

**ESTUDIO DE MODELACIÓN DEL VERTIMIENTO Y DISEÑO HIDRÁULICO DEL  
CAMPO DE ASPERSIÓN DE AGUAS RESIDUALES DE UNA  
PLATAFORMA PETROLERA**

**HECTOR MAURO DIAZ SANCHEZ  
CAMILO ALBERTO GOMEZ OCAMPO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO QUIMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUIMICA  
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERIA AMBIENTAL  
BUCARAMANGA  
2.014**

**ESTUDIO DE MODELACIÓN DEL VERTIMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS E INDUSTRIALES EN EL CAMPO DE ASPERSIÓN DE UNA PLATAFORMA PETROLERA**

**HECTOR MAURO DIAZ SANCHEZ  
CAMILO ALBERTO GOMEZ OCAMPO**

**Monografía para optar al título de  
Especialista en Ingeniería Ambiental**

**Director  
ING. RICHARD DIAZ GUERRERO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO QUIMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERIA AMBIENTAL  
BUCARAMANGA  
2.014**

## TABLE DE CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN .....	14
1. ÁREA DE ESTUDIO .....	16
2. METODOLOGÍA .....	18
2.1 FASE I: DIAGNOSTICO DEL ÁREA DE ESTUDIO .....	18
2.1.1 Características del Suelo .....	18
2.1.1.1 Toma de Muestras para Laboratorio .....	18
2.1.2 Desarrollo de Pruebas de Infiltración .....	19
2.1.2.1 Metodología de Infiltrómetro de Doble Anillo .....	20
2.1.3 Sondeos Eléctricos Verticales y su Interpretación .....	20
2.2 FASE II: SELECCIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN .....	22
2.2.1 Modelación del Vertimiento de Aguas Residuales Domesticas .....	22
2.2.2 Modelación del Vertimiento de Aguas Industriales .....	24
2.3 FASE III: PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN .....	26
2.3.1 Calculo de la Conductividad Hidráulica.....	26
2.3.2 Determinación de la Carga Hidráulica .....	27
2.3.3 Calculo de la Superficie de Infiltración .....	27
2.3.4 Diseño Hidráulico del Campo de Aspersión.....	28
2.3.4.1 Superficie por modulo .....	28
2.3.4.2 Superficie de riego mínima para la disposición.....	28
2.3.4.3 Lamina bruta a disponer .....	28
2.3.4.4 Caudal del aspersor a seleccionar.....	29
2.3.4.5 Diseño hidráulico de la tubería.....	29
2.3.4.6 Pérdidas por fricción .....	29
2.3.4.7 Requerimientos de potencia de la bomba.....	30
2.3.5 Red de Monitoreo de Aguas Subterráneas .....	30
3. RESULTADOS.....	31

3.1 CARACTERÍSTICAS DEL SUELO .....	31
3.2 PRUEBAS DE INFILTRACIÓN .....	33
3.2.1 Punto 1:.....	33
3.2.2 Punto 2:.....	34
3.2.3 Punto 3.....	35
3.2.4 Calculo de la Conductividad Hidráulica.....	37
3.2.5 Carga Hidráulica y Superficie de Infiltración .....	39
3.3 MODELACIÓN DEL VERTIMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS. ....	42
3.3.1 Datos de Entrada .....	42
3.3.2 Desarrollo de la Modelacion del Área de Aspersión para Aguas Residuales Domésticas .....	45
3.4 DESARROLLO DE LA MODELACIÓN DEL CAMPO DE ASPERSIÓN PARA AGUAS INDUSRTRIALES.....	48
3.4.1 Modelación de aguas industriales.....	50
3.5 DISEÑO HIDRÁULICO DEL SISTEMA DE RIEGO DE AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS E INDUSTRIALES.....	53
3.5.1 Superficie por Modulo .....	54
3.5.2 Superficie de Riego Mínima para la Disposición.....	54
3.5.3 Lámina Bruta a Disponer .....	55
3.5.4 Selección del Aspensor .....	56
3.5.4.1 Caudal del aspensor a seleccionar .....	56
3.5.5 Diseño Hidráulico de la Tubería.....	57
3.5.5.1 Pérdidas por fricción .....	58
3.5.6 Equipo de Bombeo .....	59
3.6 red de monitoreo de aguas subterranas .....	60
4. conclusiones y recomendaciones .....	62
BIBLIOGRAFÍA .....	64
ANEXOS .....	65

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1: Resultados laboratorio de suelos .....	31
<i>Tabla 2:</i> Resultado del sondeo eléctrico vertical 1.....	32
<i>Tabla 3:</i> Resultado del sondeo eléctrico vertical 2.....	32
Tabla 4: Resultados de las mediciones de la prueba de Infiltración realizada en el punto 1 .....	34
Tabla 5: Resultados de las mediciones de la prueba de Infiltración realizada en el punto 2.....	35
Tabla 6: Resultados de las mediciones de la prueba de Infiltración realizada en el punto 3.....	36
Tabla 7: Calculo de la conductividad hidráulica saturada.....	37
<i>Tabla 8:</i> Valores recomendados para el factor de aplicación .....	39
<i>Tabla 9:</i> Determinación de la carga hidráulica punto de infiltración numero 1 .....	40
<i>Tabla 10:</i> Calculo de la superficie de infiltración - punto de infiltración numero 1..	40
<i>Tabla 11:</i> Determinación de la carga hidráulica punto de infiltración numero 2.....	41
<i>Tabla 12.</i> Calculo de la superficie de infiltración - punto de infiltración numero 2..	41
<i>Tabla 13.</i> Determinación de la carga hidráulica punto de infiltración numero 3.....	41
<i>Tabla 14.</i> Calculo de la superficie de infiltración - punto de infiltración numero 3..	41

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1: Localización general del campo de aspersion en el área de la plataforma.	16
Figura 2: Localización general de las pruebas de infiltración.....	19
Figura 3: Arreglo de Schlumberger. ....	22
Figura 4: Localización general de los Sondeos Eléctricos Verticales. ....	21
Figura 5: Tiempo de modelación.....	25
Figura 6: Valores de concentración. ....	25
Figura 7: Área dispuesta para efectos de vertimiento según modelo .....	26
Figura 8: Perfil litológico del suelo receptor. ....	33
Figura 9: $\text{Log}(h_t+r/2)$ vs T, prueba de infiltración 1.....	38
Figura 10: $\text{Log}(h_t+r/2)$ vs T, prueba de infiltración 2.....	38
Figura 11: $\text{Log}(h_t+r/2)$ vs T, prueba de infiltración 3.....	38
Figura 12: Configuración de hexaedro base .....	42
Figura 13: Configuración de intervalo de tiempo de modelación .....	43
Figura 14: Configuración de características físicas del suelo – textura, densidad aparente.....	44
Figura 15: Concentración del contaminante en el primer año.....	45
Figura 16: Concentración del contaminante en el segundo año. ....	46
Figura 17: Concentración del contaminante en el tercer año.....	46
Figura 18: Concentración del contaminante en el cuarto año.....	47
Figura 19: Concentración del contaminante en el quinto año. ....	47
Figura 20: Tiempo de modelación.....	49
Figura 21: Valores de concentración. ....	49
Figura 22: Concentración del contaminante en el primer año de vertimiento. ....	50
Figura 23: Concentración del contaminante en el segundo año de vertimiento....	51
Figura 24: Concentración del contaminante en el tercer año de vertimiento. ....	51
Figura 25: Concentración del contaminante en el cuarto año de vertimiento. ....	52
Figura 26: Concentración del contaminante en el quinto año de vertimiento.....	52

Figura 27: Localización general y diseño del campo de aspersión.....	54
Figura 28: Especificaciones de diseño del aspersor Seleccionado.....	57
Figura 29: Diseño final de los piezómetros .....	61

## LISTA DE FOTOGRAFÍAS

	<b>Pág.</b>
<b>Fotografía 1:</b> Toma de muestra de suelo.....	18
<b>Fotografía 2:</b> Prueba de infiltración realizada por el método de doble anillo. ....	20

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
Anexo A Reportes de laboratorio.....	65

## RESUMEN

**TITULO: ESTUDIO DE MODELACIÓN DEL VERTIMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS E INDUSTRIALES EN EL CAMPO DE ASPERSIÓN DE UNA PLATAFORMA PETROLERA**

**Autores: DIAZ SANCHEZ, Mauro; GOMEZ OCAMPO, Camilo**

**Palabras Clave:** Aguas residuales, Campo de aspersión, Modelación de vertimientos, Piezómetro, Aguas subterráneas.

El presente estudio se realizó con el propósito de dar cumplimiento a los Decretos 3930 de 2010 y 1594 de 1984, los cuales dentro de su marco normativo buscan regular y condicionar los vertimientos que se realizan como parte del desarrollo de actividades industriales. En este caso específico, el sector petrolero. Para ello se emplearon dos modelos de simulación, uno para el vertimiento de aguas residuales domésticas y otro para el vertimiento de aguas residuales industriales, en el campo de aspersión de una plataforma. De esta manera, se determinó el área requerida para la disposición final de las aguas residuales domésticas e industriales generadas por las actividades de perforación. Se diseñó el sistema de riego por aspersión con un caudal de agua residual de 2 L/s y además se establecieron las especificaciones técnicas de la red de monitoreo de las aguas subterráneas susceptibles de intervención.

Teniendo como base: estudios de infiltración, análisis de suelo, sondeos eléctricos verticales y modelaciones de los vertimientos en suelo, se determinó la viabilidad del campo de aspersión de una plataforma en cuanto a la susceptibilidad que puede presentar el área destinada para el vertimiento. Dicho campo de aspersión tendría una superficie aproximada de 1028 m<sup>2</sup> donde se dispondrá diariamente una lámina bruta constante de 168.09mm de agua residual. De igual manera se hallaron las concentraciones máximas permisibles de estas aguas en los estratos del terreno. Estos cálculos nos permiten observar que no se sobrepasará la capacidad de infiltración del terreno y garantiza que en el período de disposición no se saturará el suelo, asegurando de esta manera que no se lleguen a ver afectados los recursos naturales existentes en la zona de influencia directa e indirecta del proyecto.

---

\*Proyecto de Grado.

\*\* Facultad de Ingeniería Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería Química, Especialización en Ingeniería Ambiental, Director: Ing. Richard Díaz Guerrero.

## ABSTRACT

**TITLE: STUDY OF MODELATION OF SPILLING OF THE DOMESTIC AND INDUSTRIAL RESIDUAL WATERS IN THE SPRAYING FIELD OF AN OIL RIG**

**Authors: DIAZ SANCHEZ, Mauro; GOMEZ OCAMPO, Camilo**

**Key words:** Residual waters, Spraying field, Spilling modelation, Piezometer, Groundwater.

The present study was undertaken in order to comply with Decree 3930 of 2010 and 1594 of 1984, which in its regulatory framework seek to control and regulate spilling that are performed as part of the development of industrial activities. In this specific case, the oil sector. For this porpoise two simulation models were made, one for dumping of domestic residual waters and other for dumping of industrial residual waters in the spilling field of the rig. Accordingly, the area required for the disposal of domestic and industrial residual waters from drilling activity, was determined. Also, the design of the sprinkler system with a flow rate of 2 L/s of residual water and the technical specifications of the monitoring network of groundwater susceptible to intervention were settled.

Taking into account: infiltration studies, soil analysis, vertical electrical sounding and modeling of the spilling into soil, the viability of spraying field platform was determined in terms of susceptibility that may have the area designated for the dumping. This spraying field would have a surface of 1028 m<sup>2</sup> where daily a constant gross depth of 168.09mm wastewater is spilled. In the same way a maximum permissible concentration of residual waters in the soil layers were found. These calculations allow us to observe that the infiltration capacity of the soil will not be exceeded and warrants that in the disposal period will not be saturated, ensuring that there will ever be affected the natural resources in the area of direct and indirect influence of the project.

---

\* Project of Degree.

\*\* Faculty of Engineering Physicochemical. School of Chemical Engineering. Specialization in Environmental Engineering. Directed. Ing. Richard Díaz Guerrero.

## INTRODUCCIÓN

Colombia en los últimos años ha presentado una tendencia de crecimiento en la exploración y explotación de hidrocarburos; en gran parte gracias a las políticas gubernamentales que han incentivado la inversión privada y los altos precios internacionales del crudo. Para la industria petrolera el conocimiento de los potenciales impactos ambientales ha sido una preocupación constante, el gran reto del sector está en el tratamiento y disposición final de sus diferentes residuos, principalmente los líquidos de tipo doméstico e industrial, los cuales representan un alto riesgo de contaminación tanto de los suelos, como del recurso hídrico superficial y subterráneo. Es por esto, que la responsabilidad ambiental se ha convertido en una de las prioridades en la actividad petrolera.

En el presente estudio se emplearon modelos de simulación para el vertimiento de aguas residuales domésticas e industriales en el campo de aspersión de una plataforma petrolera, con el propósito de dar cumplimiento al Decreto 3930 de 2010 y al Decreto 1594 de 1984, los cuales dentro de su marco normativo buscan regular y condicionar los vertimientos que se realizan como parte del desarrollo de los proyectos y actividades industriales. De esta manera, como parte de los alcances del proyecto se determinó el área requerida para la disposición final del agua residual doméstica e industrial generada por las actividades de perforación, se diseñó el sistema de riego por aspersión de un caudal de 2 l/s de agua residual y se establecieron las especificaciones técnicas de la red de monitoreo de las aguas subterráneas susceptibles de intervención.

