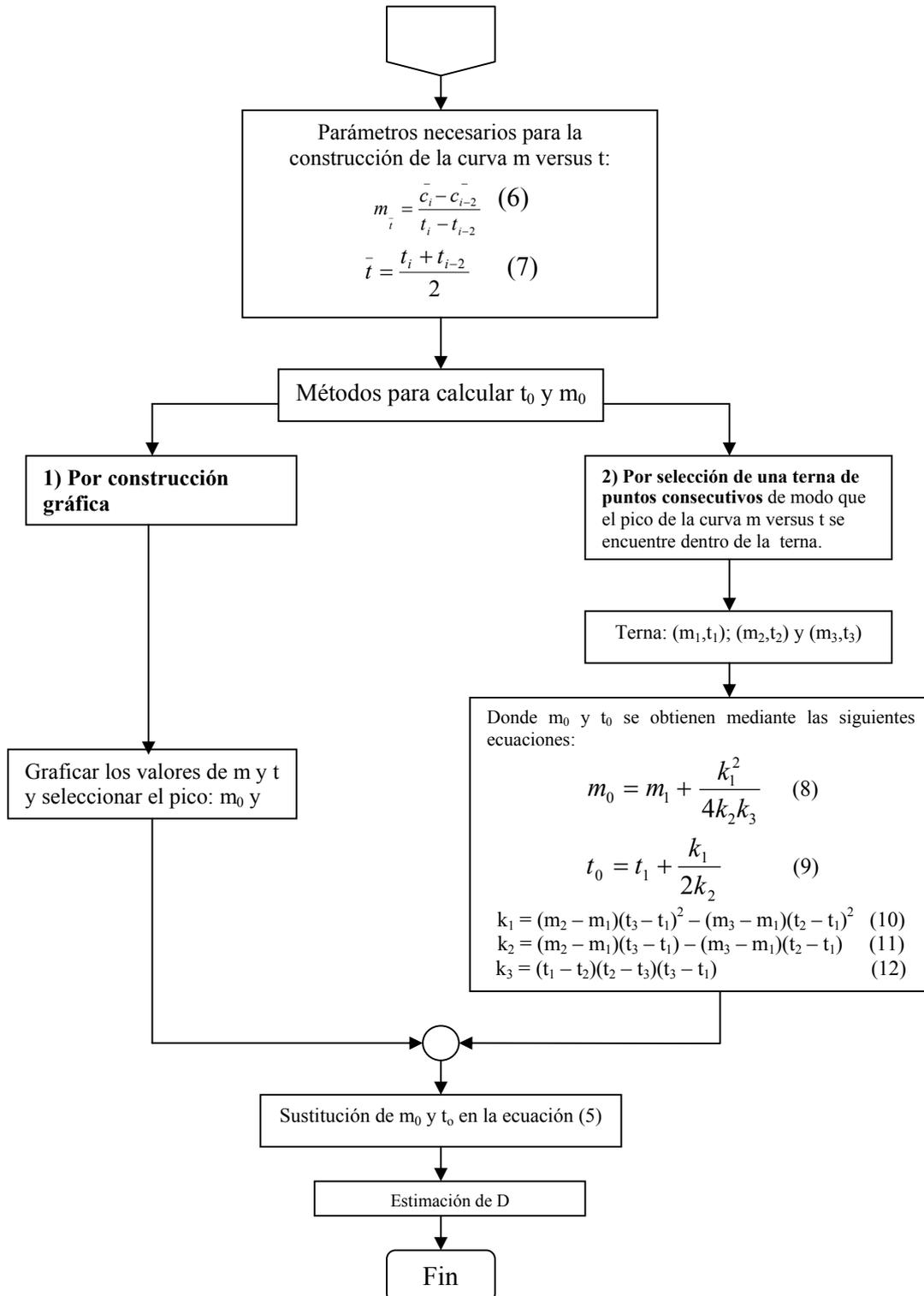


Diagrama 3.2. Método propuesto por Sushil Singh para la obtención del coeficiente de Dispersión Longitudinal. Fuente: Elaboración propia



### 3.6. ESTIMACIÓN TEÓRICA DEL COEFICIENTE DE DISPERSIÓN LONGITUDINAL

En el estudio científico realizado por Uri Shamir y Donald Harleman, realizan la curva teórica y experimental de las variaciones de las concentraciones a lo largo de una columna de suelo estratificado.

Para construir la curva teórica calcularon un valor teórico de la dispersión longitudinal, dicho valor se obtiene a partir de una ecuación que relaciona el número de Reynolds. A continuación se presenta la ecuación:

$$\frac{D_L}{\nu} = 0.9 [Rd_{50}]^{1.2} = 0.9 \left[ \frac{\nu d_{50}}{\nu} \right]^{1.2} \quad (14)$$

Donde la  $\nu$  es la velocidad de poros,  $d_{50}$  es el promedio del tamaño de los granos de arena presentes en la columna de suelo y  $\nu$  es la viscosidad cinemática.

Por otra parte, en el artículo publicado por Nobuyuki Tamai de la Universidad de Tokio, titulado **The dispersion of matter in the flow through an idealized porous medium** (La dispersión de materia en el flujo a través de medios porosos idealizados), se encuentra una tabla en la cual se presenta la variación de la dispersión longitudinal y la transversal con respecto al número de Reynolds.

A continuación se presenta la tabla:

	Re	D (mm)	$D_L/\nu$	$D_T/\nu$	$D_T D_L/\nu^2$
Harleman	0.06 - 3	0.96	$0.66Re^{1.2}$	$0.036Re^{0.7}$	$0.024Re^{1.9}$
Kikkawa	0.4 - 1.3	2.2	$1.01Re^{1.3}$		
Analytical estimation	$\langle 1.5$		$5.1Re$	$0.0013 Re$	$0.0066Re^2$

**Tabla 3.2.** Variación de la dispersión con el número de Reynolds  
Fuente: Tamai, Nobuyuki (1970)



En el presente Trabajo Especial de Grado se estimará el coeficiente de dispersión longitudinal teórico haciendo uso de la ecuación que se encuentra en la tabla presentada anteriormente, ya que la misma clasifica la ecuación a usar según el valor del número de Reynolds.

La ecuación a usar la podemos expresar de la siguiente manera:

$$\frac{D_L}{\nu} = 5.1 [Rd_{50}]^{1.2} = 5.1 \left[ \frac{\nu d_{50}}{\nu} \right]^{1.2} \quad (15)$$

Luego se realizará una interpretación entre los valores obtenidos experimentalmente con los valores obtenidos teóricamente.



## CAPÍTULO II

### 2.1. ANTECEDENTES

La presente investigación, se apoyó en estudios ya realizados en materia de transporte de contaminantes en medios porosos.

Uno de los primeros estudios encontrados sobre el transporte de contaminantes en medios porosos es el de **Uri Shamir y Donald Harleman** titulado **Dispersion in Layered Porous Media (Dispersión en Medio Poroso Estratificado)** (1967), en el cual se hace un análisis sobre la dispersión de fluidos que circulan a través de medios porosos de suelo estratificado, además se desarrollan ecuaciones que nos permiten conocer el valor de la concentración a lo largo de la columna de suelo, dicho valor se utiliza para indicar el cambio en la calidad del fluido a medida que esta atraviesa toda la sección del suelo.

Para el desarrollo de las ecuaciones se tuvo que dividir el estudio en dos casos: un caso en el que sólo se considera la dispersión longitudinal y otro caso en el que solo se considera la dispersión lateral.

Por otra parte, como en este artículo se trabajó con suelos estratificados, implica que cada estrato tiene una ecuación que nos permite conocer la concentración del fluido que atraviesa el estrato.

Estas ecuaciones se obtuvieron a partir de la ecuación de advección – dispersión, a dicha ecuación se le establecen ciertas condiciones de contorno y realizando los cambios necesarios se obtiene la ecuación que nos permite conocer la concentración para el primer estrato. Para los demás estratos de suelo que se pudiesen presentar se



generalizó una ecuación que se obtiene estableciendo otras condiciones de contorno y transformaciones necesarias a la primera ecuación.

Es importante destacar el hecho de que, para los dos casos de estudio se construyó un equipo experimental que permitió chequear la validez de las ecuaciones establecidas, luego se obtuvieron dos curvas de desarrollo (concentración vs. tiempo), una para los resultados teóricos y otra para los experimentales.

Para la obtención de las curvas de desarrollo se realizaron dos series de corridas y en ambas series las curvas dan muy cercanas.

Como en el presente trabajo especial de grado trata sobre la construcción de una columna de suelo para la obtención del coeficiente de dispersión longitudinal, es importante describir el equipo experimental usado en este artículo científico para el caso de la dispersión longitudinal, el cual se detalla a continuación:

El equipo experimental usado consta de una columna circular de lucita con un diámetro interno de  $8^{1/4}$  pulgadas y una longitud de 36 pulgadas. El flujo proviene de dos tanques de alimentación superiores conectados con una válvula reguladora. Una válvula de cierre rápido esta colocada en la tubería de salida. Consta de 6 tomas de piezómetros de 6 pulgadas cada uno en la pared del cilindro y se conectaron a través de dos manifolds a un manómetro. Además se colocaron 3 sondas para la conductividad, las cuales se insertaron dentro del medio, y se conectaron al receptor Sanborn para medir las concentraciones.

Los medios porosos utilizados fueron fracciones granulares diferentes de arena de Sílice. Los tamaños de los granos de arena fueron normalmente distribuidos.



Para la ejecución de la prueba la columna se llenó lentamente con agua desaireada desde abajo para permitir que todo el aire en los vacíos escape, luego antes de cada corrida el medio fue rociado con agua desaireada fresca, mientras esto ocurría fueron conectadas las sondas al Sanborn Recorder y este fue balanceado. Una vez balanceado el equipo la columna fue llenada con una solución salada, se lleno desde la cabeza del tanque. La solución salada fue de 0.2% de NaCl (por peso).

El detalle del equipo experimental usado se encuentra en el Anexo 2.

Otro estudio realizado sobre el transporte de contaminantes en medios porosos es el de **Luis Guarracino, Lucila Candela y Juan E. Santos** titulado **Modelado y Análisis del Transporte del herbicida Glifosato en una parcela experimental del Maresme (Barcelona, España)** (1999), en el cual se presenta un modelado numérico para analizar e interpretar ensayos realizados a una parcela experimental ubicada sobre el acuífero del Maresme (Barcelona, España). Los experimentos fueron diseñados para caracterizar la migración del herbicida glifosato en la zona no saturada y determinar el riesgo de contaminación en el acuífero.

El acuífero de Maresme es una franja costera que se extiende al norte de la ciudad de Barcelona, limitada hacia el interior por la Cordillera Costero Catalana. Prácticamente toda el área de recarga del acuífero esta ocupada por actividades agrícolas de regadío detectándose una elevada contaminación por nitratos.

Durante los años 1994 y 1995 se realizaron ensayos en dos parcelas experimentales no cultivadas para estudiar la migración del herbicida glifosato en la zona no saturada (ZNS). En este trabajo se analizaron los datos obtenidas en una de estas parcelas en la que se realizó un ensayo de 100 días de duración que consistió en la aplicación simultánea de glifosato y de un trazador conservativo.



Desde el punto de vista matemático el problema consistió en la resolución de un sistema de ecuaciones diferenciales acopladas que describen el movimiento del agua y del contaminante en un medio poroso de saturación variable. Se asumió que el movimiento del agua en la zona no saturada (ZNS) obedece a la ecuación de Richards (Richards 1931) y que la concentración del soluto (contaminante) está gobernada por la ecuación de advección – dispersión.

Respecto a la parcela no cultivada, esta es de 168 m<sup>2</sup> de superficie, la misma fue instrumentada en los terrenos de un centro de investigación agraria de Cabrils (Barcelona). La litología de la zona es básicamente arenosa y homogénea con escasa fracción de materia orgánica y arcillas, encontrándose el nivel freático a 5.5 m de profundidad.

El experimento de campo consistió en la aplicación simultánea del herbicida glifosato y de un trazador conservativo (Br) sobre la superficie de la parcela. Una vez realizada la aplicación se procedió a un monitoreo de la migración de ambas sustancias mediante un muestreo periódico.

Para el ensayo del trazador conservativo se utilizó una disolución de NaBr preparada con 6000 gr del producto comercial disueltos en 300 litros de agua. Dicha solución equivale a una concentración de Br de 15940 mgr/L. En cuanto a la estimación del volumen óptimo de aplicación de glifosato se basó en las recomendaciones del fabricante en cuanto a dosis y volumen a utilizar, resultando una concentración de 7200 mgr/L. En ambos casos la aplicación se realizó mediante pulverización standard sobre la superficie de la parcela.

La presión del agua en la zona no saturada se midió in situ mediante tensiómetros instalados a 30, 60, 90 y 120 cm de profundidad. El contenido de humedad y las



concentraciones en suelo se analizaron mediante ensayos destructivos a distintas profundidades.

Previo a la realización del experimento se determinaron las concentraciones de Br y glifosato presentes en el suelo con el fin de establecer el estado inicial de contaminación.

En la simulación del trazador no reactivo (Br) su objetivo principal fue caracterizar el flujo de agua en la zona no saturada (ZNS). Cuando se considera una sustancia químicamente no reactiva como el Br, la ecuación de advección – dispersión se simplifica. Al no producirse degradación de la sustancia contaminante ni procesos de adsorción.