Teniendo como base estudios de infiltración, análisis de suelo, modelaciones del comportamiento de los vertimientos en suelo y sondeos eléctricos verticales realizados en el área de influencia del campo de aspersión de la plataforma, se determinó la viabilidad en cuanto a la susceptibilidad que puede presentar el área

destinada para la disposición del vertimiento, permitiendo determinar la cantidad de residuos líquidos a disponer, tiempo de vertimiento y concentraciones máximas permisibles en los estratos del terreno, de manera que no se lleguen a ver afectados los recursos naturales existentes en la zona de influencia directa e indirecta del proyecto, y que de la misma forma no se vayan a ver en riesgo la salud tanto de los trabajadores del campo, como de la población aledaña a la zona de aspersión establecida.

## 1. ÁREA DE ESTUDIO

En el presente estudio se relaciona la información referente a las pruebas técnicas y de diseño del campo de aspersión para la disposición de aguas residuales domésticas e industriales previamente tratadas generadas durante las actividades de construcción y operación de un proyecto de explotación de hidrocarburos en el departamento de Córdoba.

Para tal efecto, se diseñó el sistema de aspersión mediante riego a saturación en suelos en un área de 0.5 ha, aledaña a la plataforma del pozo, en la **Figura 1** se evidencia la localización general del campo de aspersión en el área del proyecto.



**Fuente:** Los Autores

**Figura 1:** Localización general del campo de aspersión en el área de la plataforma.

El campo de aspersión será utilizado para disponer las aguas residuales asociadas a las actividades de perforación del pozo, para esto se utilizará un sistema de aspersores cuya descarga de flujo se puede realizar en forma continua o intermitente, según las características del suelo receptor. La programación de la descarga obedecerá a la eficiencia que se logre en la recepción del flujo en el suelo.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 FASE I: DIAGNOSTICO DEL ÁREA DE ESTUDIO

#### 2.1.1 Características del Suelo

##### 2.1.1.1 Toma de Muestras para Laboratorio

Durante la caracterización del área, se tomó una muestra de suelo para determinar las características del suelo receptor (**Fotografía 1**). Mediante una barra se procedió a tomar una muestra, esta fue empacada en una bolsa de cierre hermético de medio (1/2) Kg de capacidad, la cual posteriormente fue integrada y sellada para ser llevada al laboratorio de suelos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi para su respectivo análisis, las variables analizadas corresponden a: Densidad Real, Densidad Aparente, Porosidad, Humedad aprovechable y textura del suelo.



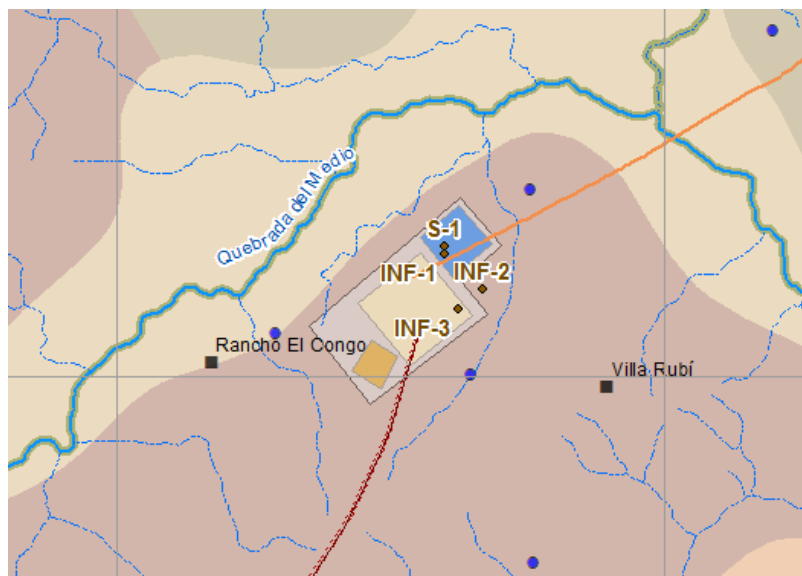
**Fuente:** Los Autores

**Fotografía 1:** Toma de muestra de suelo.

### 2.1.2 Desarrollo de Pruebas de Infiltración

Las pruebas de infiltración fueron realizadas con el objeto de determinar las variables físicas e hidráulicas que permitieran tomar decisiones frente a la posibilidad de adelantar el vertimiento de aguas residuales generadas por el desarrollo de las actividades de perforación del pozo, estas buscan determinar la capacidad de percolación de flujo de infiltración (para este caso infiltración efectiva) y velocidad de infiltración, con el objetivo de determinar áreas requeridas para la disposición de residuos líquidos sobre diferentes áreas de características específicas.

Para el desarrollo del presente estudio, se realizaron tres (3) pruebas de infiltración en diferentes áreas de la plataforma y campo de aspersión, en la **Figura 2** se presenta su localización general frente al proyecto.



**Fuente:** Los Autores

**Figura 2:** Localización general de las pruebas de infiltración.

### 2.1.2.1 Metodología de Infiltrómetro de Doble Anillo

Se empleó el método de infiltrómetro de doble anillo para determinar la velocidad básica de infiltración vertical del suelo receptor. Para su determinación, los dos anillos (exterior e interior), se introdujeron en el suelo a una profundidad de 5 a 10cm, hasta lograr que estuvieran perfectamente enterrados y nivelados, se procedió a llenarlos con agua al mismo nivel. El método consiste en tomar lecturas del descenso del nivel del agua en el anillo interno, es importante recalcar que el nivel del anillo exterior se mantuvo igual que el interior (**Fotografía 2**).



*Fuente: Los Autores*

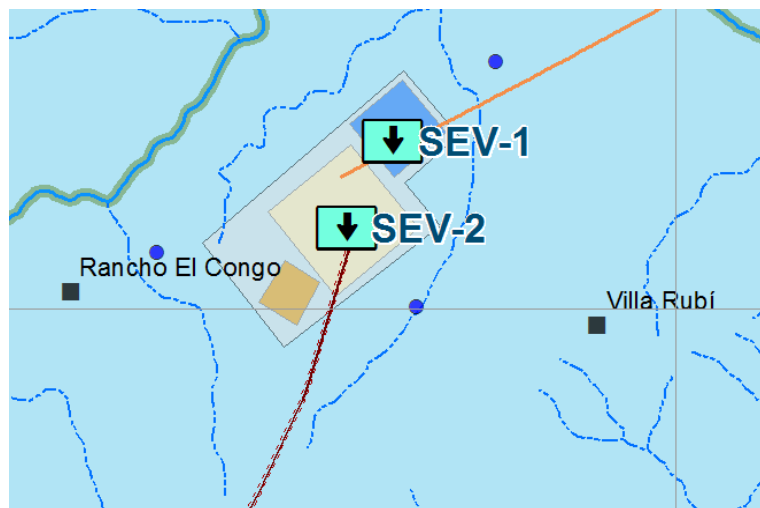
**Fotografía 2:** Prueba de infiltración realizada mediante el método de doble anillo.

### 2.1.3 Sondeos Eléctricos Verticales y su Interpretación

Se realizaron dos (2) sondeos eléctricos verticales (S.E.V.) en el área de la plataforma (**Figura 3**) para conocer la litología del subsuelo. En la prospección geoelectrica, se utilizó un equipo de resistividad, Geosystem RC7, consistente en un amperímetro y un voltímetro digitales, con una unidad generadora de fuerza electromotriz, que introduce la corriente en el subsuelo. Permitiendo obtener la intensidad de la corriente (I), en miliamperios y la diferencia de potencial (V), en

milivoltios. Las relaciones  $\Delta V/I$  multiplicadas por factores geométricos exclusivos para cada arreglo, producen las resistividades aparentes, que son ploteadas en papel bilogarítmico en función de  $AB/2$  (semidistancia electródica de corriente).

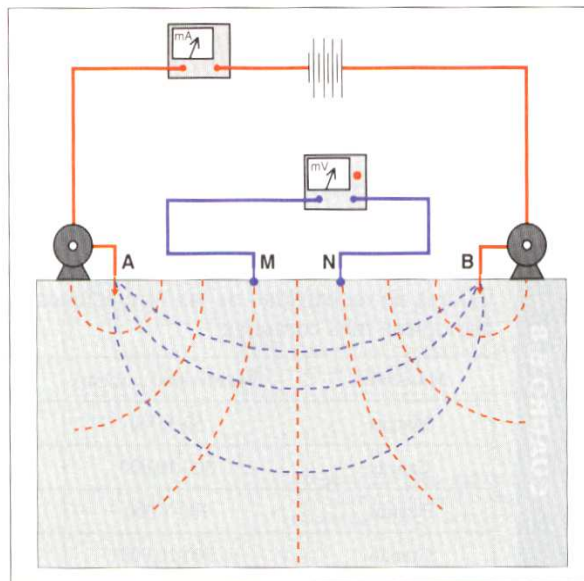
El dispositivo utilizado fue el Schlumberger, con variación de electrodos de potencial desde 0.5 hasta 50 metros (o sea  $MN/2$  semidistancia electródica de potencial). La distancia  $AB/2$ , varió desde 1.5 hasta 150 metros. En la **Figura 4** se presenta la representación del arreglo de Schlumberger.



Fuente: Los Autores

**Figura 3:** Localización general de los Sondeos Eléctricos Verticales.

El cálculo de la determinación de las profundidades reales se realizó mediante el programa RESIXP versión 6.1, creando archivos con los datos de campo e interpretando las curvas de resistividades aparentes, obteniendo de esta forma modelos de capas geoelectricas para cada sondeo.



Fuente: González en Ingeniería Geológica (2002)  
**Figura 4:** Arreglo de Schlumberger.

## 2.2 FASE II: SELECCIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN

### 2.2.1 Modelación del Vertimiento de Aguas Residuales Domesticas

Para la modelación del vertimiento de las aguas residuales domésticas generadas por el proyecto de perforación y explotación de hidrocarburos se utilizó el modelo HYDRUS-3D (Simunek et al. 1998), que simula la dinámica de flujos unidimensionales solucionando la ecuación de Richards (1931) para flujo en medios porosos con contenido de humedad variable, el objetivo de esta metodología fue simular los efectos del vertimiento en el suelo receptor.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ K \left( \frac{\partial h}{\partial x} + \cos \alpha \right) \right] - S$$

**Ecuación Richards (1931)**

Dónde:

$h$  es la cabeza de presión [L],

$\theta$  es el contenido de humedad volumétrico [L<sup>3</sup>L<sup>-3</sup>],

$t$  es el tiempo [T],

$x$  es la coordenada espacial [L] (positiva hacia arriba),

$S$  es el término sink [L<sup>3</sup>L<sup>-3</sup>T<sup>-1</sup>],

$\alpha$  es el ángulo entre la dirección de flujo y el eje vertical (p.e,  $\alpha = 0$  para flujo vertical,  $90$  para flujo horizontal, y  $00 < \alpha < 90$  para flujo inclinado), y

$K$  es función de la conductividad hidráulica insaturada.

El modelo HYDRUS 3D, fue utilizado para encontrar el tiempo de viaje de un posible contaminante a través de la zona no saturada hasta el nivel freático. Algunos supuestos al momento de la simulación fueron: el flujo es solamente advectivo, vertical y el contaminante viaja mezclado con el agua.

El tiempo de viaje indica qué tanto puede residir el contaminante en el suelo, sufrir fenómenos que conlleven a su decaimiento, transformación y/o desaparición. Para medir el tiempo de viaje, se simuló un evento de infiltración con el modelo HYDRUS 3D<sup>1</sup>, a través de la columna de suelo por un período de cinco años, para lo cual se contó con una serie climatológica de la zona de estudio, que permitió tener una condición variable para la superficie.

La simulación se hace de manera puntual para una columna de suelo, de la cual se conocen las siguientes características por estrato: espesor, material, profundidad de raíces y parámetros de la ecuación de Richards (1931). Estos últimos se obtuvieron a partir de los valores teóricos consignados en la base de

---

<sup>1</sup> Hydrus 3D es un software libre, el cual se encuentra disponible en: <http://www.pc-progress.com/en/Default.aspx?h3d-downloads>

datos del modelo, de acuerdo con el material del estrato. Una vez introducidos los parámetros edáficos y las variables climatológicas del área de estudio, se procedió a la ejecución del modelo, el cual permitió al trazador (sustancia contaminante) recorrer la Zona No Saturada.

Las condiciones de contorno para el flujo de agua permiten entradas (precipitación) y salidas (evaporación) en la superficie, mientras que, en profundidad (a 1,0 m) existe drenaje libre hacia capas más profundas. En relación al transporte de solutos, las condiciones de contorno del límite inferior permiten la lixiviación de soluto mientras que, en el límite superior, se admiten entradas de acuerdo a los vertimientos de aguas residuales domésticas a realizar.

### **2.2.2 Modelación del Vertimiento de Aguas Industriales**

Para desarrollar la modelación del vertimiento de aguas industriales se empleó la herramienta BIOPLUME II<sup>2</sup>, el cual es un modelo numérico de dos dimensiones (2D) que sigue el destino y transporte de hidrocarburos aromáticos en suelos. En este modelo se introdujeron los mapas en 2D de contorno de los parámetros hidrológicos, tales como la carga hidráulica y la conductividad hidráulica utilizando una herramienta de digitalización. El modelo calculó la concentración de contornos a intervalos de tiempo especificados.

Se realizó la modelación para determinar cuál era la tendencia de la pluma del vertimiento con contenido de hidrocarburos, esta modelación se realizó por un periodo de 5 años, partiendo desde el primero (1) de Abril de 2014, hasta el primero (1) de Abril de 2019, determinando su permanencia o recorrido del vertimiento desarrollado en la zona estudiada. En la **Figura 5** pueden observarse los rangos de tiempo introducidos al modelo.

---

<sup>2</sup> Bioplume II es un software libre desarrollado por el Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, el cual se encuentra disponible en <http://www.epa.gov/ada/csmos/models/bioplume2.html>

The 'Time Domain' dialog box is titled 'Time Domain' and has a close button (X) in the top right corner. It is divided into three main sections:

- Time (years):** A sub-section containing 'Maximum Time' with a text input field containing the value '5'.
- Ruler Tic Increments:** A sub-section containing 'Major' with a text input field containing '10' and 'Minor' with a text input field containing '2'.
- Start Date:** A sub-section containing three text input fields: 'Day' with '1', 'Month' with '4', and 'Year' with '2014'.

At the bottom right of the dialog box, there are two buttons: 'Ok' and 'Cancel'.

Fuente: Los Autores

Figura 5: Tiempo de modelación

Se introdujo una concentración de 249 mg/L (valor típico de concentración de hidrocarburos en la industria). En la **Figura 6** puede observarse dicho valor como fuente inicial. Por otro lado, para efectos de modelación, en el flujo del agua subterránea debe ser entendido que la dirección de flujo y la ubicación de cabezas de presión corresponden y obedecen a las tendencias dadas por la topografía y por las condiciones hidrológicas de la zona.

The 'Concentration Domain' dialog box is titled 'Concentration Domain' and has a close button (X) in the top right corner. It is divided into three main sections:

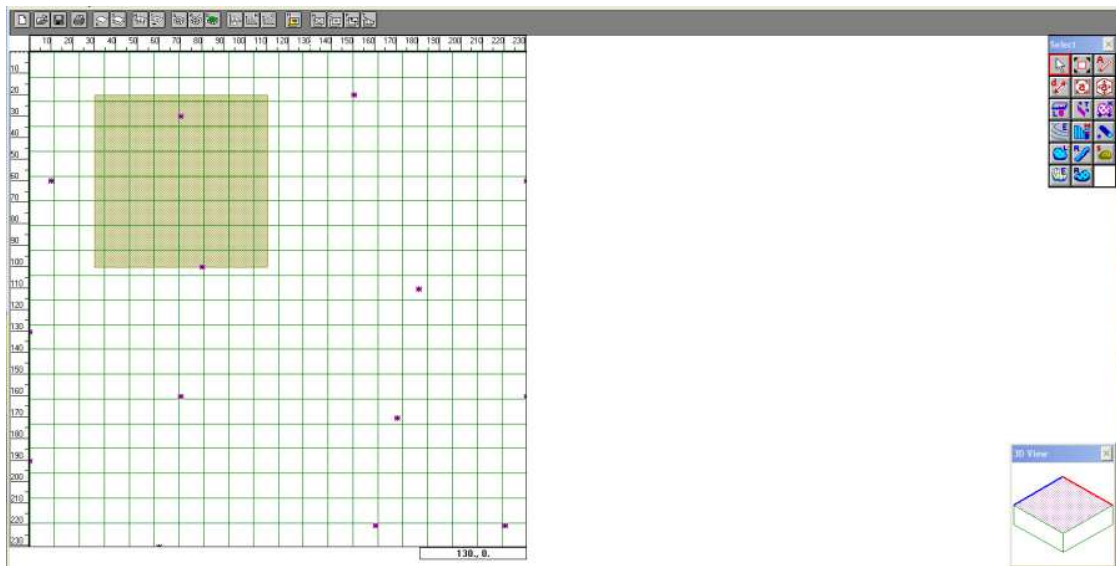
- Concentration (mg/L or µg/L):** A sub-section containing four text input fields: 'Default' with '249', 'Minimum' with '0', 'Maximum' with '249', and 'Cursor Increments' with '2'.
- Ruler Tic Increments:** A sub-section containing 'Major' with a text input field containing '10' and 'Minor' with a text input field containing '2'.

At the bottom of the dialog box, there are two buttons: 'Ok' and 'Cancel'.

Fuente: Los Autores

Figura 6: Valores de concentración.

Se proyectó un área sobre el modelo de 417m<sup>2</sup> para el campo de aspersión y/o campo de infiltración y un área de observación de 4900 m<sup>2</sup>, con un vertimiento constante compuesto básicamente por una concentración de 249mg/L de hidrocarburos totales (**Figura 7**).



*Fuente: Los Autores*

**Figura 7:** Área dispuesta para efectos de vertimiento según modelo

## 2.3 FASE III: PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

### 2.3.1 Calculo de la Conductividad Hidráulica

La conductividad hidráulica fue calculada aplicando la ley de Darcy (Timbe, 1999), la cual fue determinada mediante la siguiente ecuación:

$$Ks = 1.15 * r * s$$

Dónde:

Ks = Conductividad hidráulica saturada (cm/h).

r = Radio del agujero (cm).

s = Pendiente de la curva  $\text{Log}(h_t+r/2)$  vs T.

h = Altura de la columna de agua dentro del pozo o anillo (cm).

### 2.3.2 Determinación de la Carga Hidráulica

La carga hidráulica anual para el presente estudio fue calculada en función de la permeabilidad o conductividad vertical efectiva de la columna de suelo receptor (velocidad de infiltración), multiplicada por un factor de aplicación que depende del sistema empleado para las mediciones de campo, las características del agua residual a aplicar y el número de días al año en que funcionará el sistema (Metcalf y Eddy, 1998). De acuerdo a esto se empleó la siguiente ecuación:

$$Lw = (IR) \cdot (OD) \cdot (F) \cdot (24 \text{ h/d})$$

IR = velocidad de infiltración, mm/h.

OD = número de días en funcionamiento al año, d/año.

F = factor de aplicación.

Lw = carga hidráulica anual.

### 2.3.3 Calculo de la Superficie de Infiltración

El área de infiltración fue calculada considerando un periodo de operación de un año (52 semanas aproximadamente) mediante la siguiente fórmula (EPA, 1984):

$$A = \frac{(0,0365 \cdot Q)}{Lw}$$

Q = Caudal diario en  $\text{m}^3/\text{día}$ .

Lw = Carga hidráulica anual de diseño en  $\text{m}/\text{año}$ .

### 2.3.4 Diseño Hidráulico del Campo de Aspersión

A continuación se relacionan las formulas empleadas para el diseño hidráulico del campo de aspersión:

#### 2.3.4.1 Superficie por modulo

$$S_{mod} = \frac{Sup}{No\ mod}$$

Dónde:

Sup = Superficie total expresada en m<sup>2</sup>.

Nº mod = Numero de módulos proyectados.

#### 2.3.4.2 Superficie de riego mínima para la disposición

$$S = \frac{V}{V_{inf} \times 0.5} \times tr$$

Dónde:

S = Superficie expresada en m<sup>2</sup>.

V = Volumen de efluente a aplicar en una hora, expresado en m<sup>3</sup>.

V<sub>inf</sub> = Velocidad de infiltración en m/hora.

tr = Duración del vertimiento en horas.

0.5 = Factor de seguridad.

#### 2.3.4.3 Lamina bruta a disponer

$$LB = \frac{Vt}{Sup}$$

Dónde:

Vt = Volumen total de agua a disponer en las 24 horas de disposición; en m<sup>3</sup>.

Sup = Superficie total donde se hará la disposición; en m<sup>2</sup>.

#### 2.3.4.4 Caudal del aspersor a seleccionar

$$Q_{asp} = \frac{Vol}{No\ Asp}$$

Dónde:

Qasp = Caudal de cada aspersor; en L/h.

Vol = Volumen total a disponer en el campo durante una hora; en L.

Nºasp = Número de aspersores.

#### 2.3.4.5 Diseño hidráulico de la tubería

Se recomienda utilizar para la tubería principal una dimensión de 2" de diámetro:

$$D = \frac{1.626 \times L^{0.205} \times Q^{0.38}}{C_{HW}^{0.38} + Hf^{0.205}}$$

Dónde:

L = Longitud de la tubería de conducción.

Hf = Cabeza topográfica a favor del flujo.

C<sub>HW</sub> = Coeficiente de rugosidad 150 (para tubería en PVC).

Q = Caudal en m<sup>3</sup>/s.

#### 2.3.4.6 Pérdidas por fricción

$$Hf = 1.22 \times 10^{12} \times \frac{\left(\frac{Q}{C}\right)^{1.852}}{D^{4.87}} \times \frac{L}{100}$$

Dónde:

Q = Caudal a disponer: en L/s.

C = Coeficiente de la tubería; PVC 150.

D = Diámetro interno de la tubería; en mm.

L = Longitud de la tubería; en m.

HF = Pérdidas; en m.

#### **2.3.4.7 Requerimientos de potencia de la bomba**

$$HP_B = \frac{Q_s \cdot H_T}{76 \cdot E_B}$$

Dónde:

HP<sub>B</sub> = Potencia requerida por la bomba (Caballos de Fuerza, HP).

Q<sub>s</sub> = Es el caudal del sistema o en la subunidad de riego (lps).

H<sub>T</sub> = Carga total del sistema (m).

E<sub>B</sub> = Eficiencia de la bomba (0.75).

#### **2.3.5 Red de Monitoreo de Aguas Subterráneas**

Los resultados de los sondeos eléctricos verticales realizados en el área de la plataforma en estudio permitieron conocer la litología del subsuelo del área destinada para el campo de aspersión, de acuerdo a esto se definieron las especificaciones técnicas y constructivas de los piezómetros.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 CARACTERÍSTICAS DEL SUELO

De acuerdo a los reportes de laboratorio, se encontró que el suelo receptor presenta una textura Arcillo Limosa, compuesta en un 46,5% de limo, seguido por arena con un 27,6% y arcilla en un 25,9% (**Tabla 1**). Respecto a las características físicas del suelo, se encontró una porosidad total del 35,25%, humedad aprovechable de 12,28%, densidad aparente de 1,58 gr/cm<sup>2</sup> y densidad real de 2,44 gr/cm<sup>2</sup> (**Anexo 1 Reportes de Laboratorio**).

**Tabla 1:** Resultados laboratorio de suelos

VARIABLE UNIDAD DE SUELO	MUESTRA DE SUELO 1
<b>TIPO DE SUELO SEGÚN PORCENTAJES DE COMPOSICIÓN DE LOS MISMOS</b>	
Arena	27,6 %
Arcilla	25,9 %
Limo	46,5 %
Textura	ARCILLO LIMOSO
<b>RESULTADOS DE INFILTRACIÓN</b>	
<b>DATOS DE POROSIDAD</b>	
Densidad Aparente gr/cm <sup>2</sup>	1,58
Densidad Real gr/cm <sup>2</sup>	2,44
Humedad aprovechable %	12,28
Porosidad Total %	35,25
<b>HUMEDADES A DIFERENTES TENSIONES</b>	
(-)33 kPa	32,44
(-)1500 kPa	20,16

**Fuente:** Laboratorio nacional de suelos – IGAC

De acuerdo a los resultados de los sondeos eléctricos verticales realizados en el área de influencia del proyecto, se encontró que en los primeros 0.6 a 0.7 metros de profundidad se encuentra una primera capa de suelo con textura arcillo limosa, entre los 0.7 a 11.5 m de profundidad se registran capas de arcillolitas y arcillolitas limosas las cuales reportaron resistividad entre 1.3 a 6 Ohm-m; y a profundidades

mayores a los 11.5 m se registraron areniscas saturadas con agua e interacciones de arcillolitas.

Gracias a los resultados obtenidos en los sondeos eléctricos verticales se pudieron identificar las estructuras litológicas del suelo receptor. En la **Tabla 2** y **Tabla 3** se presenta los resultados de los sondeos eléctricos verticales y en la **Figura 8** se presenta el perfil litológico del suelo receptor.