Para resolver la ecuación de transporte se especificó el valor del flujo de la disolución ingresada al subsuelo desde la superficie, en tanto que en el extremo inferior del dominio se supuso que no se produce entrada ni salida de Br. Las concentraciones medidas antes de iniciar el ensayo no superaron los 0.2 microgr/gr por lo que se asumió un estado de contaminación inicial nulo.

Una vez terminado el experimento se procedió a graficar los perfiles de concentración de Br. En estas gráficas también se ilustran los valores de concentración observados a una misma profundidad en dos zonas distintas de la misma parcela.

En este ensayo se destaca la importancia de que la dispersión en los datos puede tener distinto origen: presencia de inhomogeneidades en el terreno, distribución no uniforme de las precipitaciones o la pulverización del Br sobre la superficie de la parcela.



Por otra parte, en la simulación con el glifosato, las condiciones iniciales y de borde para simular el transporte de glifosato son idénticas a las del caso de la simulación con Br.

Una vez terminada la simulación con el glifosato se procedió a graficar los perfiles de concentración correspondientes a los días en que se realizaron los muestreos, en ellos se observó que el herbicida es fuertemente adsorbido en los primeros 10 cm de suelo y que más allá de esta profundidad la concentración es prácticamente nula.

En este trabajo se concluye que la simulación numérica resulta una herramienta válida para el estudio de transporte de sustancias contaminantes en la zona no saturada (ZNS). En este sentido, el modelado ha permitido interpretar los resultados experimentales y establecer algunas hipótesis sobre la dinámica del herbicida analizado.

En cuanto a la migración del glifosato se concluyó que este resulta fuertemente adsorbido en los primeros centímetros del suelo y que la contaminación del acuífero solo podría tener lugar por efectos macro dispersión (direcciones preferenciales de flujo, macro porosidad).



## **2.2. BASES TEORICAS**

### **2.2.1. Fundamentos de hidrogeología**

Si realizamos un perfil del suelo desde el punto de vista del agua, lo podemos dividir en dos zonas: la primera es la zona aireada que son los estratos superiores donde el agua no ocupa todos los espacios vacíos que existen entre los diferentes materiales que forman el suelo y otra zona denominada zona saturada, donde el agua llena totalmente esos espacios, a esta última agua se le llama aguas subterráneas.

La capa intermedia que separa la zona de aireación de la zona de saturación se denomina orla capilar.

Las aguas que se encuentran en la zona aireada constituyen la humedad del suelo y conforma una fuente importante para el crecimiento de las plantas.

Las aguas subterráneas no son todas utilizables, sólo son utilizables aquellas que se encuentran en las formaciones llamadas acuíferos, se entiende por acuífero aquella formación geológica que esta saturada y que tiene la capacidad de movilizar el agua con relativa rapidez. En esta zona el agua se mueve por gravedad, de acuerdo con el gradiente hidráulico.

Existen otras zonas saturadas donde no hay suficiente interconexión entre los estratos vacíos existentes (poros), además, estas formaciones no retienen ni movilizan agua, y constituyen los bordes inferiores de los acuíferos, esta zona son denominadas acuícluda.

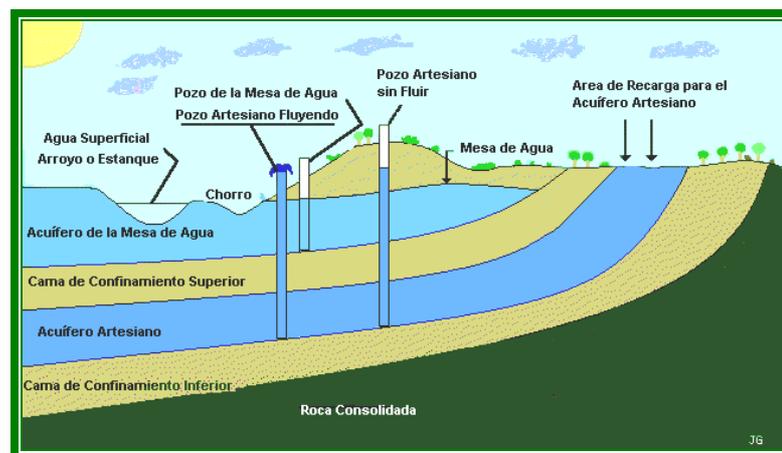


### 2.2.2. Clases de acuíferos

La siguiente clasificación ha sido tomada de “Proyectos de Ingeniería Hidráulica, de Juan José Bolinaga”.

- No confinados: son aquellos en los cuales existe mesa de agua, es decir, su nivel superior de agua está a presión atmosférica.
- Confinados o artesianos: Son acuíferos limitados en todas sus partes por estratos casi o totalmente impermeables. Existen acuíferos confinados cuyo límite superior es un acuicierre que produce cierta cantidad de agua de alimentación; este tipo de acuífero se denominan artesianos.
- Intercalados o aislados: Son acuíferos no confinados, que se encuentran intercalados en la zona de aireación.

A continuación se muestra la figura 2.1. Un detalle de los diferentes tipos de acuíferos que pueden estar presentes en el suelo. Se nombra al acuífero no confinado como acuífero de la mesa de agua. Los acuíferos intercalados o aislados no aparecen en la figura.



**Figura 2.1.** Tipos de acuíferos  
Fuente: Environmental Protection Agency (1996)



Es importante hacer notar que los acuíferos no confinados son más vulnerables que los otros a la contaminación debido a las actividades que se desarrollan sobre la superficie.

Por otro parte, los acuíferos confinados pueden ser contaminados a través de vías artificiales, tales como la construcción de un pozo.

### **2.2.3. Ley de Darcy**

Henri Darcy en 1856, describió en forma cuantitativa el flujo del agua subterránea a través de un medio poroso como la arena, al encontrar que el caudal del flujo era igual al producto del área de la sección transversal del sistema de flujo, el gradiente hidráulico y una constante de proporcionalidad, la conductividad hidráulica, la cual es una característica del medio poroso en consideración.

Esta relación empírica se conoce como la Ley de Darcy, cuya expresión matemática para el caso de flujo unidimensional es como sigue:

$$Q = K.A.(\Delta h / \Delta L) \quad (1)$$

### **2.2.4. Cargas del Agua**

En el estudio de flujo de fluidos la energía tanto potencial como cinética se expresa en términos de alturas o cargas. Deben considerarse las 3 cargas siguientes:

1. Carga de presión,  $h_p$  = la presión dividida por el peso específico del fluido
2. Carga de altura piezométrica,  $h_e$  = distancia a un plano de comparación
3. Carga Total,  $h = h_p + h_e$  = suma de la carga de altura y la de presión



Los ingenieros que estudian el flujo de agua en tubos y canales definen la carga total como la suma de la carga de velocidad (la cual no se considera en el estudio de flujo de fluidos en suelos por ser demasiado pequeña), la carga de presión y la carga geométrica y definen la carga piezométrica como la carga de presión más la carga geométrica. Para la filtración a través de un suelo, donde es despreciable la carga de velocidad, la carga total y la piezométrica son iguales.

Tanto la carga de presión como la de altura contribuyen al movimiento del fluido a través del terreno, el flujo viene determinado por la carga total, y el gradiente utilizado en la Ley de Darcy se calcula por la diferencia de la carga total.

Según LAMBE William y WHITMAN Robert (1994), si se coloca en un cubo de agua en estado estático y se identifica dos puntos para medir las cargas existentes entre los dos puntos, se muestra claramente que existe un gradiente de presiones y un gradiente de altura; sin embargo no existe gradiente de carga total. Lo mismo ocurre si se realiza el mismo experimento sobre un tubo capilar. En base a esto aparecen dos principios importantes:

1. El flujo entre dos puntos cualesquiera depende sólo de la diferencia de carga total.
2. Puede elegirse un plano de referencia cualquiera para medir las cargas de altura.

### **2.2.5. Gradiente Hidráulico**

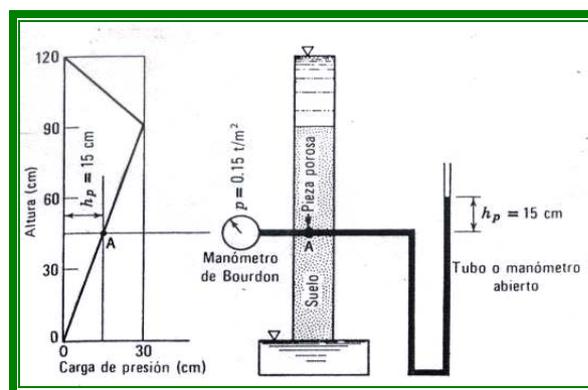
El concepto de gradiente hidráulico está muy relacionado con la definición de carga hidráulica. La carga hidráulica es una expresión de energía contenida por el agua subterránea en un acuífero, esta refleja la elevación a la cual se encuentra el tope de la columna de agua del acuífero en relación con algún nivel de referencia.



Para determinar la carga hidráulica se mide la elevación del agua subterránea mediante un piezómetro, el cual viene a ser un tubo de diámetro pequeño que se extiende desde algún punto del acuífero hasta la superficie del terreno.

Para medir esta carga a nivel de laboratorio se pueden usar dos sencillos piezómetros: un tubo o bureta conectada a una pieza porosa o un manómetro Bourdon. Aunque estos piezómetros son de fundamento muy sencillo, ambos tienen un gran inconveniente para que funcionen: ambos necesitan la penetración del agua del suelo en el sistema de medida.

Este inconveniente puede apreciarse usando la figura 2.2., si se considera lo que sucedería si la altura del depósito aumentara 30 cm. Esto produciría un aumento de la carga de presión en el punto medio de 15 cm, lo que significa que debería fluir al interior del tubo manométrico un volumen de agua igual a 15 cm por el área interior de dicho tubo. Aunque se requiere de un volumen considerablemente menor para actuar sobre el manómetro de Bourdon, se trata también de un volumen apreciable. Si el suelo estudiado fuera muy permeable, el tiempo necesario para el restablecimiento de un estado de flujo en equilibrio sería menor. Sin embargo, si el suelo fuera un limo o una arcilla, se requeriría un tiempo apreciable para que el agua penetrara en manómetro o en el tubo.



**Figura 2.2.** Piezómetro de corriente  
Fuente: LAMBE, William y WHITMAN, Robert (1994)



La medida de la presión intersticial, especialmente de valores inferiores a la presión atmosférica, requiere precauciones especiales en suelos parcialmente saturados. Se deduce de los sistemas de medida descritos que debe expulsarse el aire de dichos aparatos. La forma más fácil de evitar dificultades del aire ocluido es utilizar un elemento sensible que impida la entrada de aire, por ejemplo este elemento sencillo puede ser una piedra porosa fina, ya que si inicialmente se satura de agua, la capilaridad impedirá la entrada de aire a la piedra hasta que la presión del aire supere la presión capilar o presión de paso de la piedra.

La carga hidráulica es la suma de la energía suplida por la gravedad, la presión del material superior y la velocidad del flujo. Su magnitud se expresa en unidades de longitud (L). En acuíferos confinados, el tirante hidráulico es algo mayor que la altura tope del acuífero.

En un acuífero no confinado la carga hidráulica total es la elevación del nivel freático bajo la presión atmosférica y, la carga hidráulica total en un acuífero confinado es la elevación más la carga de presión ocasionada por la compresión del acuífero.

El gradiente hidráulico es una medida del potencial de energía que hace que el agua subterránea fluya entre los puntos de un acuífero. El gradiente hidráulico efectivo en un acuífero ocurre en la dirección de la máxima diferencia de carga.

Los gradientes existen en la dirección horizontal o vertical. El potencial se expresa como la diferencia en carga hidráulica ( $\Delta h$ ) dividida por la distancia horizontal entre los puntos de medición ( $\Delta L$ ). El gradiente total es la suma de los componentes x, y, z expresados como diferencias parciales de acuerdo a la siguiente expresión:

$$i_T = (dh/dx) + (dh/dy) + (dh/dz) \quad (2)$$



El agua subterránea fluye en la dirección del gradiente hidráulico efectivo y los contaminantes en el agua subterránea se mueven principalmente a lo largo de la misma dirección.

Para el agua subterránea, bajo condiciones de flujo natural, el gradiente hidráulico horizontal raras veces excede un valor de 0,05.

#### **2.2.6. Conductividad hidráulica ó Coeficiente de permeabilidad**

La conductividad hidráulica es una característica inherente al medio poroso que expresa el grado de dificultad con que el agua fluye a través de dicho medio. Se expresa como si fuera una velocidad, ya que posee dimensiones de longitud dividida por el tiempo. Los acuíferos sedimentarios suelen ser anisotrópicos, es decir, que poseen variaciones de la conductividad hidráulica en las direcciones x,y,z .En los acuíferos conformados por arenas eólicas, la conductividad hidráulica difiere en las direcciones x e y.

En los problemas sobre el transporte de contaminantes la conductividad hidráulica se considera constante en las direcciones horizontales y se denota como K.

En la ecuación de Darcy es conocido que el gradiente hidráulico es adimensional, y que la descarga específica  $Q/A$ , tiene las mismas unidades que la velocidad y que K.

En el anexo 3 se encuentran valores tabulados de K en función del tamaño de la arena.



### 2.2.6.1. Factores de los que depende la conductividad hidráulica o coeficiente de permeabilidad

La conductividad hidráulica o coeficiente de permeabilidad de una masa de suelo homogénea, isotrópica depende principalmente de los siguientes factores:

1. La viscosidad del fluido en los poros (normalmente agua). A medida que la temperatura aumenta, la viscosidad del agua disminuye y el coeficiente de permeabilidad aumenta; es decir, la velocidad de flujo aumenta. El coeficiente de permeabilidad se ha normalizado a 20°C, de forma que el coeficiente de permeabilidad a cualquier temperatura T se puede expresar con respecto a  $k_{20}$ , por medio de la siguiente ecuación:

$$k_{20} = k_T \frac{\eta_T}{\eta_{20}} \quad (3)$$

donde  $\eta_T$  y  $\eta_{20}$ , son las viscosidades de los fluidos a temperatura T del ensayo y a 20°C, respectivamente. Es posible utilizar la viscosidad absoluta o la viscosidad cinemática del fluido en la ecuación anterior, como también se pueden utilizar los valores que se encuentran en la tabla del Anexo 9.

2. La relación de vacíos (e) del suelo. Se han hecho varios intentos para correlacionar el coeficiente de permeabilidad del suelo a una relación de vacíos dada con el mismo suelo a diferente relación de vacíos [ $k = f(e)$ ] por expresiones tales como las siguientes:

$$k_2 = k_1 \left( \frac{e_2}{e_1} \right)^2 \quad (4)$$



$$k_2 = k_1 \frac{e_2^3 / (1 + e_2)}{e_1^3 / (1 + e_1)} \quad (5)$$

3. El tamaño y forma de los granos de suelo. Allan Hazen estudió el uso de arenas en filtros para obras hidráulicas, y concluyó que para arenas limpias y gravas el coeficiente de permeabilidad puede expresarse aproximadamente como:

$$k = 100 D_{10}^2 \quad (6)$$

para un rango de  $D$  entre  $0.1 < D_{10} < 3.0$  mm. El  $D_{10}$  que se utiliza es el diámetro correspondiente al 10% más fino en tamaño de la muestra obtenido de la curva de distribución granulométrica y expresado en cm.

4. El grado de saturación. A medida que aumenta el grado de saturación, el coeficiente de permeabilidad aparente también se incrementa. En parte este aumento se debe a la disminución de la tensión superficial. El origen del resto del aumento se desconoce, pues es difícil determinar  $k$  a menos que se considere continuidad del flujo a través del medio. El flujo a través del medio poroso puede obtenerse únicamente considerando la cantidad que entra y sale de la masa de suelos. Como caso extremo, sería posible, en un suelo seco, tener un flujo considerable hacia la muestra sin tener flujo de salida. El cálculo de  $k$  daría  $k=0$  lo cual es evidentemente incorrecto. Las muestras usadas en laboratorio generalmente se saturan para evitar este problema, aunque en recientes investigaciones se ha tenido en cuenta condiciones donde  $S < 100\%$ .



### 2.2.7. Porosidad

La Porosidad es la relación entre el volumen de vacíos y el volumen total de un suelo, se suele multiplicar por 100, dándose así los valores en porcentajes.

Según el libro de Mecánica de Suelos de Juárez Badillo y Rico Rodríguez esta relación puede variar de 0 (en un suelo ideal con sólo fase sólida) a 100 (espacio vacío). Los valores reales suelen oscilar entre 20% y 95%.

Cuanto más gruesos son los elementos de la textura mayores son los vacíos entre ellos, salvo si las partículas más finas se colocan dentro de esos vacíos. No obstante lo más corriente es que los suelos con elementos gruesos presenten poros también gruesos y los suelos limosos y arcillosos, vacíos muy numerosos pero de pequeño tamaño.

Para una correcta aireación del suelo y una buena retención de agua, es conveniente que la porosidad se sitúe entre 40% y el 60%. Valores menores del límite inferior pueden crear asfixia en las raíces, contenidos de agua retenida muy bajos, o ambos a la vez. Un valor superior al límite máximo supone una dificultad para el contacto entre el suelo y las raíces de las plantas.

En el suelo se distinguen de forma tradicional pero empírica y a menudo arbitraria una macroporosidad y una microporosidad. La macroporosidad, o porosidad no capilar, esta formada por vacíos grandes, que están ocupados frecuentemente por aire. Su importancia depende sobre todo de la estructura del suelo, de su grado de figuración y parcialmente de la textura. Es más elevada en suelos arenosos. Por otro lado, la microporosidad depende también de la estructura pero sobre todo de la textura y de la actividad biológica. Es muy grande en los suelos ricos en elementos finos y en los dotados de una microfauna numerosa y activa.



### 2.2.8. Velocidad de filtración

Es conocido que el caudal en un medio poroso es similar al flujo en una tubería. Por continuidad la velocidad que atraviesa la sección transversal en una tubería es:

$$v = Q/A \quad (7)$$

Sin embargo, para un medio poroso,  $v$  se denomina la velocidad de Darcy, pero el volumen de agua que fluye es sólo a través del sistema de poros y no a través de la sección total del medio.

La porosidad efectiva ( $\theta_e$ ) es la fracción del área transversal del medio poroso a través del cual realmente fluye el agua, excluyendo la porción de sección ocupada por el material sólido ( $A'$ ). Por lo que, el producto  $\theta_e A = A'$  representa el volumen a través del cual se lleva a cabo el flujo. Adaptando la ecuación de continuidad al medio poroso, se muestra que la descarga,  $Q/\theta_e$  es igual a la velocidad del agua subterránea  $v_x$ . Sustituyendo  $v_x \theta_e$  por  $Q/A$  en la ecuación de Darcy y resolviendo para la obtener la velocidad, se obtiene la siguiente expresión:

$$V_x = Ki_x/\theta_e \quad (8)$$

Esta ecuación permite calcular la velocidad del agua subterránea,  $v_x$ , a través de un medio de porosidad efectiva,  $\theta_e$ , y conductividad hidráulica  $K$ , en respuesta al gradiente hidráulico  $i_x$ . Esta ecuación caracteriza la velocidad promedio del agua subterránea a través del medio poroso de un acuífero, la cual se conoce también como velocidad de filtración, velocidad lineal media o velocidad advectiva.

Esta ecuación es un modelo unidimensional simple comúnmente empleado para obtener estimaciones aproximadas de la velocidad del agua subterránea y de los tiempos de flujo entre puntos de interés.



### **2.2.9. Mecanismos de transporte y destino de los contaminantes en acuíferos**

Según Pedro Álvarez y Edilberto Guevara en su libro “Biorremediación y Atenuación Natural de Acuíferos Contaminados por Sustancias Químicas Peligrosas”, los mecanismos de transporte y destino de los contaminantes en acuíferos son los siguientes:

#### **2.2.9.1. Advección**

En el transporte de masa por advección, los contaminantes son transportados a través de un medio poroso por acción de la velocidad del fluido.

Desde el punto de vista físico, la advección es la tasa a la cual una partícula de agua se mueve a lo largo de las líneas de flujo de un acuífero. Este movimiento está caracterizado por la velocidad media del flujo subterráneo; dicha velocidad media es la descrita por la ecuación (8).

#### **2.2.9.2 Dispersión Hidrodinámica**

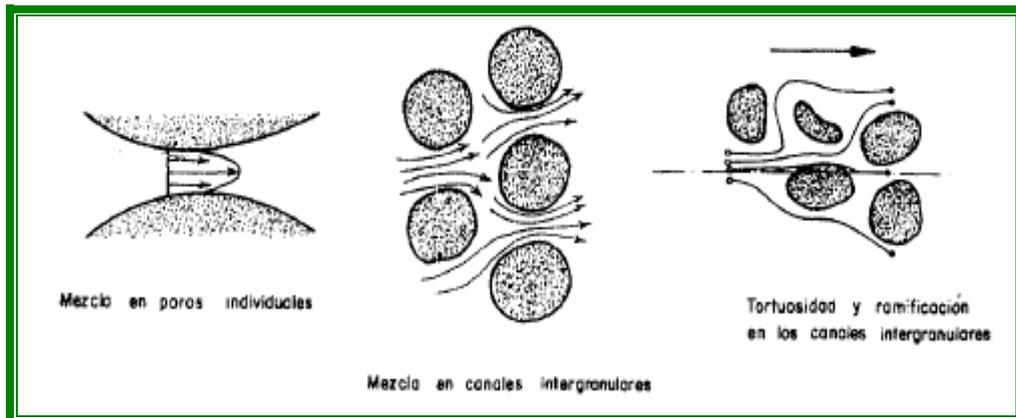
Es el mecanismo por el cual se producen fenómenos de dispersión o extensión de mezcla o dilución del soluto al moverse en el medio poroso. Consta a su vez de dos mecanismos que ocurren simultáneamente:

##### **2.2.9.2.1 Dispersión Mecánica**

Producida como consecuencia de las variaciones microscópicas de la velocidad real de las partículas dentro de cada canal intergranular, y de un canal a otro. Dichas variaciones se producen fundamentalmente de tres formas: la primera, en cada sección de un canal intergranular se establece una variación de las velocidades de las partículas fluidas debido a su rozamiento con las superficies sólidas del medio; la



segunda, debido a que los diferentes canales intergranulares presentan distintos tamaños y rugosidades en sus paredes, se establecen velocidades diferenciales entre ellos y, tercera, debido a la tortuosidad, ramificación e interferencia de los canales intergranulares.



**Figura 2.3.** Procesos de Dispersión Mecánica  
Fuente: Instituto Geológico y Mínero de España (s.f.)

#### 2.2.9.2.2 Difusión (molecular o iónica)

La difusión es un proceso que ocurre a escala molecular y que ocasiona esparcimiento del soluto debido al gradiente de concentración y a la moción aleatoria de moléculas.

El agua contaminada no necesariamente debe fluir, la difusión se da siempre que exista un gradiente de concentración del contaminante.

La Dispersión Total,  $D$ , incorpora la dispersión mecánica y la difusión.

#### 2.2.9.3. Dilución

El agua no contaminada se infiltra desde la superficie, se desplaza hacia abajo y se mezcla con el agua subterránea contaminada en un acuífero. Las concentraciones resultantes después de la mezcla son diluidas.



El efecto de dilución sobre una pluma contaminante puede ser estimado para un modelo unidimensional si se conoce la recarga del acuífero.

#### **2.2.9.4. Adsorción**

La adsorción ocurre a medida que las moléculas de contaminante entran en contacto con cierto tipo de partículas en el acuífero. Debido a la adsorción las concentraciones de contaminantes que llegan a puntos de interés pueden ser más bajas que las esperadas en tiempos determinados y, en consecuencia, se dice que el contaminante ha sido retardado en su transporte en algún grado.

Las moléculas orgánicas son adsorbidas principalmente por partículas de carbono orgánico en un acuífero. El proceso de adsorción puede depender de la temperatura y del pH en el sistema acuífero-agua subterránea.

Los parámetros de adsorción para los contaminantes de interés se determinan mediante pruebas de laboratorio. Para sustancias iónicas inorgánicas, la prueba determina la capacidad de intercambio de cationes de una muestra de material del acuífero. Para sustancias orgánicas la prueba determina la relación entre concentración acuosa y concentración adsorbida a una temperatura particular. La relación de equilibrio entre la concentración del contaminante en el suelo y la fase acuosa se conoce como la isoterma de adsorción.

Los isotermas de Freundlich y Langmuir son otros dos modelos de adsorción no lineales de uso menos frecuente para sistemas de acuíferos. El isoterma de Freundlich es empírico y generalmente es más flexible para describir el equilibrio de sustancias hidrofóbicas entre el agua subterránea y los suelos. El isoterma de Lagmuir, por otro lado, se basa en principios cinéticos y describe la saturación de la superficie del adsorbente por una monocapa del contaminante.



#### **2.2.9.5. Retardo**

El retardo es una disminución de la velocidad de migración del contaminante ocasionada por la adsorción.

El retarde relacionado con la adsorción se cuantifica mediante el denominado factor de retardo ( $R_f$ ), el cual se define como la relación entre la velocidad del agua subterránea ( $v$ ) y la velocidad de migración del contaminante ( $v_c$ )

La tendencia de un contaminante a ser retardado por la adsorción depende de varios factores y se incrementa con el contenido de materia orgánica del suelo y la hidrofobicidad de la sustancia. El factor de retardo puede ser estimado mediante expresiones basadas en algunas propiedades del contaminante y del material del acuífero.

#### **2.2.9.6. Velocidad de migración del contaminante**

La velocidad de migración del contaminante ( $V_c$ ) puede estimarse incorporando el concepto de retardo en la ley de Darcy.

Sin embargo, en varios modelos analíticos sobre el transporte de contaminantes en medios porosos se asume que la velocidad con la que viaja el contaminante puede ser descrita por la Ley de Darcy.

#### **2.2.9.7. Proceso de degradación**

A continuación se presentan los procesos de degradación más comunes:

- **Conversión bacterial:** Es uno de los más importantes en la transformación de contaminantes encontrados en aguas superficiales y subterráneas.



- Agotamiento natural: Existen varias razones que pueden ocasionar el agotamiento o decaimiento natural en contaminantes. A menudo se asume que el agotamiento de los contaminantes sigue la cinética de primer orden.
- Reacciones de hidrólisis: Las reacciones de hidrólisis son aquellas que consisten en la degradación de un contaminante cuando éste reacciona con el agua.
- Reacciones de Oxido – Reducción: En un sistema de óxido-reducción , una de las sustancias se oxida y la otra se reduce, por donación o aceptación de electrones. En un sistema natural estas reacciones pueden servir para medir otras reacciones con contaminantes que pudieran estar presentes.