**Tabla 2:** Resultado del sondeo eléctrico vertical 1.

Capa	Profundidad	Resistividad	Interpretación Hidrogeológica
	(m)	(Ohm-m)	
1	0 – 0.6	31.5	Suelo arcillo - limoso.
2	0.6 – 1.2	1.3	Arcillolitas
3	1.2 – 1.8	20	Arcillolitas limosas
4	1.8 – 2.3	2	Arcillolitas
5	2.3 – 5.5	6	Arcillolitas limosas
6	5.5 – 11.5	2.3	Arcillolitas
7	11.5 - ?	8	Arcillolitas; capas muy delgadas de areniscas saturadas con agua

**Fuente:** Los Autores

**Tabla 3:** Resultado del sondeo eléctrico vertical 2.

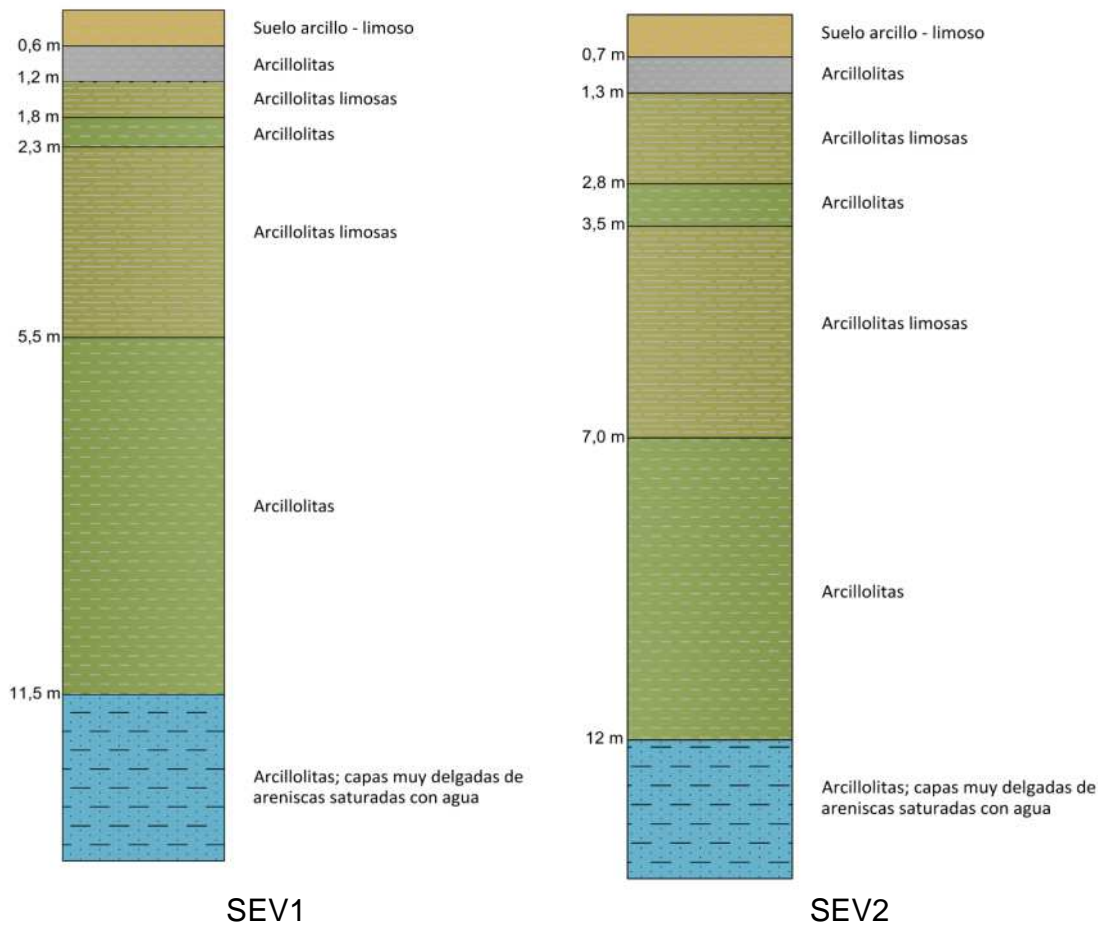
Capa	Profundidad	Resistividad	Interpretación Hidrogeológica
	(m)	(Ohm-m)	
1	0 – 0.7	17.2	Suelo arcillo - limoso.
2	0.7 – 1.3	8.6	Arcillolitas
3	1.3 – 2.8	7	Arcillolitas limosas
4	2.8 – 3.5	3.7	Arcillolitas
5	3.5 – 7	5.5	Arcillolitas limosas
6	7 – 12	2.1	Arcillolitas
7	12 - ?	7	Arcillolitas; capas muy delgadas de areniscas saturadas con agua

**Fuente:** Los Autores

### 3.2 PRUEBAS DE INFILTRACIÓN

#### 3.2.1 Punto 1:

En la **Tabla 4** se presentan los datos obtenidos de la prueba de infiltración del punto 1 (Tiempo i, tiempo f, altura i, altura f), los cuales son fundamentales para la obtención de la infiltración acumulada y la velocidad puntual, variables indispensables para el cálculo de la conductividad hidráulica en esta zona. Se encontró una velocidad de infiltración promedio de 548,4 mm/h.



*Fuente: Los Autores*

**Figura 8:** Perfil litológico del suelo receptor.

**Tabla 4:** Resultados de las mediciones de la prueba de Infiltración realizada en el punto 1

TIEMPO (i) (min)	TIEMPO (f) (min)	ALTURA (i) (cm)	ALTURA (f) (cm)	DIFERENCIAL t (min)	DIFERENCIA A (cm)	INFILTRACIÓN ACUMULADA (cm)	VELOCIDAD PUNTUAL (mm/h)
0	5	25	7,5	5	17,5	17,5	2100
5	10	7,5	2,5	5	5	22,5	600
10	15	28	13,3	5	14,7	37,2	1764
15	20	13,3	0	5	13,3	50,5	1596
20	25	14	7,5	5	6,5	57	780
25	30	7,5	3,04	5	4,46	61,46	535,2
30	35	3,4	2,7	5	0,7	62,16	84
35	40	2,7	1,8	5	0,9	63,06	108
40	45	1,8	0	5	1,8	64,86	216
45	50	14,5	12,3	5	2,2	67,06	264
50	55	12,3	10	5	2,3	69,36	276
55	60	10	7,5	5	2,5	71,86	300
60	65	7,5	5,8	5	1,7	73,56	204
65	70	5,8	4,8	5	1	74,56	120
70	75	4,8	4	5	0,8	75,36	96
75	80	4	2,8	5	1,2	76,56	144
80	85	2,8	1,9	5	0,9	77,46	108
85	90	1,9	0	5	1,9	79,36	228
90	95	28	6	5	22	101,36	2640
95	100	6	0	5	6	107,36	720
100	105	20,8	17,5	5	3,3	110,66	396
105	110	17,5	14,5	5	3	113,66	360
110	115	14,5	13	5	1,5	115,16	180
115	120	13	11,4	5	1,6	116,76	192
120	125	11,4	10,3	5	1,1	117,86	132
125	130	10,3	9,5	5	0,8	118,66	96
130	135	9,5	8,5	5	1	119,66	120
135	140	8,5	8	5	0,5	120,16	60
140	145	8	7,4	5	0,6	120,76	72
145	150	7,4	6,5	5	0,9	121,66	108
150	155	6,5	6	5	0,5	122,16	60
155	160	6	5,8	5	0,2	122,36	24
160	165	5,8	2,1	5	3,7	126,06	444
<b>PROMEDIO DE VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN (mm/h)</b>							458,4
<b>PROMEDIO DE VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN (m/s)</b>							0,00012733

*Fuente:* Los Autores

### 3.2.2 Punto 2:

La prueba de infiltración realizada en el punto 2 establece que durante un periodo de 2 horas la diferencia de altura obtenida en los anillos oscila en un rango de 14 a

2,2 cm, alcanzando una velocidad de infiltración promedio de 338,08 mm/h (Tabla 5).

**Tabla 5:** Resultados de las mediciones de la prueba de Infiltración realizada en el punto 2.

TIEMPO (i) (min)	TIEMPO (f) (min)	ALTURA (i) (cm)	ALTURA (f) (cm)	DIFERENCIAL t (min)	DIFERENCIA A (cm)	INFILTRACIÓN ACUMULADA (cm)	VELOCIDAD PUNTUAL (mm/h)
0	5	26	14	5	12	12	1440
5	10	14	10,3	5	3,7	15,7	444
10	15	10,3	0	5	10,3	26	1236
15	20	26	5	5	21	47	2520
20	25	5	0	5	5	52	600
25	30	15	13,2	5	1,8	53,8	216
30	35	13,2	12,2	5	1	54,8	120
35	40	12,2	10	5	2,2	57	264
40	45	10	9,6	5	0,4	57,4	48
45	50	9,6	8,8	5	0,8	58,2	96
50	55	8,8	8,2	5	0,6	58,8	72
55	60	8,2	7,4	5	0,8	59,6	96
60	65	7,4	6,9	5	0,5	60,1	60
65	70	6,9	6,4	5	0,5	60,6	60
70	75	6,4	6	5	0,4	61	48
75	80	6	5,6	5	0,4	61,4	48
80	85	5,6	5,3	5	0,3	61,7	36
85	90	5,3	5	5	0,3	62	36
90	95	5	4,5	5	0,5	62,5	60
95	100	4,5	4,2	5	0,3	62,8	36
100	105	4,2	3,9	5	0,3	63,1	36
105	110	3,9	3,6	5	0,3	63,4	36
110	115	3,6	2,2	5	1,4	64,8	168
<b>PROMEDIO DE VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN (mm/h)</b>							338,086957
<b>PROMEDIO DE VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN (m/s)</b>							9,3913E-05

**Fuente:** Los Autores

### 3.2.3 Punto 3

La prueba de infiltración realizada en el punto 3 establece que durante un periodo de 2 horas la diferencia de altura obtenida en los anillos oscila en un rango de 19,2 a 3,8 cm, alcanzando una velocidad de infiltración promedio de 213,23 mm/h (Tabla 6).

**Tabla 6:** Resultados de las mediciones de la prueba de Infiltración realizada en el punto 3.

TIEMPO (i) (min)	TIEMPO (f) (min)	ALTURA (i) (cm)	ALTURA (f) (cm)	DIFERENCIAL t (min)	DIFERENCIA A (cm)	INFILTRACIÓN ACUMULADA (cm)	VELOCIDAD PUNTUAL (mm/h)
0	5	28	19,2	5	8,8	8,8	1056
5	10	19,2	16	5	3,2	12	384
10	15	16	13,9	5	2,1	14,1	252
15	20	13,9	11,5	5	2,4	16,5	288
20	25	11,5	10,3	5	1,2	17,7	144
25	30	10,3	8,6	5	1,7	19,4	204
30	35	8,6	6,4	5	2,2	21,6	264
35	40	6,4	4,9	5	1,5	23,1	180
40	45	4,9	3,6	5	1,3	24,4	156
45	50	3,6	2,5	5	1,1	25,5	132
50	55	2,5	1	5	1,5	27	180
55	60	1	0	5	1	28	120
60	65	22	17,7	5	4,3	32,3	516
65	70	17,7	15,3	5	2,4	34,7	288
70	75	15,3	14	5	1,3	36	156
75	80	14	13	5	1	37	120
80	85	13	12	5	1	38	120
85	90	12	11	5	1	39	120
90	95	11	10	5	1	40	120
95	100	10	9	5	1	41	120
100	105	9	8	5	1	42	120
105	110	8	7,3	5	0,7	42,7	84
110	115	7,3	6,6	5	0,7	43,4	84
115	120	6,6	5,8	5	0,8	44,2	96
120	125	5,8	5	5	0,8	45	96
125	130	5	3,8	5	1,2	46,2	144
<b>PROMEDIO DE VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN (mm/h)</b>							213,230769
<b>PROMEDIO DE VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN (m/s)</b>							5,9231E-05

**Fuente:** Los Autores

De acuerdo con los resultados obtenidos en cada una de las tres pruebas de infiltración, y como se pudo observar anteriormente, las velocidades varían de un punto a otro, encontrándose valores que van desde los 458,4mm/h, 338,08mm/h y 213mm/h, respectivamente en los puntos de infiltración 1, 2 y 3. Esta diferencia tan marcada encontrada en una misma área, puede deberse a la variación de la cota de altura entre los tres puntos, lo que a su vez delimita la saturación de agua y la altura del nivel freático en cada punto.

### 3.2.4 Calculo de la Conductividad Hidráulica

La conductividad hidráulica se calculó de acuerdo a los resultados obtenidos en campo, para tal fin se realizó un balance de masas y combinando la ecuación de Darcy, la conductividad hidráulica fue determinada con la siguiente fórmula:

$$K_s = 1.15 * r * s$$

$K_s$  = Conductividad hidráulica horizontal o saturada (cm/h).

$r$  = Radio del agujero (cm).

$s$  = Pendiente de la curva =  $\log(h_t + r/2)$  Vs.  $T$ .

$h$  = Altura de la columna de agua dentro del pozo.

Se encontró que el punto 2 presenta una conductividad hidráulica baja con un valor de 2.90 cm/h, lo que significa que este punto es donde el medio deja pasar el agua más lentamente a través del suelo, en comparación con los otros dos punto, es decir el 1 y el 3, que presentan valores de 3,56 y 3,0cm/h respectivamente (**Tabla 7**).

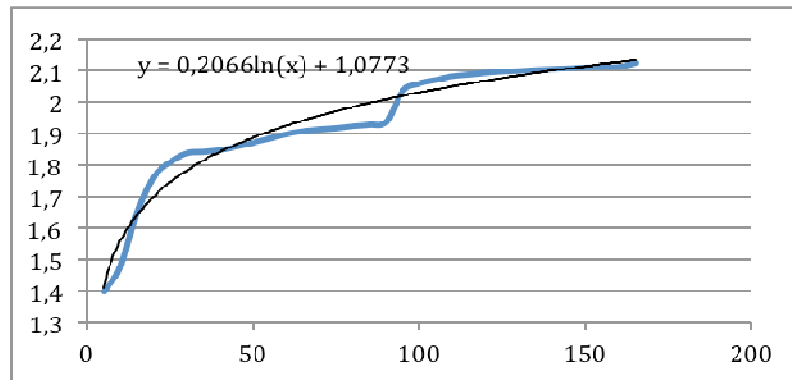
**Tabla 7:** Calculo de la conductividad hidráulica saturada.