#### 2.2.10. Transporte de masa

Según Potter y Wighert (1998) siempre que exista una diferencia de concentración de dos o más sustancias en una mezcla de fluidos ocurre un transporte de masa o difusión de masa. Una complicación cuando se analiza la difusión es que tenemos que tratar con mezclas de fluidos. Hay varias formas de definir la concentración en una mezcla; la más común se relaciona con el número de moles de la sustancia  $i$  por unidad de volumen. La masa de 1 mol de una sustancia es el peso molecular de esa sustancia. Por ejemplo, 180g de una sustancia cuyo peso molecular es de 18 contienen 10 mol. La concentración molar se define como

$$C_i = \frac{n_i}{V} \quad (9)$$

Otra forma de expresar la concentración se define en términos de la masa de la sustancia  $i$  por volumen de la solución. Esto se conoce como concentración en masa ( $\text{Kg/m}^3$ ).



Si consideramos un canal infinitamente largo e inyectamos un colorante, podríamos expresar la masa del colorante que cruza un área unitaria por unidad de tiempo en la dirección  $x$  es proporcional al gradiente de concentración del colorante en esa dirección.

$$J = -D \frac{dC}{dx} \quad (10)$$

Esta ecuación es conocida como la primera ley de difusión de Fick. Donde  $D$  es el coeficiente de difusión de masa con dimensiones  $L^2/T$ ,  $C$  es la concentración molar del colorante que se difunde, y el signo menos indica que el transporte es de la concentración alta a baja.

Esta forma de la ley de Fick es aceptable si la concentración sólo varía en la dirección  $x$  y si la mezcla de fluidos es diluida, es decir, si la concentración de colorante es baja en el fluido anfitrión.

### **2.2.11. Ecuación fundamental de transporte diferencial de masa en una dimensión**

Según Potter y Wighgert (1998) para la obtención de la ecuación fundamental de transporte diferencial de masa en una dimensión primero se debe considerar primero el Teorema de Transporte de Reynolds, que expresa la rapidez de cambio de una propiedad extensiva en términos de cantidades que se refieren a un volumen de control. Si este teorema se aplica a la conservación de la masa de una sustancia que se mueve con un fluido, como por ejemplo una mezcla fluida que contiene una sustancia como un contaminante químico o un gas disuelto. Sea la propiedad extensiva de la sustancia su masa, y definamos  $C$  como la concentración de la sustancia, expresada como masa por unidad de volumen de la mezcla. Además, sea  $J$  el vector de flujo másico de la sustancia a través de la superficie de control, y  $r$ , la



razón de generación de la sustancia dentro del volumen de control a causa de una reacción química, por ejemplo, entonces obtenemos la siguiente ecuación:

$$\int_{v.c.} r dV = \int_{v.c.} \frac{\partial}{\partial t} C dV + \int_{s.c.} J \cdot \hat{n} dA \quad (11)$$

Esta ecuación expresa la razón de generación de la sustancia dentro del volumen de control es igual a la rapidez de cambio de la concentración dentro del volumen de control más el flujo másico neto de la sustancia a través de la superficie de control.

Esta ecuación se puede simplificar para situaciones en las que la concentración de la sustancia dentro del volumen de control es uniforme; es decir, se considera que el fluido y la sustancia están bien mezclados. En este caso el flujo de la sustancia a través de la superficie de control se expresa como la concentración multiplicada por la componente normal de la descarga en la superficie. Sin embargo, en muchas situaciones la concentración es afectada por cambios espaciales en el vector de flujo másico, y esto hace necesario utilizar un volumen de control incremental. Si consideramos un modelo unidimensional similar al que encontraríamos en una tubería o una corriente de agua, suponemos que en este modelo solo hay cambios en la concentración de la sustancia en la dirección  $x$ , el volumen de control tiene una longitud  $\Delta x$  y área de sección transversal  $A$  normal a la dirección  $x$  con un flujo  $J$  en el área izquierda. Puesto que el volumen de control tiene una magnitud fija ( $A\Delta x$ ), se obtiene la siguiente ecuación:

$$rA\Delta x = \frac{\partial}{\partial t} A\Delta x + \left( J + \frac{\partial J}{\partial x} \Delta x \right) A - JA \quad (12)$$

Dividiendo entre  $A\Delta x$ , la ecuación anterior se convierte en:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial J}{\partial x} = r \quad (13)$$



Esta ecuación es conocida como la ecuación fundamental de transporte de diferencial de masa en una dimensión.

### 2.2.12. Ecuación de transporte por dispersión

Según Potter y Wighert (1998) este transporte se expresa en términos de la componente del vector de flujo que describe el transporte neto de masa a lo largo del eje  $x$  por unidad de área de sección transversal y por unidad de tiempo. Para conocer como cambia la concentración de masa con el tiempo en un punto específico, se puede realizar un balance de masa de un elemento infinitesimal del fluido para un colorante conservativo,  $r = 0$ , lo cual reduce la ecuación fundamental de transporte diferencial de masa en una dimensión a:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = - \frac{\partial J}{\partial x} \quad (14)$$

Como la concentración del colorante que se difunde depende del tiempo y el espacio, se usa la derivada parcial en vez de la derivada ordinaria en la primera ley de Fick. Si se combina la ecuación de la primera ley de Fick con la ecuación anterior, tenemos:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (15)$$

Esta es la versión unidimensional de la segunda ley de Fick y como ecuación de difusión

### 2.2.13. Ecuación de transporte por advección y dispersión

Según Merle y Potter (1998) la difusión molecular, aunque esta presente en el transporte de fluidos esta dominada por un mecanismo de transporte más rápido impulsado por el movimiento del fluido mismo. Esta clase de transporte se denomina advección.



El transporte advectivo se expresa en términos del vector de flujo a lo largo de un eje dado por unidad de área perpendicular a ese eje. Entonces el flujo advectivo en la dirección  $x$  es:

$$J = uC \quad (16)$$

Donde  $u$  es la velocidad del fluido en la dirección  $x$  y  $C$  es la concentración de la sustancia. El flujo total de transporte de masa, resultado de la advección y la difusión es:

$$J = uC - D \frac{\partial C}{\partial x} \quad (17)$$

Esta ecuación se puede sustituir en la ecuación fundamental de transporte diferencial de masa en una dimensión para obtener:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uC) = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + r \quad (18)$$

Esta es la ecuación unidimensional de transporte de masa, mayormente conocida como ecuación de advección – dispersión unidimensional; incluye tanto advección como dispersión. Donde  $C$  es la concentración,  $t$  es el tiempo,  $u$  la velocidad en medios porosos,  $x$  la distancia,  $D$  el coeficiente de dispersión y  $r$  es un valor que depende del soluto (si es conservativo o no).

#### **2.2.14. Ecuaciones usadas para el análisis de concentraciones de solutos en medios porosos.**

A continuación se presentan dos métodos para el análisis de concentraciones de solutos en medios porosos, ambos parte de la ecuación unidimensional de transporte de masa.



### 2.2.14.1. Uri Shamir y Donald Harleman “Dispersión en Medios Porosos Estratificados”.

En este estudio se considera un flujo unidireccional a través de capas. Se define como concentración a la calidad del agua que fluye cambia a medida que esta atraviesa toda la sección.

Este método considera una función de paso, por ejemplo, la concentración cambia instantáneamente desde cero hasta algún valor  $C_0$  y este valor se mantiene desde el primer momento.

Se desarrollaron ecuaciones que permitieron conocer la concentración del soluto al final de cada estrato de suelo.

Estas ecuaciones parten o se desarrollan a partir de la ecuación de advección – dispersión unidimensional.

Para obtener la ecuación para el primer estrato se establecen a la ecuación de advección – dispersión las siguientes condiciones:

$$\begin{aligned}C(x_1, 0) &= 0 \text{ para } X_1 \geq 0 \\C(0, t) &= C_0 \text{ para } t \geq 0 \\C_1(\infty, t) &= 0 \text{ para } t \geq 0\end{aligned}$$

Estas condiciones fueron establecidas para una columna finita de suelo.

Trabajando con la ecuación de advección – dispersión se obtiene:

$$\frac{C(l_1, t)}{C_0} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[ \frac{l_1 - u_1 t}{2\sqrt{DL_1}} \right] + \frac{1}{2} \exp \left\{ \frac{u_1 l_1}{DL_1} \right\} \operatorname{erfc} \left[ \frac{l_1 + u_1 t}{2\sqrt{DL_1}} \right] \quad (19)$$



Donde  $C$  es la concentración,  $t$  es el tiempo,  $u$  la velocidad de poros,  $x$  la distancia y  $D$  el coeficiente de dispersión y  $erfc(v) = 1 - erf(v)$ , es la función de error complementaria.

La función de error es dada por:

$$erf(v) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^v e^{-z^2} dz \quad (20)$$

A continuación se presentan igualdades para la función de error y su complementaria, las cuales son muy útiles en la manipulación de las ecuaciones del modelo analítico.

- $erf(-\beta) = -erf(\beta)$
- $erfc(\beta) = 1 - erf(\beta)$
- $erfc(-\beta) = 1 + erf(\beta)$

La gráfica de la función de error y algunos valores tabulados se encuentran en el Anexo 6.

Para establecer la ecuación diferencial para la dispersión longitudinal en el segundo estrato se sigue el mismo razonamiento de arriba. Las condiciones límites para el segundo estrato son:

$$\begin{aligned} C(x_2, 0) &= 0 \quad \text{para } X_2 \geq 0 \\ C_2(\infty, t) &= 0 \quad \text{para } t \geq 0 \\ C_2(0, t) &= C_1(l_1, t_1) \quad \text{para } t \geq 0 \end{aligned}$$

Para resolver la ecuación de advección – dispersión sujeta a las condiciones anteriores es necesario usar la transformada de Laplace y las inversas de la transformada de Laplace.



Luego de trabajar con estas transformadas, se llegó a una ecuación que nos indica el valor de la concentración para cada estrato adicional que se pudiese presentar, la ecuación es la siguiente:

$$C(l_I, t) = \frac{C_0}{2} \int_0^t C(l_{I-1}, t) k(l_I, u_I, DL_I, t - \tau) d\tau \quad (21)$$

#### 2.2.14.2. Ogata, A., y Banks, R.B. (1961). “Una solución de la ecuación diferencial de la dispersión longitudinal en medios porosos”.

En este estudio se usan las mismas condiciones iniciales y de contorno del método anterior:

$$C(x, 0) = 0 \text{ para } X \geq 0$$

$$C(0, t) = C_0 \text{ para } t \geq 0$$

$$C(\infty, t) = 0 \text{ para } t \geq 0$$

Para el caso de solutos conservativos ( $r = 0$ ), la solución analítica es dada por:

$$\frac{C(x, t)}{C_0} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[ \frac{x - ut}{2\sqrt{DLt}} \right] + \frac{1}{2} \exp \left\{ \frac{ux}{DL} \right\} \operatorname{erfc} \left[ \frac{x + ux}{2\sqrt{DLt}} \right] \quad (22)$$

En este estudio se presenta una forma simplificada de la ecuación anterior. Se omite el segundo término de la ecuación para valores de  $Ux/D > 100$ . Con lo cual se produce un error máximo del 3%.

El término anterior es conocido como el número de Péclet, el cual es un parámetro dimensional. Describe la influencia relativa de los efectos caracterizados por los problemas de advección – dispersión que envuelve el uso de componentes conservativos y no conservativos. También domina la naturaleza del problema, si el valor es bajo indica que la dispersión domina el problema y si el valor es grande la advección domina el problema.



La ecuación reducida es:

$$C(x, t) = \frac{C_0}{2} \left[ \operatorname{erfc} \left( \frac{x - Ut}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] \quad (23)$$

### **2.2.15. Método de Sushil Sinhg para la estimación del coeficiente de dispersión y porosidad a partir de pruebas con columnas de suelo.**

En este estudio se propone un método simple para la estimación del coeficiente de dispersión, no se requiere conocer los valores de porosidad, la sección transversal de la columna de suelo y del caudal que fluye a través de la columna. Esto evita completamente los posibles errores que envuelven las mediciones de esas cantidades. Hace uso de un pico máximo de las observaciones hechas a la curva de desarrollo (BTC).

Derivando la ecuación reducida de Ogata y Banks (1961) con respecto al tiempo se obtiene:

$$D = \frac{x^2}{4\pi m_0^2 t_0^2} \quad (24)$$

Donde  $t_0$  es el tiempo correspondiente para  $\bar{c} = 0.5$  y  $m_0$  es el valor en la BTC para ese tiempo.

Existen dos métodos para obtener los valores de  $m_0$  y  $t_0$ :

1.- Por construcción gráfica: Se grafican los valores de  $m$  vs  $t$  y se obtiene directamente de la gráfica el valor del pico ( $m_0$ ;  $t_0$ ). Los valores de  $m$  y  $t$  son:



$$m_{\bar{i}} = \frac{\bar{c}_i - \bar{c}_{i-2}}{\bar{t}_i - \bar{t}_{i-2}} \quad (25)$$

$$\bar{t} = \frac{\bar{t}_i + \bar{t}_{i-2}}{2} \quad (26)$$

2.- Por selección de una terna de puntos consecutivos: En este método se busca que el pico se encuentre dentro de la terna,  $m_0$  y  $t_0$  son dados por las ecuaciones:

$$m_0 = m_1 + \frac{k_1^2}{4k_2k_3} \quad (27)$$

$$t_0 = t_1 + \frac{k_1}{2k_2} \quad (28)$$

Donde:

$$k_1 = (m_2 - m_1)(t_3 - t_1)^2 - (m_3 - m_1)(t_2 - t_1)^2 \quad (29)$$

$$k_2 = (m_2 - m_1)(t_3 - t_1) - (m_3 - m_1)(t_2 - t_1) \quad (30)$$

$$k_3 = (t_1 - t_2)(t_2 - t_3)(t_3 - t_1) \quad (31)$$

## 2.2.16. Técnicas empleadas para la determinación de la concentración de contaminantes.

### 2.2.16.1. Espectrofotometría de absorción y emisión atómica

Se requiere el empleo de la espectrofotometría de absorción y emisión atómica para determinar trazas de calcio, potasio, sodio y estroncio en algunas Especificaciones de reactivos. La aptitud de tales determinaciones depende del empleo de aparatos apropiados.

El espectrofotómetro de absorción y emisión atómica más apropiado posee un fototubo sensible al rojo, un fototubo multiplicador, un monocromador, un control para regular el ancho de banda, un interruptor selector y un control de sensibilidad. Se



pueden emplear otros tipos de espectrofotómetros, siempre que el analista haya demostrado que el aparato determinará exactamente la cantidad de impurezas admitidas en el reactivo que se va a ensayar.

En la absorción atómica el aparato consta de una fuente de radiación, un generador de átomos del elemento a analizar (llama, horno, generador de vapor, etc.) que permite introducir el analito en el paso óptico, un monocromador y un detector.

En este caso los átomos en estado excitado generalmente son inestables y vuelven rápidamente al estado basal, perdiendo la energía adquirida en el proceso de absorción, dando lugar así a líneas de emisión a la misma longitud de onda a la cual ocurrió la absorción.

El aparato consta esencialmente de los mismos componentes que el aparato empleado para absorción atómica, excepto que no requiere de una fuente de radiación. La excitación se efectúa empleando llamas de aire – acetileno y óxido nítrico – acetileno.

Para operar el espectrofotómetro deben seguirse las instrucciones del fabricante y realizar el ensayo a la longitud de onda especificada en la monografía correspondiente.

El espectrofotómetro debe calibrarse según se indica a continuación:

Para las medidas de absorción: Introducir agua o la solución blanco especificada en la monografía correspondiente en el generador de vapor atómico y ajustar la lectura de forma que indique el 100% de transmitancia. Introducir la solución estándar más concentrada en el generador y ajustar la sensibilidad para obtener una lectura apropiada.



Para las medidas de emisión: Introducir agua o la solución en blanco especificada en la monografía correspondiente en el generador de vapor atómico y ajustar la lectura del aparato a cero. Introducir la solución estándar más concentrada en el generador y ajustar la sensibilidad para obtener una lectura apropiada.

Luego de calibrar el aparato como se indicó anteriormente, introducir cada solución en el generador no menos de tres veces y registrar la lectura cuando se estabilice. (Si el generador es una llama, lavar con agua o la solución blanco luego de cada introducción). Después se representa gráficamente los promedios de las lecturas obtenidas en función de la cantidad del elemento agregado, trazando la línea recta que mejor se ajuste a los puntos marcados. Extrapolar la recta hasta su intersección con el eje de las abscisas; la distancia entre este punto y el punto de intersección de los ejes representa la concentración del elemento en la solución muestra.

#### **2.2.16.2. Métodos usados para la determinación de concentración de cloruros.**

El ion cloruro ( $\text{Cl}^-$ ), es uno de los aniones inorgánicos principales en el agua natural y residual. Los contenidos de cloruros de las aguas son variables y se deben principalmente a la naturaleza de los terrenos atravesados.

Los cloruros se pueden medir fácilmente por procedimientos volumétricos que emplean indicadores internos. La mayoría de las veces es apropiado el método de Mohr, que emplea el nitrato de plata como titulante y el cromato de potasio como indicador. Sin embargo, el procedimiento que usa como titulante el nitrato mercúrico y como indicador la difenilcarbazona tiene ciertas ventajas inherentes sobre el método de Mohr.

Los “Métodos estándar” también incluyen tres métodos instrumentales de análisis para el cloruro. Uno es el método de titulación potenciométrica en el cual cuando se titula una muestra con una solución de nitrato de plata se observa un cambio de



potencial entre el electrodo de referencia y el electrodo de plata y cloruro de plata. El cloruro presente forma complejos con los iones de plata que se han agregado. Cuando todo el cloruro ha formado complejos, aumenta la concentración del ión plata, hecho que se indica por un súbito aumento del voltaje, y la titulación termina. El segundo procedimiento instrumental es el método automatizado de ferricianuro, que es un procedimiento colorimétrico. En este caso, el ión mercúrico del titulante tiocianato mercúrico forma un complejo soluble con el cloruro. Esto libera el tiocianato que reacciona con el ión férrico, que también se añade, para formar el tiocianato, de color rojo intenso, cuya intensidad es proporcional a la concentración del cloruro. El tercer procedimiento instrumental es la cromatografía iónica, que es útil para la determinación combinada de los principales aniones presentes en la mayoría de las aguas naturales.

A continuación se describirán de forma más amplia los dos procedimientos volumétricos, que se pueden usar fácilmente en el campo o en la mayoría de los laboratorios.

#### **2.2.16.2.1. Método de Mohr**

El método se utiliza para determinar iones cloruro y bromuro de metales alcalinos, magnesio y amonio.

Este método se basa en que en una solución neutra o ligeramente alcalina, el cromato de potasio puede indicar el punto final de la titulación de cloruros con nitratos de plata. El cloruro de plata es precipitado cuantitativamente antes de que el cromato de plata rojo se haya formado.

La valoración se hace con solución patrón de  $\text{AgNO}_3$ . El indicador es el ion cromato  $\text{CrO}_4^{=}$ , que comunica a la solución en el punto inicial una coloración amarilla y forma en el punto final un precipitado rojo ladrillo de cromato de plata,  $\text{Ag}_2\text{CrO}_4$ .



La solución debe tener un pH neutro o cercano a la neutralidad. Un pH de 8.3 es adecuado para la determinación.

La solución patrón de  $\text{AgNO}_3$  se puede preparar por el método directo dado que el nitrato de plata es un reactivo tipo primario; con el objeto de compensar los errores en la precipitación del punto final se prefiere el método indirecto y la solución se valora con  $\text{NaCl}$  químicamente puro. Cuando la solución tipo se prepara por el método indirecto no es necesario el ensayo en blanco, porque el exceso empleado en la valoración de la sustancia problema se compensa con el empleado en la valoración del  $\text{AgNO}_3$ .

#### **2.2.16.2.2. Método de Nitrato de Mercurio**

Este método para la determinación de cloruros está mucho menos sujeto a interferencias que el método de Mohr debido a que la titulación se realiza en una muestra en la que el pH se ajusta a un valor de aproximadamente 2.5. En estas condiciones, el ión  $\text{Hg}^{2+}$  se combina con el  $\text{Cl}^-$  para formar el complejo  $\text{HgCl}_2$ , que es soluble, haciendo, por tanto, más fácil la detección del punto final que con el procedimiento de Mohr. A medida que la concentración de  $\text{Cl}^-$  se aproxima a 0, la concentración del  $\text{Hg}^{2+}$  aumenta a un nivel significativo a medida que se añade nitrato mercuríco.

La difenilcarbazona es el indicador que se usa para mostrar el exceso de iones  $\text{Hg}^{2+}$ . La difenilcarbazona se combina con estos iones y forma un color púrpura bien diferenciado. Como en el método de Mohr, se necesita una corrección blanco, aunque el valor usualmente es menor. Se agrega ácido nítrico al indicador para reducir el pH de la muestra a 2.5, valor que se debe mantener uniforme en muestras desconocidas, estándar y en blancos. También se incluye un indicador de pH, el FF xileno cianol, que es azul verdoso a un pH de 2.5, y que hace más preciso el punto final al enmascarar el color pálido generado por la difenilcarbazona durante la titulación.



Los “Métodos estándar” recomiendan que se use una solución de nitrato mercúrico 0.0141 N como titulante para determinar los cloruros. Cada milimetro de esta solución equivale a 0.5 ml de  $\text{Cl}^-$ , y por tanto, los comentarios hechos anteriormente acerca de los cálculos para soluciones de  $\text{AgNO}_3$  con concentración similar también se aplican a este caso.

#### **2.2.17. Forma que toma el contaminante en el agua subterránea**

Según, ALVAREZ Pedro y GUEVARA Edilberto (2.003) cuando un contaminante se disuelve en el agua subterránea se esparce en forma natural desde el punto de origen y fluye a lo largo del flujo conjuntamente con el agua subterránea. La forma que toma la masa del contaminante en el agua subterránea se denomina pluma de contaminación.

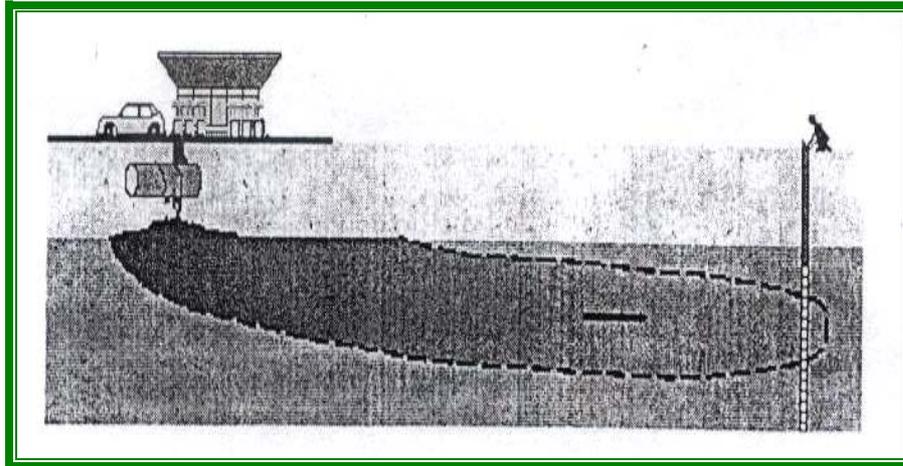
Cuando el sistema es homogéneo e isotrópico, la forma de la pluma vista en planta es generalmente ovoide o elipsoidal. Las heterogeneidades físicas del suelo, como lentes de arcilla y estratificación múltiple de diferentes materiales de acuíferos frecuentemente ocasionan irregularidades en la forma de la pluma.

#### **2.2.18. Efectos de diferentes procesos sobre la atenuación de la migración de contaminantes**

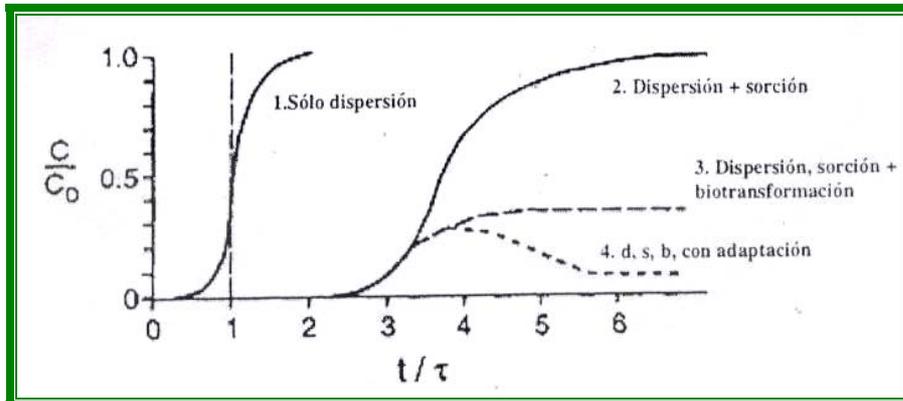
Según, ALVAREZ Pedro y GUEVARA Edilberto (2.003) mediante un ejemplo se ilustra el efecto de diferentes procesos sobre la migración de una pluma de contaminación en el agua subterránea: Un contaminante esta migrando hacia un pozo de abastecimiento de agua, como el que se muestra en la figura 2.3. La concentración en el pozo se grafica como una función del tiempo (figura 2.4.) bajo diferentes escenarios. El eje Y representa la concentración observada en el sitio del receptor,



relativa a una concentración de fuente continua constante ( $C_0$ ). El eje X es el tiempo transcurrido relativo al tiempo medio de viaje del agua subterránea.



**Figura 2.4.** Escenario hipotético de un derrame  
Fuente: ALVAREZ, Pedro y GUEVARA, Edilberto (2.003)



**Figura 2.5.** Representación gráfica de los efectos de dispersión  
Fuente: ALVAREZ, Pedro y GUEVARA, Edilberto (2.003)

Si ocurre migración debido a advección solamente, se observará un comportamiento de flujo tipo pistón y la concentración en el pozo se incrementará repentinamente hasta  $C_0$  después de un período equivalente al tiempo de viaje del agua subterránea.



Si ocurre dispersión hidrodinámica, algunas moléculas viajarán más rápido resultando en una detección más temprana y tomará más tiempo para que la concentración alcance el valor  $C_0$ .

La porción va a retardar la migración, resultando en un período más largo para la detección y en un incremento del esparcimiento. Sin embargo, si se ignora la dilución, como es el caso de los modelos unidimensionales, eventualmente alcanzará  $C_0$ .

Considerando sólo biodegradación resulta un descenso asintótico en la concentración observada en el pozo. Hay que hacer notar que el crecimiento bacterial y la adaptación incrementan la tasa de degradación, lo que resulta en un decrecimiento posterior de la concentración del pozo. Si la biodegradación es rápida, el contaminante podría no llegar nunca al pozo.