Punto Muestreado	Radio del agujero (cm)	Pendiente de la curva $\log(h_t + r/2)$ Vs. $T$	Conductividad hidráulica saturada (cm/h)
1	15	0,2066	3,56
2	15	0,1685	2,90
3	15	0,1743	3,00

**Fuente:** Los Autores

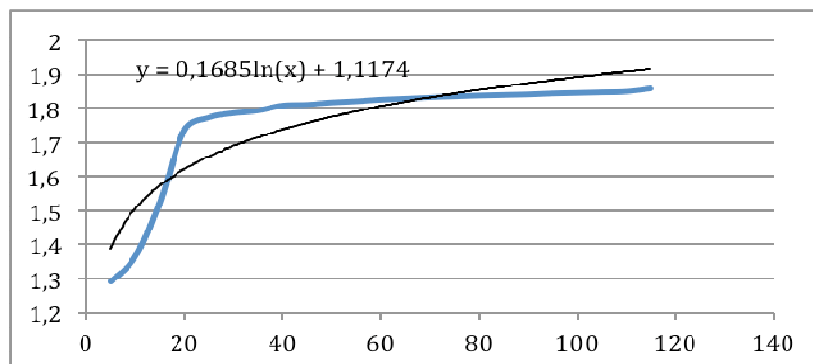
En la **Figura 9** a la **Figura 11** se puede observar la obtención del valor de la pendiente de la curva  $\log(h_t + r/2)$  vs  $T$ , para cada uno de los puntos muestreados. El eje Y corresponde al logaritmo de la infiltración acumulada por el radio del cilindro empleado en la prueba de infiltración, dividido en dos (2); y en el eje X la variación en tiempo, esto con el fin de obtener la pendiente de la curva, para poder calcular la conductividad hidráulica en cada punto. Para el punto 1 se encontró

una pendiente de la curva de 0,2066, mientras que en los puntos 2 y 3 adquirieron valores de 0,1685 y 0,1743 respectivamente.



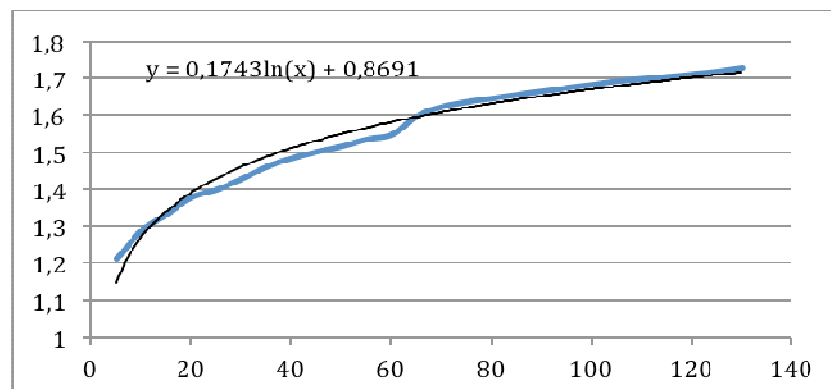
**Fuente:** Los Autores

**Figura 9:**  $\text{Log}(h_t+r/2)$  vs  $T$ , prueba de infiltración 1



**Fuente:** Los Autores

**Figura 10:**  $\text{Log}(h_t+r/2)$  vs  $T$ , prueba de infiltración 2



**Fuente:** Los Autores

**Figura 11:**  $\text{Log}(h_t+r/2)$  vs  $T$ , prueba de infiltración 3

### 3.2.5 Carga Hidráulica y Superficie de Infiltración

La carga hidráulica anual del proyecto se suele determinar en función de la permeabilidad o conductividad vertical efectiva de la columna de suelo situada por encima del agua subterránea o del estrato rocoso subyacente. Esta es basada en la permeabilidad del terreno, y se obtiene multiplicando la velocidad de infiltración a largo plazo, determinada in situ por un factor de aplicación que depende del sistema empleado para las mediciones de campo, de las características del agua residual a aplicar y del número de días al año en que funciona el sistema. (Metcalf y Eddy, 1998).

$$L_w = (IR) \cdot (OD) \cdot (F) \cdot (24 \text{ h/d}).$$

IR = velocidad de infiltración, mm/h.

OD = número de días en funcionamiento al año, d/año.

F = factor de aplicación.

L<sub>w</sub> = carga hidráulica anual.

En la **Tabla 8** se presentan los valores del factor de aplicación recomendados para el diseño para los diferentes métodos de ensayo y medición in situ (Metcalf y Eddy, 1998).

**Tabla 8:** Valores recomendados para el factor de aplicación

Ensayo de infiltración en balsas.	10 – 15% de la velocidad de infiltración mínima media medida.
Permeámetro con entradas de aire e infiltrómetro de cilindro.	2 – 4% de la velocidad de infiltración mínima media
Conductividad hidráulica vertical.	4 – 10% de la conductividad del estrato más restrictivo del suelo.

Fuente: Metcalf y Eddy, 1998

El cálculo de la superficie de infiltración se calculó para un periodo de operación de un (1) año (52 semanas), de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$A = \frac{(0,0365 \times Q)}{L_w}$$

Q = Corresponde al caudal de vertimiento, el cual es de 2 l/s.

Lw = Representa la carga hidráulica anual.

La carga hidráulica es el producto de la velocidad de infiltración (se usa el menor valor obtenido de la velocidad puntual), el número de funcionamiento al año y el factor de aplicación. Ya que la velocidad es el resultado del procesamiento de la información obtenida en campo, para cada prueba de infiltración esta varía de un punto a otro; y es usada para determinar el escenario menos favorable en términos de rendimiento de infiltración o velocidad de infiltración, de esta manera se determina cual información de los puntos evaluados es la más relevante desde este punto de vista, para ser modelada. En la **Tabla 9** a la **Tabla 14** se presenta la información calculada para cada prueba de infiltración. Para la prueba de infiltración en el punto 1 se encontró un área necesaria de infiltración de 417 m<sup>2</sup>, la más alta obtenida en campo, la cual es inversamente proporcional a la menor velocidad de infiltración obtenida.

**Tabla 9:** Determinación de la carga hidráulica punto de infiltración numero 1

DETERMINACIÓN DE LA CARGA HIDRÁULICA			
CARGA HIDRÁULICA ANUAL (Lw- mm/año)	VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN (Vp - mm/h)	NUMERO DE DÍAS DE FUNCIONAMIENTO AL AÑO (d/año)	FACTOR DE APLICACIÓN
151372,80	24,00	365,00	0,72

**Fuente:** Los Autores

**Tabla 10:** Calculo de la superficie de infiltración - punto de infiltración numero 1

CALCULO DE LA SUPERFICIE DE INFILTRACIÓN						
CAUDAL DE APLICACIÓN (m3/día)	CARGA HIDRÁULICA (m/año)	PERIODO DE OPERACIÓN (Semanas/año)	ÁREA NECESARIA (ha)	ÁREA NECESARIA (m2)	LONGITUD (m)	ANCHO (m)
172,80	151,37	52,00	0,0417	417,11	21,00	19,86

**Fuente:** Los Autores

El punto 2 corresponde al segundo con mayor área de infiltración necesaria según los resultados de velocidad y carga hidráulica calculados, presenta mejor infiltración respecto al punto 1, por lo cual los requerimientos de espacio disminuyen.

**Tabla 11:** Determinación de la carga hidráulica punto de infiltración numero 2

DETERMINACIÓN DE LA CARGA HIDRÁULICA			
CARGA HIDRÁULICA ANUAL (Lw- mm/año)	VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN (Vp - mm/h)	NUMERO DE DÍAS DE FUNCIONAMIENTO AL AÑO (d/año)	FACTOR DE APLICACIÓN
340588,80	36,00	365,00	1,08

**Fuente:** Los Autores,

**Tabla 12.** Calculo de la superficie de infiltración - punto de infiltración numero 2

CALCULO DE LA SUPERFICIE DE INFILTRACIÓN						
CAUDAL DE APLICACIÓN (m3/día)	CARGA HIDRÁULICA (m/año)	PERIODO DE OPERACIÓN (Semanas/año)	ÁREA NECESARIA (ha)	ÁREA NECESARIA (m2)	LONGITUD (m)	ANCHO (m)
172,80	340,59	52,00	0,0185	185,38	15,00	12,36

**Fuente:** Los Autores

El punto 3 corresponde al sector en el que se presenta mayor capacidad de percolación por parte del terreno, por lo que sus requerimientos de área son los menores obtenidos dentro del muestreo adelantado.

**Tabla 13.** Determinación de la carga hidráulica punto de infiltración numero 3

DETERMINACIÓN DE LA CARGA HIDRÁULICA			
CARGA HIDRÁULICA ANUAL (Lw- mm/año)	VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN (Vp - mm/h)	NUMERO DE DÍAS DE FUNCIONAMIENTO AL AÑO (d/año)	FACTOR DE APLICACIÓN
1854316,80	84,00	365,00	2,52

**Fuente:** Los Autores,

**Tabla 14.** Calculo de la superficie de infiltración - punto de infiltración numero 3

CALCULO DE LA SUPERFICIE DE INFILTRACIÓN						
CAUDAL DE APLICACIÓN (m3/día)	CARGA HIDRÁULICA (m/año)	PERIODO DE OPERACIÓN (Semanas/año)	ÁREA NECESARIA (ha)	ÁREA NECESARIA (m2)	LONGITUD (m)	ANCHO (m)
172,80	1854,32	52,00	0,0034	34,05	6,00	5,67

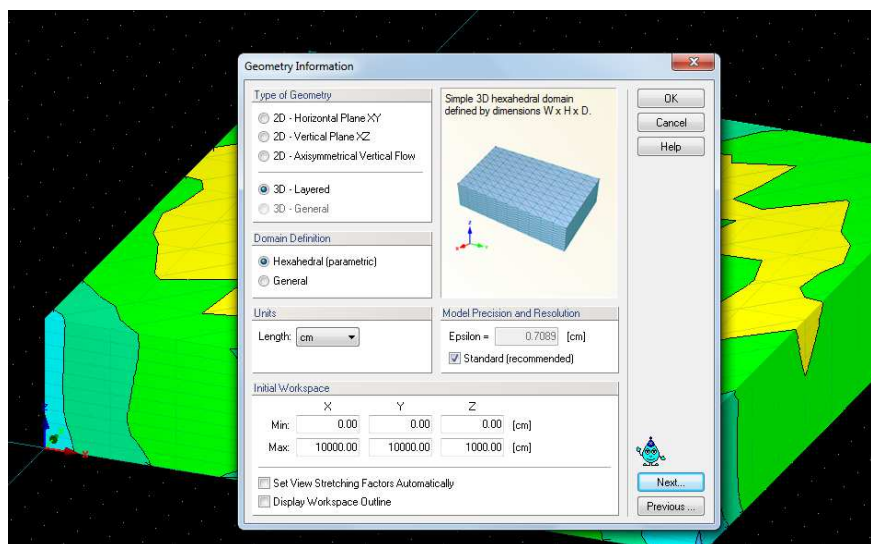
**Fuente:** Los Autores

Para efectos de modelación se tendrá en cuenta el peor escenario en términos de conductividad hidráulica y por ende mayor cantidad de área a disponer, es decir los datos obtenidos en la prueba de infiltración número 1.

### 3.3 MODELACIÓN DEL VERTIMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS.

#### 3.3.1 Datos de Entrada

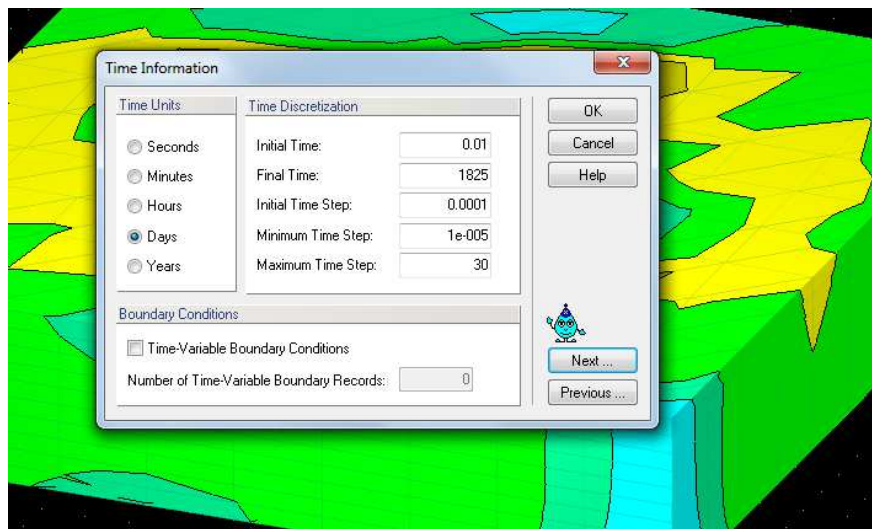
Con base en las pruebas de infiltración, análisis de conductividad y aplicación del caudal de vertimiento en suelo, el cual fue desarrollado en el numeral anterior, se introducen los datos respectivos del área, para el presente caso se tiene un área calculada máxima de  $417 \text{ m}^2$  (valor correspondiente al punto 1 de monitoreo, por sus características físicas y resultados de infiltración); sin embargo, con el fin de verificar el comportamiento del área aferente al vertimiento, se corre el modelo de simulación un área de  $10.000 \text{ m}^2 = 10.000 \text{ cm} \times 10.000 \text{ cm}$  (**Figura 12**).