#### **2.2.19. Composición química del agua de mar**

Según Cifuentes, Torres y Frías (1997). Una gran cantidad de químicos analistas se han entregado al estudio de la composición química del agua oceánica, tratando de determinar con exactitud su composición salina. Desde los tiempos del químico Lavoisier hasta nuestros días, los análisis se han sucedido repetidamente.

Las primeras determinaciones de las sales disueltas en el agua del mar, hechas con precisión, se deben al oceanógrafo William Dittmar que analizó 77 muestras recolectadas en los océanos Atlántico, Pacífico e Índico en la expedición del Challenger alrededor del mundo que se realizó durante los años 1873 a 1876. En 1884 determinó halógenos, sulfatos, cloruros, carbonatos de sodio, magnesio, calcio y potasio. Y descubrió que estas sales se encontraban en cantidades más o menos



constantes, por ejemplo el ión cloruro representa siempre el 56 por ciento de los sólidos totales disueltos en el agua del mar, y el magnesio el 4 por ciento.

El primer componente del mar es el *agua*, compuesto que tiene cada una de sus moléculas formadas por un átomo de oxígeno y dos átomos de hidrógeno ( $H_2O$ ). En el sistema solar parece ser que solo se encuentra en la Tierra y que en los otros planetas puede estar en forma de cristales de hielo.

En nuestro planeta es abundante y se estima que existen 1.370 millones de kilómetros cúbicos de agua, la mayor parte de ella formando el agua del océano, otra parte como agua dulce en los continentes, como hielo o nieve en las montañas y glaciares y como vapor de agua en la atmósfera. Se ha calculado que por cada litro de vapor de agua existen 33 litros de agua dulce, 1 500 litros de agua de los hielos y las nieves y 90 mil litros de agua en los océanos.

El agua de los océanos no es pura, sino que contiene en solución una gran variedad de elementos y compuestos químicos llamados sales, en una proporción de 96.5 por ciento de agua y 3.5 por ciento de estos últimos.

Las sales disueltas en el océano constituyen casi 50 billones de toneladas y están formadas por 10 elementos principales por encontrarse en mayores proporciones: cloro, sodio, magnesio, azufre, calcio, potasio, bromo, estroncio, boro y flúor.

El cloro y el sodio son los constituyentes fundamentales del agua del mar y se encuentran en forma de cloruro de sodio que se conoce como la sal común. Esta sal representa el 80 por ciento de las sales en solución.

Después del cloro y el sodio, el magnesio es el elemento más abundante en el agua del mar, se encuentra en una relación constante respecto al cloro. Se combina con



otros elementos formando cloruro de magnesio, sulfato de magnesio y bromuro de magnesio y está presente en el esqueleto de algunos organismos marinos.

El azufre se encuentra en forma de sulfatos, compuestos cuya concentración varía poco, aunque pueden cambiar notablemente sus proporciones en las aguas próximas al litoral debido a la influencia de las aguas fluviales, más ricas en sulfatos que las marinas.

La cantidad de calcio que contienen las aguas oceánicas es menor que la de los elementos anteriores y su relación con el cloro permanece relativamente constante.

El otro elemento en abundancia es el potasio, que tiene su relación constante con el cloro. En las zonas litorales la cantidad de potasio puede modificarse al ser asimilado por los vegetales marinos que tapizan el fondo costero.

El *bromo* forma bromuros, aunque su proporción es pequeña al encontrarse 65 g/m<sup>3</sup> de agua del mar, este elemento se ha logrado extraerlo en cantidades industriales y se utiliza como detonante de los combustibles líquidos.

El *estroncio* es un elemento que se ha encontrado en el agua oceánica pero ha sido poco estudiado, se detecta junto con el calcio por la dificultad técnica para poder separarlo. Puede formar parte del esqueleto de algunos organismos marinos.

Los últimos elementos que los oceanógrafos químicos consideran como componentes principales del agua del mar son el *boro* y el *flúor*.

A continuación se muestra una tabla de las cantidades existentes en el mar de cada uno de estos elementos:



<b>Elemento</b>	<b>Toneladas millas<sup>3</sup> de agua de mar</b>
Cloro	89.500.000
Sodio	49.500.000
Magnesio	6.400.000
Azufre	4.200.000
Calcio	1.900.000
Potasio	1.800.000
Bromo	306.000
Estroncio	38.000
Boro	23.000
Fluor	6.100

**Tabla 2.1.** Elementos principales que componen el agua de mar

Fuente: CIFUENTES, TORRES, FRIAS (1997).



## CAPÍTULO I

### 1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Cada día es mayor la dependencia al abastecimiento de agua potable de los recursos hídricos subterráneos, lo cual pone en relevancia la importancia que adquiere el conocer si la calidad del agua subterránea está siendo alterada.

Las aguas subterráneas y los suelos se ven afectados por las condiciones sanitarias de la venciencia de la fuente, particularmente donde la contaminación superficial puede derivarse de letrinas, sumideros, campos de riego o de infiltración de cloacas, sobre todo si esa contaminación alcanza el nivel freático.

La contaminación de las aguas subterráneas y los suelos no sólo se ven afectadas por las condiciones sanitarias de la venciencia de la fuente sino también por problemas de infiltración de aguas contaminadas que provienen de los ríos y canales, recargas artificiales y también por la intrusión del agua de mar hacia el interior de los acuíferos costeros ocasionado por la sobreexplotación de los pozos cercanos a las costas.

Es importante aclarar que los cloruros existen en todas las aguas naturales y el contenido del mismo aumenta a medida que aumenta el contenido de los minerales. Por lo general, las fuentes de agua en las tierras altas y de las montañas tienen bajo contenido de cloruros, mientras que los ríos y las aguas subterráneas tienen cantidades considerables.

La presencia de altos contenidos de cloruros en las fuentes de agua subterránea representa un grave problema a las personas, ya que concentraciones mayores de 250 mg/L dan un sabor salado al agua.



En función de las características de cada suelo, a lo largo de toda su profundidad, los contaminantes pueden quedarse en ella, degradarse o ser arrastrados mediante los flujos de agua.

Si no se llevase un monitoreo de la calidad del agua potable proveniente de los recursos hídricos subterráneos traería como consecuencia que aumentase el contenido de cloruros (a un nivel no aceptable por las personas) presentes en esta agua ocasionando la pérdida completa de esta fuente de agua. Es por eso que el agua como fuente indispensable y vital para la humanidad necesita de un monitoreo en su calidad, razón por la cual nos vemos en la necesidad de plantear modelos que nos permitan obtener el grado de dispersión de los contaminantes en el suelo.

Alrededor de las últimas dos décadas un gran número de modelos han aparecido para simular el movimiento de soluciones inorgánicas y contaminantes orgánicos en suelos homogéneos. El mecanismo de transporte de contaminantes en el suelo/agua subterránea depende de la conductividad hidráulica del suelo/acuífero, es decir, si la conductividad hidráulica es muy baja (como algunos acuíferos y arcillas) el mecanismo de transporte puede ser básicamente por difusión, mientras que si la conductividad es alta el mecanismo de transporte predominante es por advección.

En general, la estimación cuantitativa del coeficiente de dispersión constituye un prerrequisito en la solución de los problemas hidrológicos sobre el transporte de contaminantes.

Una forma confiable de estimar el coeficiente de dispersión consiste en efectuar una prueba con un trazador en una columna de suelo y analizar los datos para la obtención del coeficiente de dispersión.



Si estos estudios se llevaran a cabo en los lugares donde el agua subterránea es la fuente de abastecimiento y que presentan características de posible contaminación (de acuerdo a las características de la vecindad), se podría evitar que llegase el contaminante a la fuente de agua potable.

### **1.2. OBJETIVOS DEL ESTUDIO**

#### **1.2.1. Objetivo General**

Estimar el coeficiente de Dispersión Longitudinal experimental mediante pruebas realizadas a una columna de suelo.

#### **1.2.2. Objetivos Específicos**

- Realizar las modificaciones necesarias al Filtro Piloto que se encuentra en el Laboratorio de Calidad Ambiental para poner en funcionamiento una columna de suelo y así estimar el coeficiente de dispersión.
- Seleccionar el medio poroso que formará la columna de suelo.
- Seleccionar la sustancia trazadora que servirá para simular el movimiento de contaminantes.
- Medir las concentraciones de la sustancia trazadora utilizando el método de Absorción Atómica (las cuales se medirán en el Centro de Investigaciones Químicas).
- Realizar la gráfica de concentración relativa versus el tiempo, comúnmente conocida como curva de desarrollo (BTC).
- Realizar la gráfica de concentración relativa versus distancia.
- Estimar el coeficiente de dispersión longitudinal con el empleo de los métodos propuestos por Ogata (1958) y Singh (2002).



### 1.3. JUSTIFICACIÓN

El crecimiento y desarrollo de las poblaciones trae como consecuencia la utilización de nuevas y mejores tecnologías para la optimización de los recursos que el hombre necesita, sin darse cuenta que con esto se podría estar agotando y destruyendo algunos recursos naturales.

El uso de nuevas tecnologías podría traer como consecuencia la contaminación de muchas fuentes de abastecimiento de agua, como las fuentes subterráneas, que en algunos países es el único lugar de donde obtener agua.

La contaminación de estas fuentes es llevada a cabo tal vez por la ignorancia de la población pero muchas veces por la irresponsabilidad de quienes lo generan.

Actualmente está siendo muy estudiado el problema del Calentamiento Global. Según la revista National Geographic (en su edición de Septiembre de 2004) el cambio de temperaturas ha desempeñado un papel importante en el aumento global del nivel del mar, ya que de acuerdo con el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático este ha aumentado entre 10 y 20 centímetros en los últimos 100 años, en el mismo artículo se hace mención sobre como el aumento del nivel del mar afecta a la calidad de las aguas subterráneas, el cual se cita a continuación:

.....cada centímetro de aumento en el nivel del mar podría resultar en un metro de retroceso de los bordes de las playas de arena debido a la erosión. Más aún, cuando la sal se introduce en acuíferos de agua dulce amenaza las fuentes de agua potable y va en merma de los cultivos. En el delta del Nilo, donde se ubican muchos cultivos de Egipto, la erosión extendida y la intrusión de sal podrían ser desastrosas, ya que en el país son escasas otras tierras cultivables.

Es importante aclarar que las excretas humanas y en general las de todos los organismos superiores poseen una concentración de cloruros que es aproximadamente



igual a la que ingiere en los alimentos, lo cual representa una de las principales razones por las cuales se incluye el ion cloruro en los análisis de de naturaleza fisicoquímica, ya que este se comporta como un trazador o indicador ideal en los estudios de contaminación de aguas.

Con la construcción y puesta en funcionamiento de una columna de suelo estratificado en la Escuela de Ingeniería Civil se estaría contribuyendo a la estimación del coeficiente de dispersión a nivel de laboratorio, el cual se puede obtener realizando una prueba con un trazador sobre una columna de suelo inalterado a nivel de laboratorio y posteriormente analizar el transporte de contaminantes en el suelo, ya que la estimación cuantitativa del coeficiente de dispersión constituye un prerequisite en la solución de problemas hidrológicos que traten sobre el transporte de contaminantes.

Con el presente Trabajo Especial de Grado, se ayudará a dotar a nuestros laboratorios con equipos diseñados y construidos por los propios estudiantes.

### **1.4. ALCANCE**

En el presente Trabajo Especial de Grado se plantea construir y poner en funcionamiento una columna de suelo para estimar el coeficiente de dispersión, además de dotar a la Facultad de Ingeniería con un equipo que permita estimar el coeficiente de dispersión a nivel de Laboratorio.

La columna de suelo que se utilizará fue construida solo para fines de filtrar agua, la misma fue realizada por Juan Rodríguez como Trabajo Especial de Grado, la cual tendrá que ser modificada para medir las concentraciones de la sustancia trazadora y así poder estimar el coeficiente de dispersión.



El coeficiente de dispersión se calculará por la ecuación propuesta por Ogata (1958), y por el método de Singh, para así conocer la variación del valor del coeficiente dispersión entre estos métodos.

### **1.5. LIMITACIONES**

Los métodos planteados son solo para suelos homogéneos y para medios isotrópicos con lo cual nos estaríamos alejando un poco de la realidad ya que los suelos en su mayoría no son homogéneos, sin embargo, en algunos casos las propiedades de los medios varían en forma espacial y la no homogeneidad se puede considerar solo ocasional.

Uri Shamir y Donald Harleman (1967) consideran que los medios estratificados son un ejemplo común de los medios no homogéneos con distintas regiones.

Una de las limitaciones que presenta este estudio es que sólo va a ser estudiada la dispersión longitudinal en un medio poroso, es decir, la dispersión lateral no va ser considerada. Debido a que solo va a ser considerada la dispersión longitudinal sólo se van a considerar las ecuaciones de transporte de contaminantes para el movimiento longitudinal.

La sustancia trazadora utilizada no podrá ser un reactivo químico ya que si se utilizase este la obtención del coeficiente de dispersión se volvería un problema muy complejo debido a que se necesitaría considerar las tasas microbianas y las tasas de reacción química en la ecuación de Advección – Dispersión.

Otra de las limitaciones que se presenta en este estudio es que de todos los mecanismos de transporte de contaminantes que existen, sólo se considerará la dispersión hidrodinámica, esto es debido a la necesidad de enfocarnos en una sola



## CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

---

ecuación, ya que el análisis de los otros mecanismos de transporte volvería el estudio muy complejo.

Sólo se considerará el flujo de contaminantes en el agua del suelo/aguas subterráneas ya que este movimiento es definible sólo para acuíferos, mientras que si se realizan los estudios para una zona insaturada las ecuaciones a utilizar se vuelven más complejas, entendiéndose como zona insaturada aquella zona que esta sujeta a humedades, sequedades y que depende de parámetros como el caudal de lluvia y la infiltración.



## CONCLUSIONES

Esta investigación se realizó con la finalidad de presentar las ecuaciones que permitan obtener el coeficiente de Dispersión Longitudinal de una sustancia trazadora en un medio poroso, los datos necesarios para obtener el coeficiente de dispersión se recolectaron a partir de experimentos con una columna de suelo. A partir de lo cual se concluye:

- ❖ El acondicionamiento del filtro piloto fue de gran ayuda para observar el desarrollo del experimento, ya que, las láminas de acrílico, los materiales y las técnicas utilizadas en su construcción, son las adecuadas para la elaboración de modelos a escala.
- ❖ Respecto a la selección del medio, la de arena fue de sílice ya que esta cumplió con las características que exigen las ecuaciones de la presente investigación: garantizar un medio homogéneo e isotrópico.
- ❖ El espesor de un metro de la columna de arena fue el adecuado, ya que el tamaño de las partículas de arena entran dentro de la clasificación de mediana a gruesa y un espesor menor hubiese ocasionado una filtración rápida del soluto y por ende no se hubiese observado bien el desarrollo del experimento.
- ❖ El uso de cloruro de sodio (NaCl) como sustancia trazadora resultó de igual manera ser el adecuado para el desarrollo del experimento, por ser fácil de obtener y accesible el mecanismo de medición de su concentración.
- ❖ El uso del equipo de espectrofometría de absorción atómica resultó ser un mecanismo de medición de concentraciones sencillo y rápido. El uso de este equipo de debe principalmente a que se decidió medir la concentración del sodio y no del cloruro, ya que teóricamente la concentración del sodio y del cloruro son iguales.
- ❖ En la gráfica de concentración relativa versus tiempo se observa como va aumentando la concentración del sodio a medida que transcurre el tiempo, es

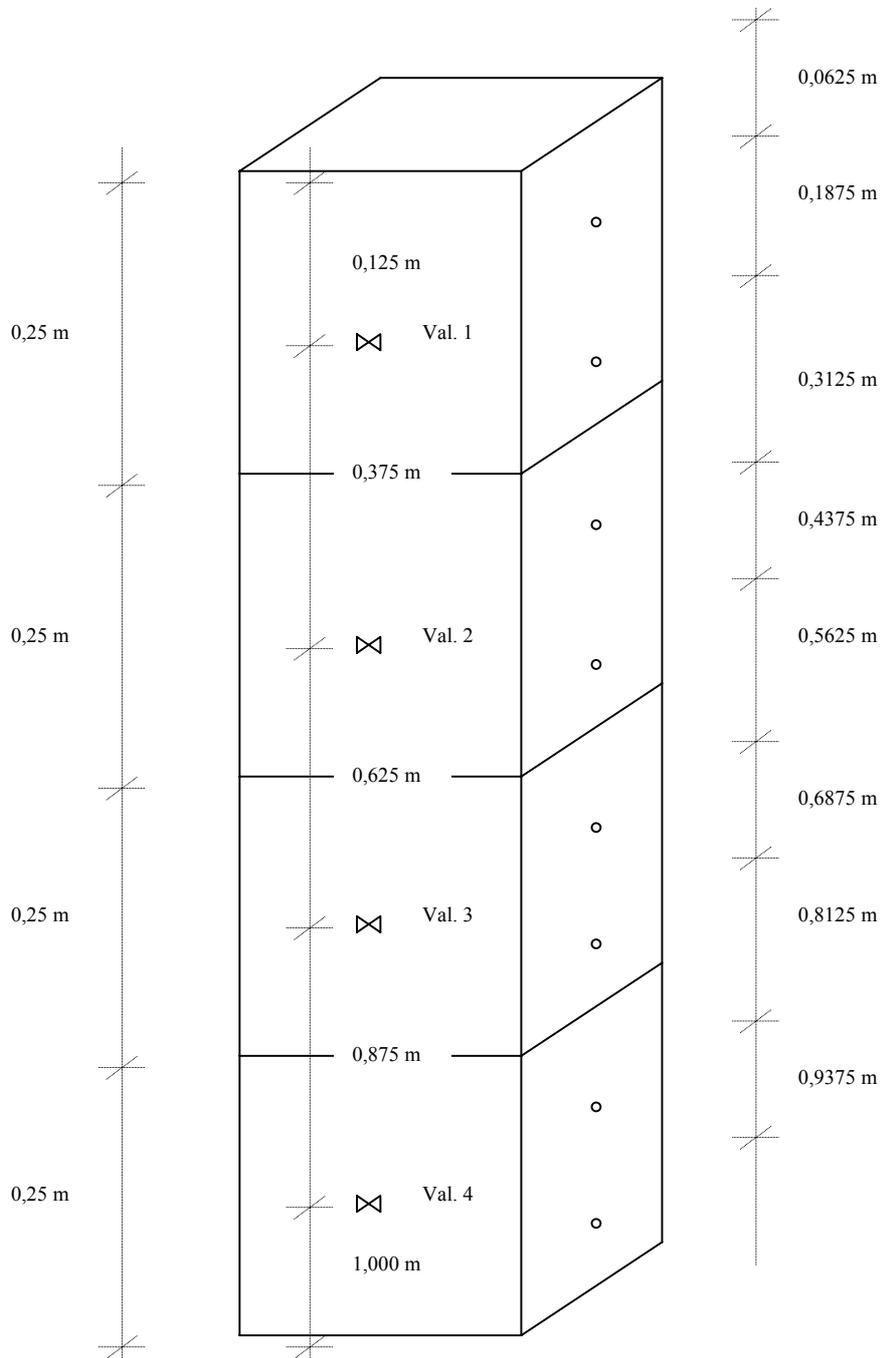


decir, tiene una clara tendencia a igualar la concentración que se esta agregando a la columna y en la gráfica de concentración relativa versus distancia se observa como el sodio va disminuyendo su concentración a lo largo de la columna.

De acuerdo a los resultados obtenidos, se observa que para un metro de columna de arena la concentración de sodio tarda un poco más de una hora en alcanzar la concentración que se esta agregando. Esto queda evidenciado con las gráficas de concentración relativa versus distancia ya que se observa como la concentración va disminuyendo a lo largo de la columna. Lo anterior implica que si a la distancia de 1 m se extrae el agua que es para consumo y que además se esta vertiendo un contaminante en la superficie, este tardaría un poco más de una hora en llegar al agua que es para consumo humano. Tomando en cuenta que el medio tendría que tener el mismo tamaño de arena usada en el presente estudio, es decir, el tamaño de los granos tendría que estar dentro de la clasificación de mediana a gruesa.

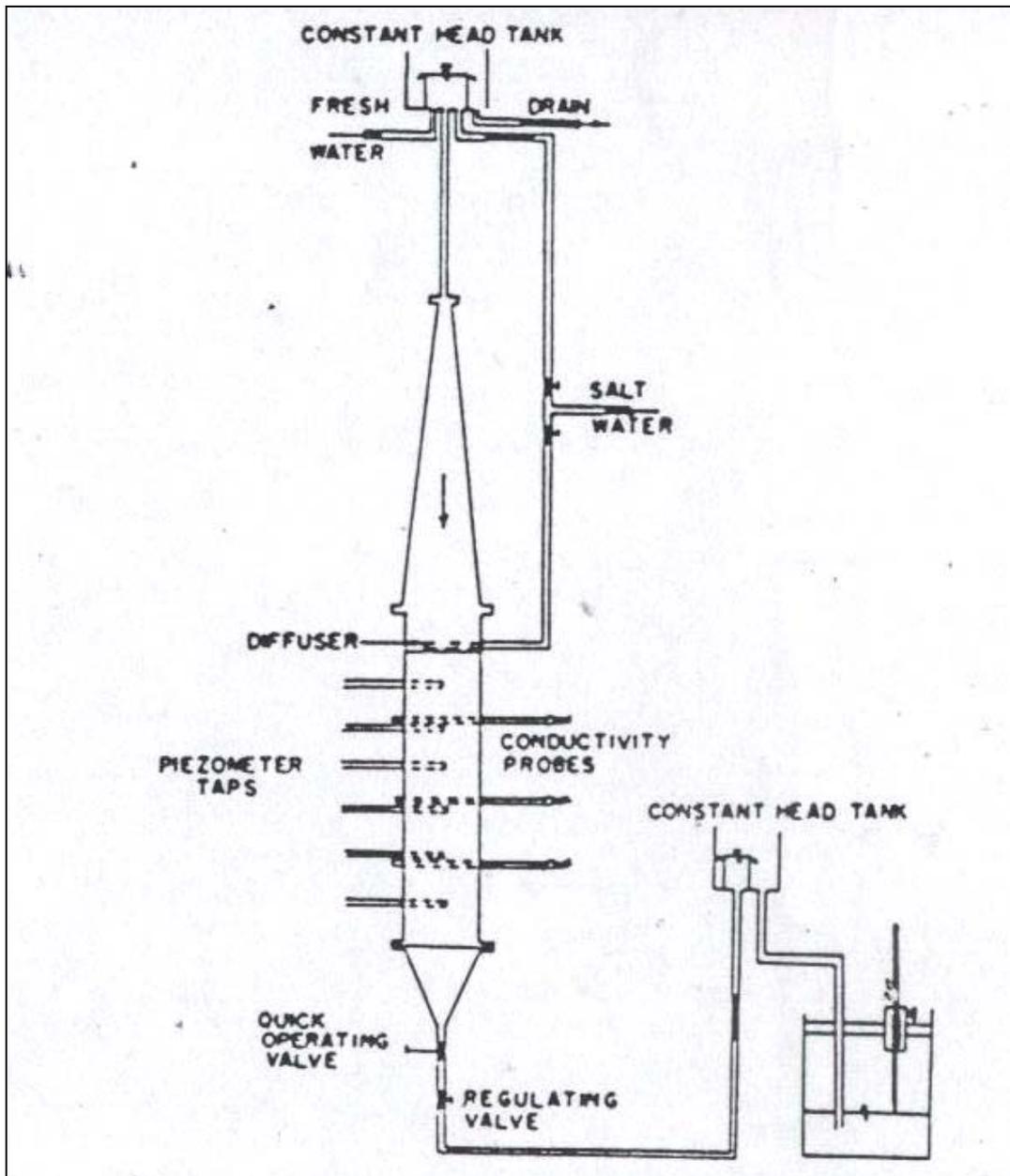
Los valores de la dispersión longitudinal calculados dan con una tendencia a la disminución debido a que la presencia del sodio tiende a aumentar con el tiempo, esto es debido a que durante el tiempo en que se esta produciendo el aumento de la presencia del contaminante en el suelo el fenómeno físico de la dispersión mecánica esta actuando, ejerciendo un papel importante como estabilizador en la columna de suelo. En otras palabras a medida que aumenta la presencia de un contaminante en la arena el valor de la dispersión va a ir disminuyendo hasta que el contaminante tome posesión completa del medio. Esto se pudo observar claramente empleando el método de Ogata en cada grupo de pruebas.

Los diseños de este tipo dejan una ventana abierta para generar nuevas investigaciones, además de dotar a nuestros laboratorios con equipos diseñados y contruidos por sus propios estudiantes.



**Anexo 1.** Detalle de la columna de suelo

Fuente: VIRREIRA, Carla (2005)



Anexo 2. Equipo Experimental usado por Shamir y Harleman

Fuente: SHAMIR, Uri y HARLERMAN, Donald (1967)



**Valores estimados de la porosidad (%), según Sanders (1998)**

	total	eficaz
Arcillas	40 a 60	0 a 5
Limos	35 a 50	3 a 19
Arenas finas, arenas limosas	20 a 50	10 a 28
Arena gruesa o bien clasificada	21 a 50	22 a 35
Grava	25 a 40	13 a 26
Shale intacta	1 a 10	0,5 a 5
Shale fraturada/alterada	30 a 50	
Arenisca	5 a 35	0,5 a 10
Calizas, dolomías NO carstificadas	0,1 a 25	0,1 a 5
Calizas, dolomías carstificadas	5 a 50	5 a 40
Rocas ígneas y metamórficas sin fracturar	0,01 a 1	0,0005
Rocas ígneas y metamórficas fracturadas	1 a 10	0,00005 a 0,01