**Fuente:** Los Autores

**Figura 12:** Configuración de hexaedro base

Se corrió el modelo buscando determinar el comportamiento del contaminante en el suelo receptor a un periodo de 5 años (1.825 días), aunque la actividad de perforación y pruebas de producción del pozo en estudio no tomarán más de diez (10) meses (**Figura 13**), esto con el fin de evaluar la capacidad de carga del suelo receptor.

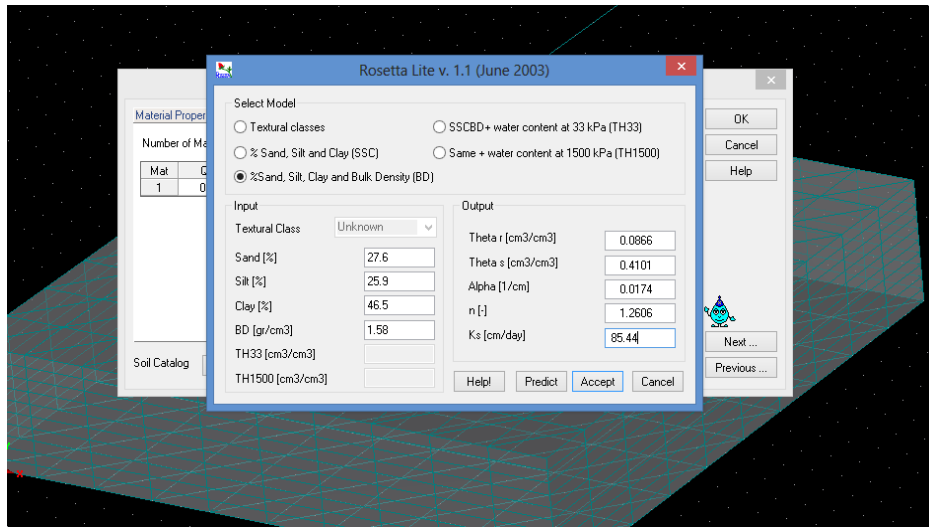


*Fuente: Los Autores*

**Figura 13:** Configuración de intervalo de tiempo de modelación

Se analizó la incorporación gráfica de cada año del total de cinco, a fin de ver el comportamiento año a año. Para efectos de modelación se planteó un máximo de 10 interacciones por cada cálculo relacionado dentro de las predicciones matemáticas adelantadas por el programa.

A continuación, se introdujo la información de las variables físicas del suelo receptor, de acuerdo a los resultados de laboratorio emitidos por el Instituto Geográfico Adustin Codazzi- ICAG (**Anexo 1 Reportes de laboratorio**). El cual arrojó el siguiente resultado: arena: 27,6 %, arcilla: 25,9% y limo: 46,5% (**Figura 14**).



**Fuente:** Los Autores

**Figura 14:** Configuración de características físicas del suelo – textura, densidad aparente

Alpha = Parámetro de Ajuste de la Curva Característica del Suelo.

n = Parámetro de Ajuste de la Curva Característica del Suelo.

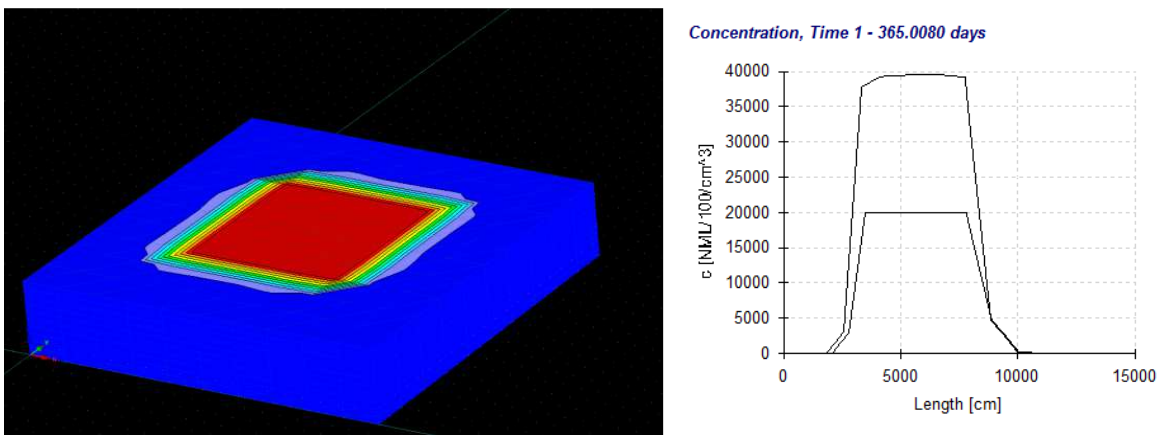
Ks = Conductividad Hidráulica Saturada.

Se introdujeron los datos de flujo constante (lo que para el modelo representa el caudal de vertimiento de 172,8m<sup>3</sup>/día de agua residual). Finalmente se llevó a cabo el desarrollo del respectivo análisis de predicción del comportamiento del agua residual vertida bajo la característica hidráulica y edáfica del suelo en evaluación.

Para efectos de modelación en condiciones críticas, se establece una carga de 20.000 NMP/100ml coliformes totales de acuerdo a lo establecido en el Artículo 38 del Decreto 1594 del 26 de junio de 1984, definido como el valor más alto de concentración permitido en un vertimiento.

### 3.3.2 Desarrollo de la Modelacion del Área de Aspersión para Aguas Residuales Domésticas

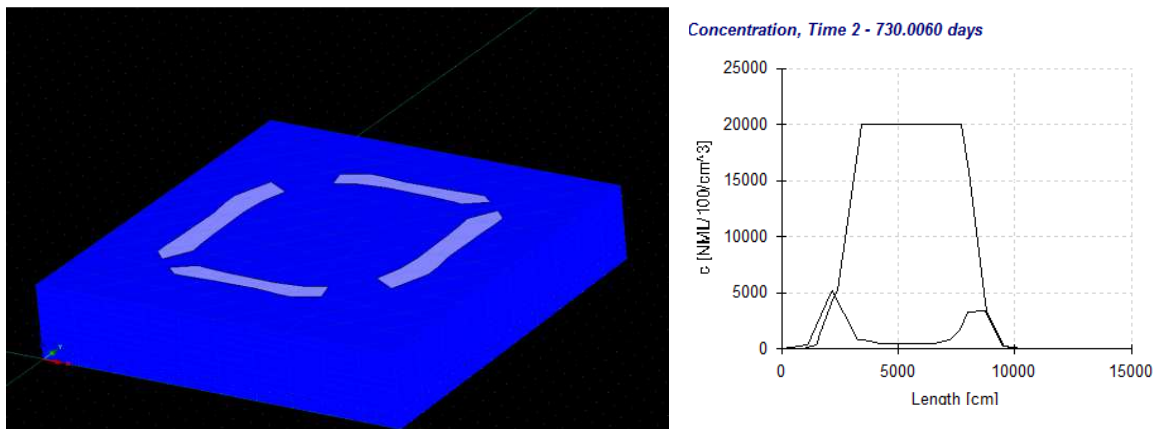
Como se puede observar en la **Figura 15** durante el primer año de vertimiento se presenta acumulación de contaminantes en el área de aspersión en valores cercanos a los 40.000 NML / 100cm<sup>3</sup>. Lo que indica una lenta percolación del contaminante y la asimilación del mismo sobre este tipo de suelos.



*Fuente: Los Autores*

**Figura 15:** Concentración del contaminante en el primer año.

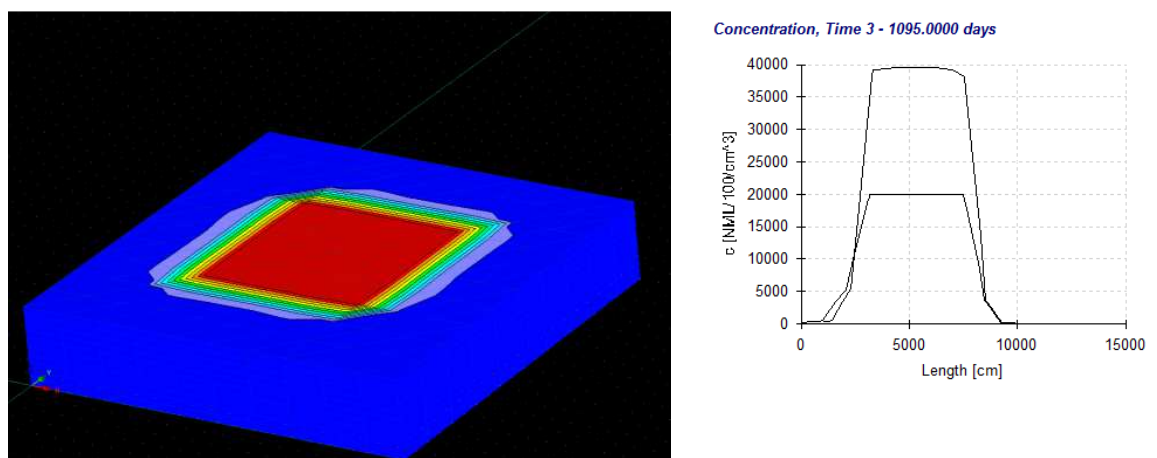
Para el segundo año de vertimiento se observan valores que no superan la concentración inicial del vertimiento (20.000NML/100cm<sup>3</sup>), además que no se extienden considerablemente sobre la horizontal de la superficie del área, lo que indica percolación hacia estratos más profundos del suelo (**Figura 16**).



*Fuente: Los Autores, 2014*

**Figura 16:** Concentración del contaminante en el segundo año.

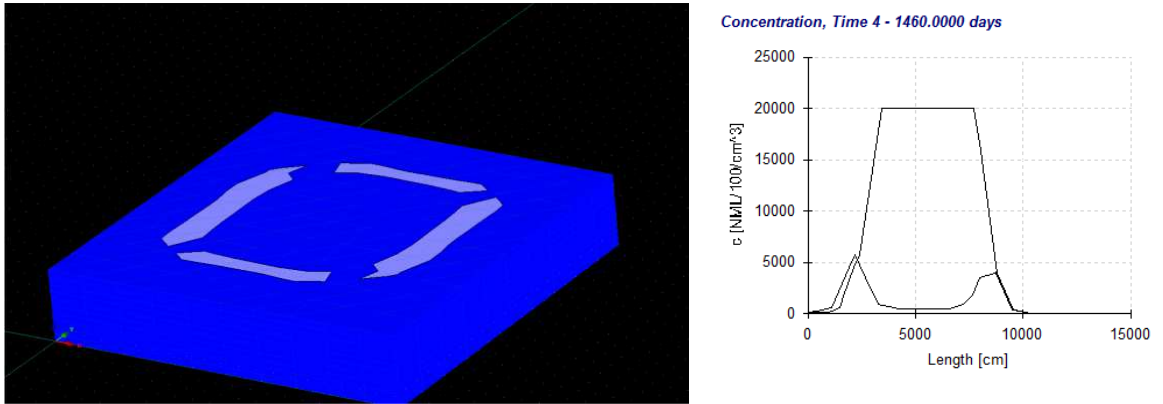
Para el tercer año de vertimiento se repite el comportamiento del primer año, mostrando nuevamente una acumulación de contaminantes en el área aspersion en valores cercanos a los 40.000 NML / 100cm<sup>3</sup> (**Figura 17**).



*Fuente: Los Autores, 2014*

**Figura 17:** Concentración del contaminante en el tercer año.

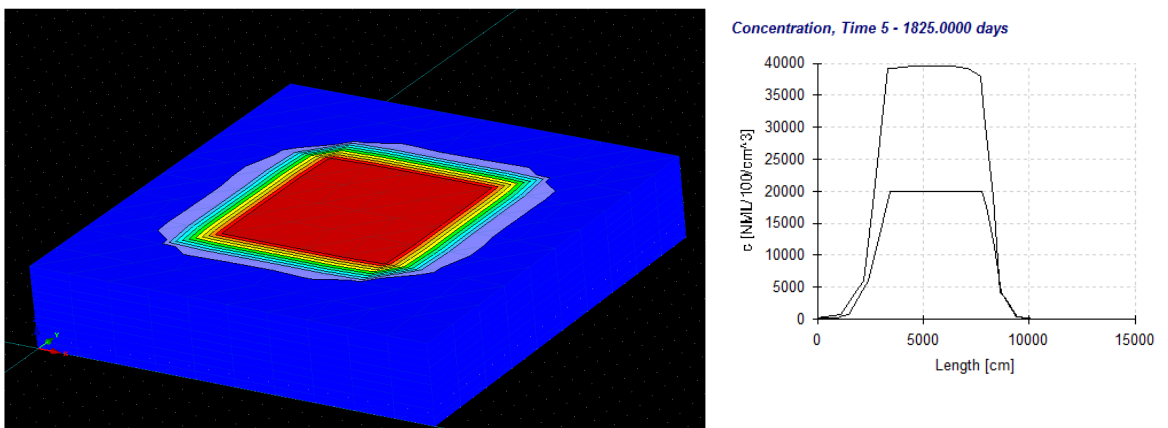
Para el cuarto año se observan valores que no superan la concentración inicial del vertimiento (20.000NML/100cm<sup>3</sup>), comportamiento similar al año dos, lo que genera una intermitencia en el comportamiento del contaminante en el modelo (**Figura 18**).



*Fuente: Los Autores, 2014*

**Figura 18:** Concentración del contaminante en el cuarto año.

Los años uno (1), tres (3) y cinco (5) de vertimiento presentan las mismas características de comportamiento respecto a las concentraciones del contaminante, mostrando nuevamente acumulación del mismo en el área aspersión en valores cercanos a los 40.000 NML / 100cm<sup>3</sup> (**Figura 19**).



*Fuente: Los Autores, 2014*

**Figura 19:** Concentración del contaminante en el quinto año.

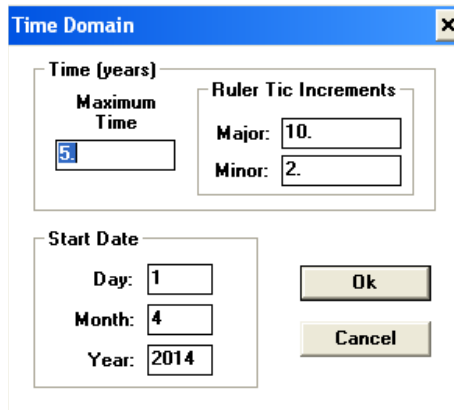
Se observa que las características de la concentración de solutos vertidos, se desplaza a lo largo y ancho del terreno dispuesto para tal fin, mostrando una tendencia de disminución hacia los estratos verticales y horizontales, a pesar de

eso, en los años 1, 3 y 5 se observa una acumulación de concentración (llegando a valores de 40.000 NML/100cm<sup>3</sup>) que se disuelve parcialmente en los años inmediatamente siguientes, es decir los años 2 y 4, luego de dicho periodo se puede observar una acumulación en la concentración en las áreas aferentes al vertimiento.

El comportamiento del modelo anteriormente descrito, se debe a que se tuvo en cuenta información hidroclimática de la zona de estudio, datos evaluados por el sistema de modelación, mostrando de esta manera el comportamiento de concentraciones residuales de contaminantes en este tipo de suelos en épocas de lluvia, si bien no se representa la saturación de agua en el suelo, si se puede observar la dilución del contaminante del agua vertida con el agua precipitada, y estas a su vez en contacto con el suelo.

### **3.4 DESARROLLO DE LA MODELACIÓN DEL CAMPO DE ASPERSIÓN PARA AGUAS INDUSTRIALES**

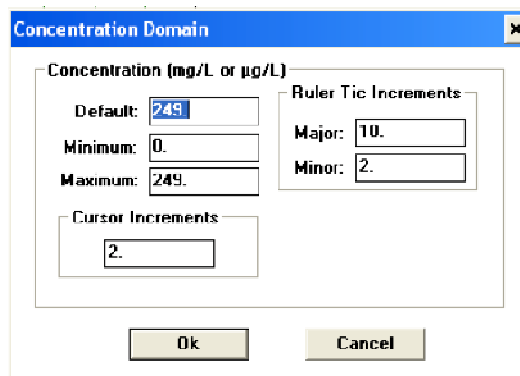
Se realizó la modelación para determinar cuál era la tendencia de la pluma del vertimiento con contenido de hidrocarburos, esta modelación se realizó para un periodo de 5 años partiendo desde el primero (1) de Abril de 2013 y llegando al primero (1) de Abril de 2019, determinando su permanencia o recorrido del vertimiento desarrollado en la zona estudiada. En la **Figura 20** pueden observarse los rangos de tiempo introducidos al modelo.



*Fuente: Los Autores*

**Figura 20:** Tiempo de modelación

Se introdujo una concentración de 249 mg/L (valor típico de concentración de hidrocarburos en la industria). En la **Figura 21** puede observarse dicho valor como fuente de concentración inicial.



*Fuente: Los Autores*

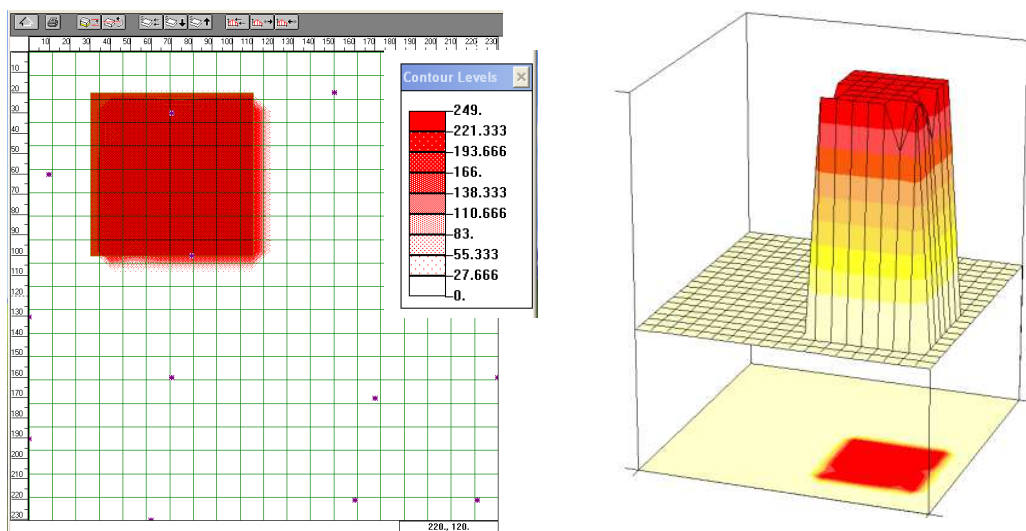
**Figura 21:** Valores de concentración.

Se proyectó un área sobre el modelo, la cual simulará un área de aspersion y/o campo de infiltración de 417m<sup>2</sup> y un área de observación de 4900 m<sup>2</sup> con un vertimiento constante compuesto básicamente por una concentración de 249mg/L de hidrocarburos totales.

### 3.4.1 MODELACIÓN DE AGUAS INDUSTRIALES

Dadas las características físicas del suelo, en esta unidad puede observarse un desplazamiento muy sutil de las concentraciones residuales de hidrocarburos a lo largo y ancho del sitio proyectado para la realización del vertimiento, que corresponde a 417m<sup>2</sup> aproximadamente.

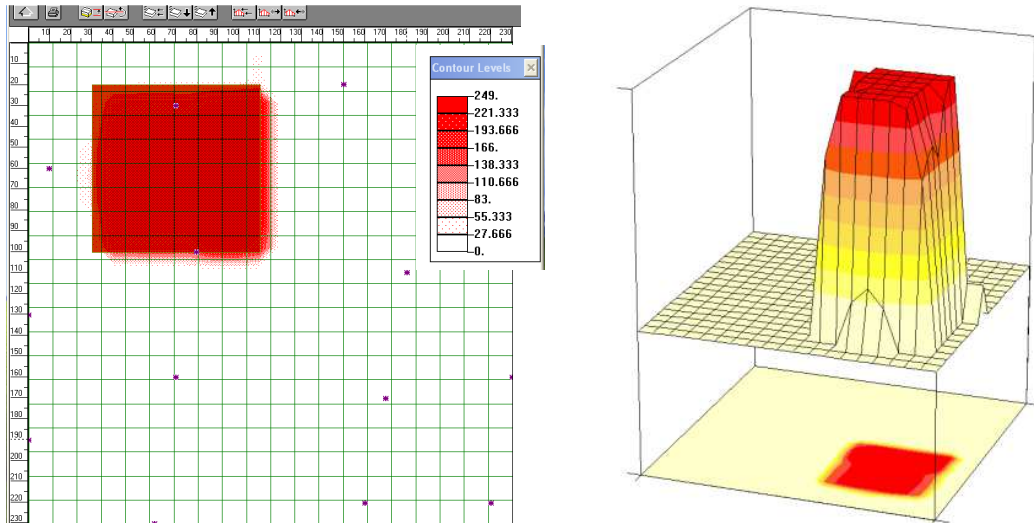
En la **Figura 22** se presenta el resultado de la modelación de aguas residuales industriales en el primer año, evidenciándose una acumulación de contaminantes en los primeros estratos en el área de aspersión, la cual va disminuyendo hacia los estratos más bajos del suelo.



**Fuente:** Los Autores

**Figura 22:** Concentración del contaminante en el primer año de vertimiento.

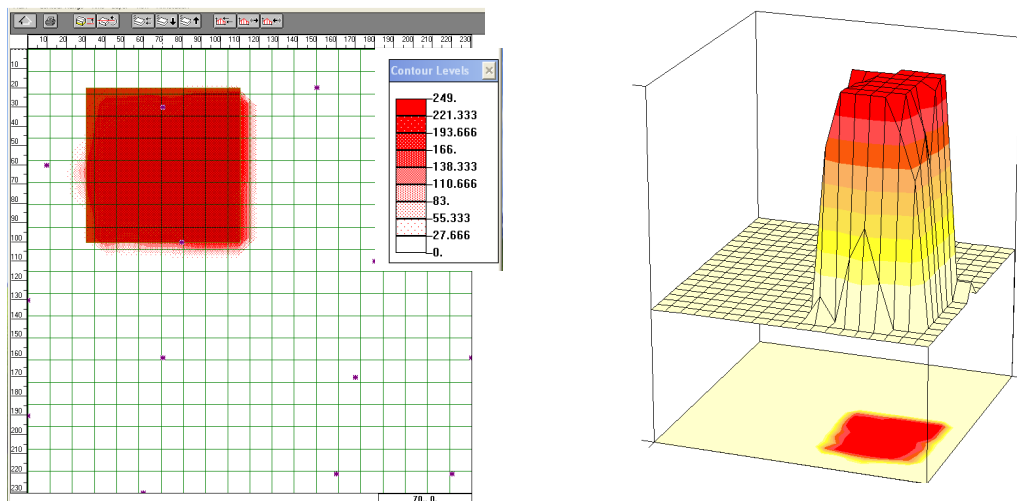
En la **Figura 23** se presenta el resultado de la modelación de aguas residuales industriales para el segundo año, al igual que en el año anterior se evidencia una acumulación de contaminantes en el área de aspersión en los primeros cuatro (4) metros de profundidad, presentando concentraciones entre 138 y 249 mg/L de hidrocarburos totales, que poco a poco van disminuyendo a medida que se infiltra el agua residual.



**Fuente:** Los Autores

**Figura 23:** Concentración del contaminante en el segundo año de vertimiento.

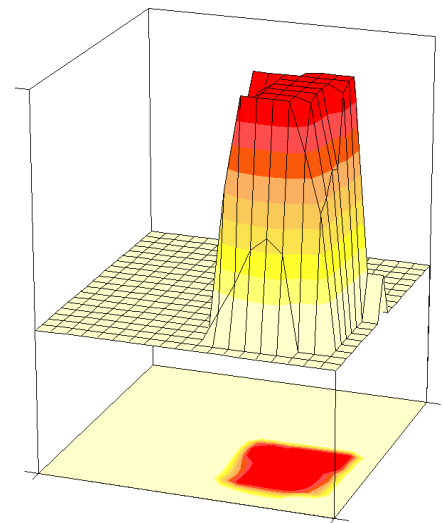
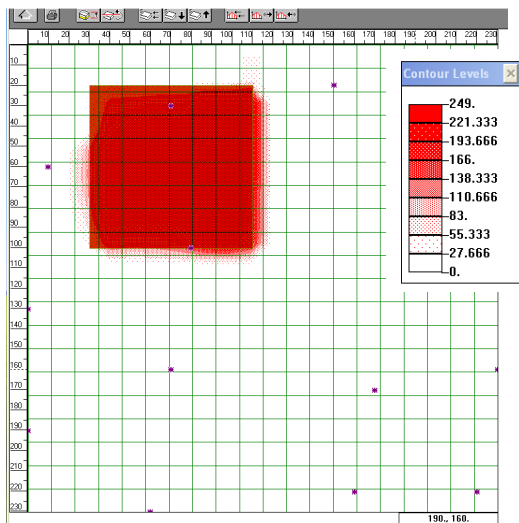
En la **Figura 24** se presenta el resultado de la modelación de aguas residuales industriales para el tercer año de vertimiento, al igual que los dos primeros años la concentración del contaminante en el suelo presenta una carga igual a la concentración vertida, la cual va disminuyendo a medida que se infiltra en los estratos más bajos del suelo receptor.