**Valores estimados de la conductividad hidráulica (metros /día)**

		Domenico	Smith & W	Freeze	Fetter	Sanders
Sedimentos	Grava	25 a 2500	100 a 10 <sup>5</sup>	100 a 10 <sup>6</sup>	10 a 1000	
	Grava con arena					
	Arena gruesa	0,1 a 500	0,01 a 1000	1 a 1000	1 a 100	1 a 100
	Arena media	0,1 a 50			0,01 a 1	0,01 a 1
	Arena fina	0,02 a 20				
	Arena arcillosa			0,01 a 100	0,001 a 0,1	
	Silt, loess	10 <sup>-4</sup> a 2	10 <sup>-4</sup> a 1	10 <sup>-4</sup> a 1	0,001 a 0,1	10 <sup>-4</sup> a 1
	Arcilla	10 <sup>-6</sup> a 4*10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-7</sup> a 10 <sup>-3</sup>		10 <sup>-6</sup> a 10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-6</sup> a 10 <sup>-3</sup>
Arcilla marina inalterada	10 <sup>-7</sup> a 2*10 <sup>-4</sup>		10 <sup>-11</sup> a 10 <sup>-7</sup>			
Rocas Sedimentarias	Calizas carstificadas	0,1 a 2000	0,05 a 0,5	0,1 a 1000		0,1 a 10 <sup>7</sup>
	Calizas, dolomías	10 <sup>-4</sup> a 0,5	0,001 a 0,5	10 <sup>-4</sup> a 1		10 <sup>-4</sup> a 1
	Areniscas	3*10 <sup>-5</sup> a 0,5	10 <sup>-5</sup> a 1	10 <sup>-5</sup> a 1		
	Argilitas (siltstone)	10 <sup>-6</sup> a 0,001				
	Pizarras sedimentarias (Shale) intactas	10 <sup>-8</sup> a 2*10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-8</sup> a 10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-4</sup> a 10 <sup>-8</sup>		10 <sup>-4</sup> a 10 <sup>-8</sup>
	Pizarras sed. (Shale) fracturadas/alteradas		10 <sup>-4</sup> a 1			
Rocas cristalinas	Basalto inalterado, sin fracturar		10 <sup>-6</sup> a 10 <sup>-3</sup>			10 <sup>-6</sup> a 10 <sup>-3</sup>
	Basalto fracturado/vesicular cuaternario		10 a 1000			0,1 a 10 <sup>6</sup>
	Escorias basálticas		0,001 a 1000			
	Basalto permeable	0,03 s 2000		0,02 a 1000		
	Rocas ígneas y metamórficas sin fracturar	10 <sup>-9</sup> a 10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-9</sup> a 10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-9</sup> a 10 <sup>-5</sup>		10 <sup>-9</sup> a 10 <sup>-5</sup>
	Rocas ígneas y metamórficas fracturadas	0,001 a 25	10 <sup>-5</sup> a 1	0,0005 a 20		10 <sup>-5</sup> a 1
	Granito alterado	0,3 a 5				
Gabro alterado	0,05 a 0,3					

**Anexo 3.** Valores estimados de porosidad y de conductividad hidráulica

Fuente: SANCHEZ, Francisco (1998)



Na  
(11)

Standard Atomic Absorption Conditions for Na

Wavelength (nm)	Slit (nm)	Relative Noise	Sensitivity (mg/L)	Sensitivity Check (mg/L)	Linear Range (mg/L)
Flow spoiler data:					
* 589.0	0.4	1.0	0.012	0.50	1.0
* 330.2	0.7	0.63	1.7	80.0	---
Impact bead data:					
589.0	0.4	1.0	0.0056	0.25	0.40
330.2	0.7	0.63	1.1	50.0	---

1. Recommended Flame: Air-acetylene, oxidizing (lean, blue)  
2. Data collected with an alkali salt (0.1% or more) added to control ionization.

Standard Flame Emission Conditions for Na

Wavelength (nm)	Slit (nm)	Flame
589.0	0.2	Air-acetylene

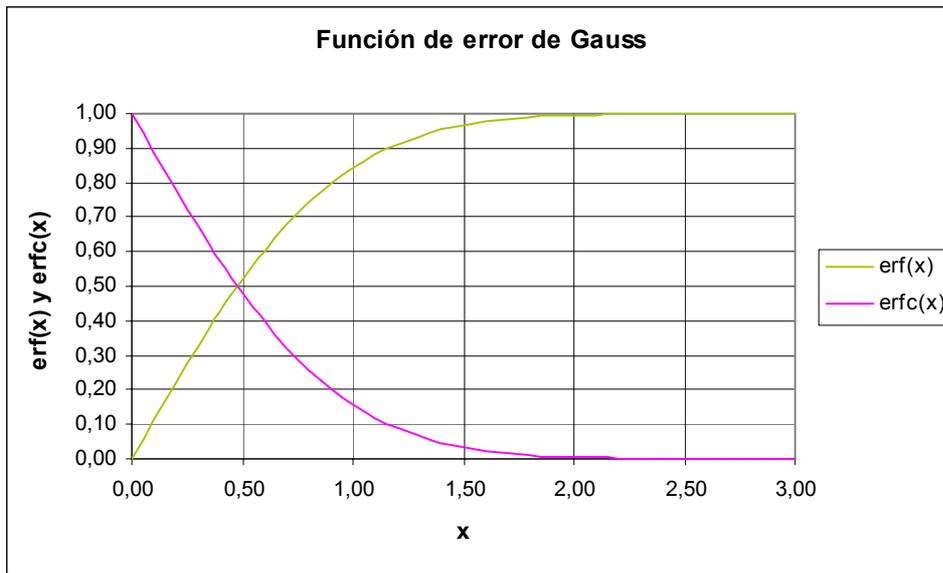
PERKIN-ELMER

January 1982

**Anexo 4.** Especificaciones del Espectrofotómetro de Absorción Atómica  
Fuente: Manual PERKIN - ELMER del Centro de Investigaciones Químicas de la  
Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo



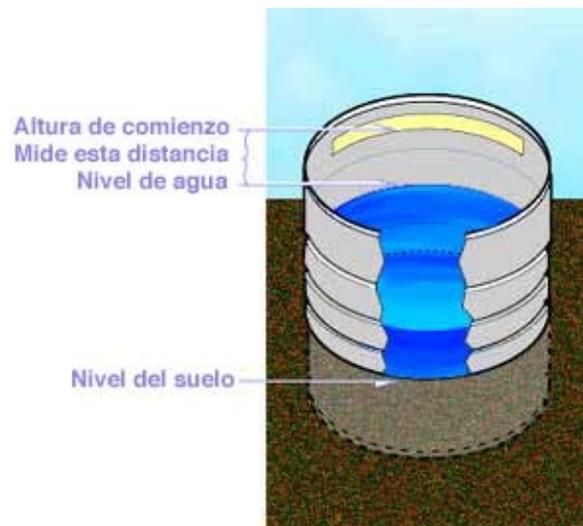
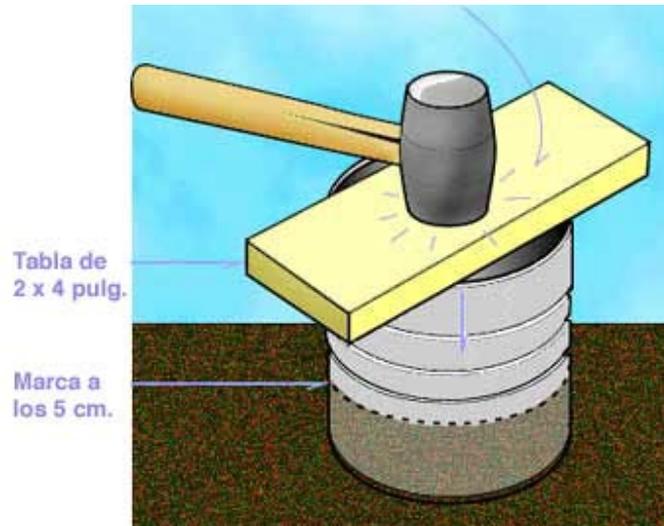
**Anexo 5.** Curva de la función de error de Gauss  
Fuente: ALVAREZ Pedro y GUEVARA Edilberto (2.003).





**Anexo 6.** Valores de la función de error de Gauss  
Fuente: ALVAREZ Pedro y GUEVARA Edilberto (2.003).

$\beta$	ERF ( $\beta$ )	ERFC ( $\beta$ )
0	0	1
0,05	0,056372	0,943628
0,10	0,112463	0,887537
0,15	0,167996	0,832004
0,20	0,222703	0,777270
0,25	0,276326	0,723674
0,30	0,328627	0,671373
0,35	0,379382	0,620618
0,40	0,428392	0,571608
0,45	0,475482	0,524518
0,50	0,520500	0,479500
0,55	0,563323	0,436677
0,60	0,603856	0,396144
0,65	0,642029	0,357971
0,70	0,677801	0,322199
0,75	0,711155	0,288845
0,80	0,742101	0,257899
0,85	0,770668	0,229332
0,90	0,796908	0,203092
0,95	0,820891	0,179109
1,00	0,842701	0,157299
1,10	0,880205	0,119795
1,20	0,910314	0,089686
1,30	0,934008	0,065992
1,40	0,952285	0,047715
1,50	0,966105	0,033895
1,60	0,976346	0,023652
1,70	0,983790	0,016210
1,80	0,989091	0,010909
1,90	0,992790	0,007210
2,00	0,995322	0,004678
2,10	0,997021	0,002979
2,20	0,998137	0,001863
2,30	0,998857	0,001143
2,40	0,999311	0,000639
2,50	0,999593	0,000407
2,60	0,999764	0,000236
2,70	0,999866	0,000134
2,80	0,999925	0,000075
2,90	0,999959	0,000041
3,00	0,999978	0,000022



**Anexo 7.** Ensayo de permeabilidad  
Fuente: [www.seed.slb.com/es/lab/permeability](http://www.seed.slb.com/es/lab/permeability)



**Anexo 8.** Ensayo de porosidad  
Fuente: [www.seed.slb.com/es/lab/permeability](http://www.seed.slb.com/es/lab/permeability)



°C	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
10	1.3012	1.2976	1.2940	1.2903	1.2867	1.2831	1.2795	1.2759	1.2722	1.2686
11	1.2650	1.2615	1.2580	1.2545	1.2510	1.2476	1.2441	1.2406	1.2371	1.2336
12	1.2301	1.2268	1.2234	1.2201	1.2168	1.2135	1.2101	1.2068	1.2035	1.2001
13	1.1968	1.1936	1.1905	1.1873	1.1841	1.1810	1.1777	1.1746	1.1714	1.1683
14	1.1651	1.1621	1.1590	1.1560	1.1529	1.1499	1.1469	1.1438	1.1408	1.1377
15	1.1347	1.1318	1.1289	1.1260	1.1231	1.1202	1.1172	1.1143	1.1114	1.1085
16	1.1056	1.1028	1.0999	1.0971	1.0943	1.0915	1.0887	1.0859	1.0803	1.0802
17	1.0774	1.0747	1.0720	1.0693	1.0667	1.0640	1.0613	1.0586	1.0560	1.0533
18	1.0507	1.0480	1.0454	1.0429	1.0403	1.0377	1.0351	1.0325	1.0300	1.0274
19	1.0248	1.0223	1.0198	1.0174	1.0149	1.0124	1.0099	1.0074	1.0050	1.0025
20	1.0000	0.9976	0.9952	0.9928	0.9904	0.9881	0.9857	0.9833	0.9809	0.9785
21	0.9761	0.9738	0.9715	0.9692	0.9669	0.9646	0.9623	0.9600	0.9577	0.9554
22	0.9531	0.9509	0.9487	0.9465	0.9443	0.9421	0.9399	0.9377	0.9355	0.9333
23	0.9311	0.9290	0.9268	0.9247	0.9225	0.9204	0.9183	0.9161	0.9140	0.9118
24	0.9097	0.9077	0.9056	0.9036	0.9015	0.8995	0.8975	0.8954	0.8934	0.9813
25	0.8893	0.8873	0.8853	0.8833	0.8813	0.8794	0.8774	0.8754	0.8734	0.8714
26	0.8694	0.8675	0.8656	0.8636	0.8617	0.8598	0.8579	0.8560	0.8540	0.8521
27	0.8502	0.8484	0.8465	0.8447	0.8428	0.8410	0.8392	0.8373	0.8355	0.8336
28	0.8318	0.8300	0.8282	0.8264	0.8246	0.8229	0.8211	0.8193	0.8175	0.8157
29	0.8139	0.8122	0.8105	0.8087	0.8070	0.8053	0.8036	0.8019	0.8001	0.7984
30	0.7967	0.7950	0.7934	0.7917	0.7901	0.7884	0.7867	0.7851	0.7834	0.7818
31	0.7801	0.7785	0.7769	0.7753	0.7737	0.7721	0.7705	0.7689	0.7673	0.7657
32	0.7641	0.7626	0.7610	0.7595	0.7579	0.7564	0.7548	0.7533	0.7517	0.7502
33	0.7486	0.7471	0.7456	0.7440	0.7425	0.7410	0.7395	0.7380	0.7364	0.7349
34	0.7334	0.7320	0.7305	0.7291	0.7276	0.7262	0.7247	0.7233	0.7218	0.7204
35	0.7189	0.7175	0.7161	0.7147	0.7133	0.7120	0.7106	0.7092	0.7078	0.7064

**Anexo 9.** Valores de viscosidad absoluta del fluido  
Fuente: BOWLES Joseph (1980).



## RECOMENDACIONES

Una vez realizado el presente trabajo de investigación, el cual consistió en la construcción y puesta en funcionamiento de una columna de suelo para estimar el coeficiente de dispersión longitudinal, se considera pertinente aportar las siguientes recomendaciones:

- Se debe determinar las concentraciones de la sustancia trazadora que se pudiesen estar presentes en la arena antes de iniciar el experimento.
- Para realizar la concentración deseada de la sustancia trazadora se debe utilizar agua desionizada.
- Si se deseara trabajar con el presente estudio para verificar la contaminación de acuíferos no se debe medir la concentración del sodio basándose en que es la misma concentración de cloruro, ya que en la realidad la parte superior de los acuíferos están expuestos a otros agentes contaminantes (como excretas, aguas residuales, etc.) que pueden aumentar la concentración del cloruro.
- Se debe realizar un estudio más profundo acerca de la influencia de la función de error en la ecuación de advección – dispersión.
- De igual manera se debe profundizar más acerca del efecto escala en los valores de la dispersión longitudinal.