**Fuente:** Los Autores

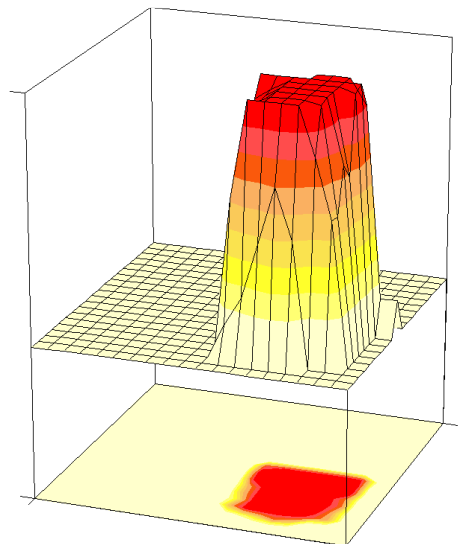
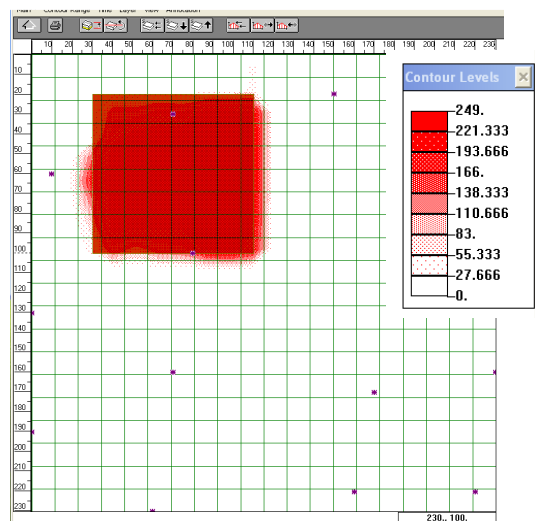
**Figura 24:** Concentración del contaminante en el tercer año de vertimiento.

Para el periodo del cuarto (Figura 25) y quinto año (Figura 26), se observa una leve dispersión homogénea a lo largo y ancho del área de vertimiento, presentando una concentración constante en la parte superficial del suelo, pero también se mantiene una evidente acumulación en la concentración original del vertimiento a lo largo de una gruesa capa en el perfil vertical. Cabe anotar que el desplazamiento de la pluma se extiende apenas en los primeros tres (3) a cuatro (4) metros en la horizontal. Se observa atenuación de la concentración luego de 5 años de valores de hasta 27 mg/L.



Fuente: Los Autores

Figura 25: Concentración del contaminante en el cuarto año de vertimiento.



Fuente: Los Autores

Figura 26: Concentración del contaminante en el quinto año de vertimiento.

El comportamiento del vertimiento de las aguas residuales industriales respecto a la modelación de las aguas residuales domésticas puede deberse a las limitantes del programa BIOPLUME III, el cual no permite modelar el vertimiento teniendo en cuenta variables climatológicas como precipitación, temperatura y evapotranspiración (variables que si permite el HYDRUS 3D), aspecto limitante que imposibilita evaluar la dispersión del contaminante en épocas de lluvia y estiaje.

### **3.5 DISEÑO HIDRÁULICO DEL SISTEMA DE RIEGO DE AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS E INDUSTRIALES**

Para el desarrollo del diseño de campo de aspersión se tuvieron en cuenta las pruebas de infiltración realizadas en campo y las características de los suelos presentes en el área de influencia del proyecto, los cuales se encuentran caracterizados por la presencia de estructuras arcillo limosas que permiten de acuerdo a la estructura propia del área, la infiltración del agua a estratos inferiores del suelo.

Es preciso resaltar que para la selección del área para el establecimiento del campo de aspersión, se consideraron aspectos como: anegabilidad, relieve, distancia a cuerpos de agua, zonas de importancia ecológica y permeabilidad de los suelos. El área destinada para el campo de aspersión presenta una extensión de 0.5 ha, la cual cuenta con una capacidad de infiltración promedio de 336.56 mm/h, con un caudal proyectado de 2 L/s por un periodo de 24 horas, los siete días a la semana.

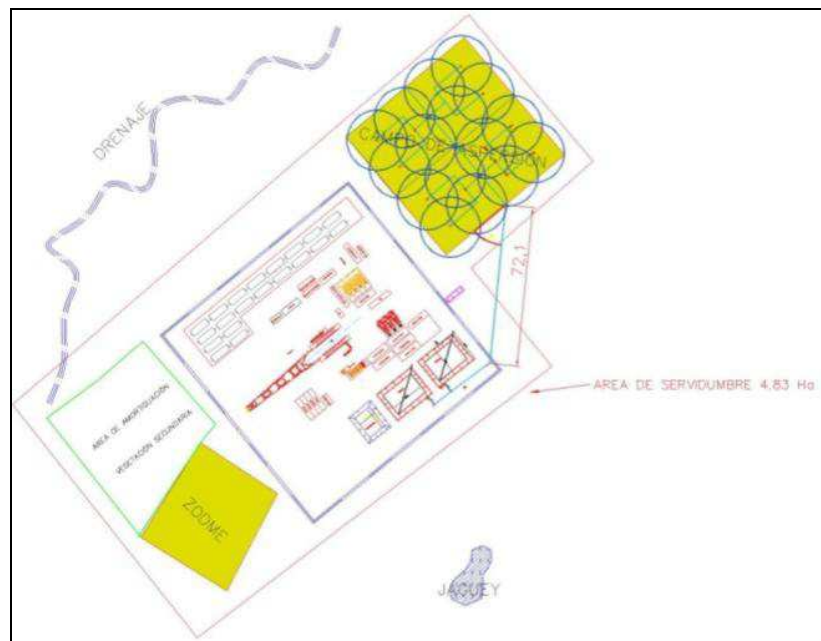
El área total del campo, para efectos de diseño y cálculos de infiltración del vertimiento, se subdividirá en cuatro módulos, los cuales harán el papel de campo de aspersión cada uno por un periodo de 3 meses (**Figura 27**), de esta forma se

asegura que no existirá una saturación del vertimiento en el área, para evitar provocar inundaciones y escorrentías superficiales durante todo el año, especialmente en épocas de precipitaciones máximas.

### 3.5.1 Superficie por Modulo

De acuerdo a la superficie total del área de aspersion de 0.5 ha (5000m<sup>2</sup>) y al número de módulos proyectados, se encontró que cada módulo del campo de aspersion contará con un área de 1250 m<sup>2</sup>.

$$S_{mod} = \frac{5000m^2}{4} = 1250m^2$$



**Fuente:** Los Autores

**Figura 27:** Localización general y diseño del campo de aspersion.

### 3.5.2 Superficie de Riego Mínima para la Disposición

$$S = \frac{V}{V_{m,r} * 0.5} * tr$$

Dónde:

S = Superficie expresada en m<sup>2</sup>.

V = Volumen de efluente a aplicar en una hora expresado en m<sup>3</sup>.

Vinf = Velocidad de infiltración en m/hora.

tr = Duración del vertimiento en horas.

0.5 = Factor de seguridad.

$$S = \frac{7.2\text{m}^3}{0.336 \frac{\text{m}}{\text{h}} * 0.5} * 24\text{h}$$

$$S = 1028\text{m}^2$$

Se tiene proyectada un área total de 5000 m<sup>2</sup> para la disposición de las aguas residuales; de acuerdo a la superficie mínima de riego requerida, se encontró que para la disposición de un caudal de 2L/s (7.2 m<sup>3</sup> / día) se requiere de un área de 1028 m<sup>2</sup>, lo cual permitiría una rotación del campo de aspersion mediante la división del área total disponible en cuatro secciones o módulos.

### 3.5.3 Lámina Bruta a Disponer

$$LB = \frac{Vt}{Sup}$$

Dónde:

Vt = Volumen total de agua a disponer en las 24 horas de disposición; m<sup>3</sup>.

Sup = Superficie total donde se hará la disposición; m<sup>2</sup>.

$$\frac{172.8\text{m}^3}{1028\text{m}^2} = 0.168\text{m} = 168.09\text{mm} < 336.56\text{mm}$$

La lámina bruta a disponer es de 168.09 mm de agua sobre el campo de aspersion, volumen inferior al que puede asimilar el tipo de suelo que es de 336.56

mm, de esta forma se asegura que el área no se va a saturar con un caudal de 2L/s de vertimiento.

### 3.5.4 Selección del Aspersor

#### 3.5.4.1 Caudal del aspersor a seleccionar

$$Q_{asp} = \frac{Vol}{N^{\circ}asp}$$

Dónde:

$Q_{asp}$  = caudal de cada aspersor; L/h.

Vol = Volumen total a disponer en el campo durante una hora; L.

$N^{\circ}asp$  = Número de aspersores.

$$Q_{asp} = \frac{7200L/h}{4} = 1800L/h$$

Para la aspersión de 7200 L/h se propone el empleo de cuatro (4) aspersores por modulo con una capacidad de 1800 L/h. De acuerdo al catálogo de productos de Senninger inc S.A. los más apropiados corresponden al Modelo 4012-I de la Serie 40; cada uno con un diámetro de cobertura de 27.6m y un caudal de 1806 l/h, elevador de 0.46m, boquilla de 5.16 mm y presión de operación de 3.10 bares. **(Figura 28)**

	(bar)	2.07	2.41	2.76	3.10	3.45	3.79	4.14
<b>4012- </b>								
								
<b>Boquilla #10 - Turquesa (3.97mm)</b>								
Caudal(L/hr)		868	938	1002	1063	1120	1174	1226
Diám. a 0.46m alt (m)		22.3	23.5	24.4	25.3	26.2	27.1	27.7
<b>Boquilla #11 - Amarilla (4.37mm)</b>								
Caudal(L/hr)		1052	1136	1213	1288	1358	1424	1488
Diám. a 0.46m alt (m)		23.2	24.4	25.3	26.2	27.1	28.0	28.7
<b>Boquilla #12 - Roja (4.76mm)</b>								
Caudal(L/hr)		1254	1356	1447	1535	1619	1699	1774
Diám. a 0.46m alt (m)		23.8	25.0	25.9	26.8	27.7	28.7	29.3
<b>Boquilla #13 - Blanca (5.16mm)</b>								
Caudal(L/hr)		1476	1594	1701	1806	1903	1999	2087
Diám. a 0.46m alt (m)		24.4	25.6	26.5	27.4	28.3	29.3	29.9
<b>Boquilla #14 - Azul (5.56mm)</b>								
Caudal(L/hr)		1701	1837	1960	2083	2194	2294	2408
Diám. a 0.46m alt (m)		25.0	26.2	27.1	28.3	29.3	30.2	30.8

Fuente: Senninger, inc. S/A. Catálogo: Productos para Riego de Cobertura Total

Figura 28: Especificaciones de diseño del aspersor Seleccionado

### 3.5.5 Diseño Hidráulico de la Tubería

Se recomienda utilizar para la tubería principal una dimensión de 2" de diámetro tipo PVC para irrigación agrícola.

$$D = \frac{1.626 + L^{0.205} * Q^{0.38}}{C_{HW}^{0.38} * hf^{0.205}}$$

Dónde:

L = Longitud de la tubería de conducción.

hf = Cabeza topográfica a favor del flujo.

CHW = Coeficiente de rugosidad 150 (para tubería en PVC).

Q = Caudal en m<sup>3</sup>/s.

$$D = \frac{1.626 + 150^{0.205} + 0.002^{0.38}}{150^{0.38} * 6^{0.205}} = 0.447m = 1.7" \approx 2"$$

Para las tuberías secundarias se recomienda un diámetro de 1.5":

$$D = \frac{1.626 + 16^{0.205} * 0.001^{0.38}}{150^{0.38} * 1^{0.205}} = 0.030m = 1.2 \approx 1.5"$$

### 3.5.5.1 Pérdidas por fricción

➤ Pérdidas para la tubería principal (150m)

$$HF = 1.22 * 10^{-12} * \frac{\left(\frac{2}{150}\right)^{1.852}}{60^{1.87}} * \frac{150}{100}$$

$$HF = 1.35m$$

➤ Pérdidas para las tuberías secundarias (16m)

$$HF = 1.22 * 10^{-12} * \frac{\left(\frac{0.5}{150}\right)^{1.852}}{48^{1.87}} * \frac{16}{100}$$

$$HF = 0.32m$$

➤ Pérdidas en el último aspersor

La presión a la que opera el aspersor es de 3.10 bares.

**1 bar** = 10,20 m de agua (m.c.a.).

**3.10 bar** = 31.62 m de agua (m.c.a.).

Cabe destacar que las pérdidas en el último aspersor no deben exceder del 20% en comparación con las presiones en la primera derivación; por lo tanto se deben ajustar las pérdidas en el último aspersor para garantizar una operación óptima del

mismo. De esta manera, mediante el coeficiente F de Christiansen, se corrige la pérdida de carga considerando la cantidad de derivaciones o salidas que se tenga.

$$f = 0.351 + \frac{1}{2 * n} + \frac{0.154}{n^2}$$

Dónde:

f = Factor de Christiansen.

n = Número de derivaciones hasta el último aspersor.

$$f = 0.351 + \frac{1}{2 * 2} + \frac{0.154}{2^2}$$

$$f = 0.639$$

$$hf_{asp} = \left( \frac{31.62m + 0.20}{0.639} \right) + 31.62m = 41.51m$$

### 3.5.6 Equipo de Bombeo

Se requiere de un equipo de bombeo de 2 HP, el cual permitirá transportar el agua desde los respectivos sistemas de tratamiento de aguas residuales del pozo hasta el campo de aspersión, permitiendo de esta manera alcanzar las presiones requeridas por los aspersores a instalar.

$$HP_B = \frac{Q_s * H_T}{76 * E_B}$$

Dónde:

HPB = Potencia requerida por la bomba (Caballos de Fuerza, HP).

Qs = Es el caudal del sistema o en la subunidad de riego (lps).

HT = Carga total del sistema (m).

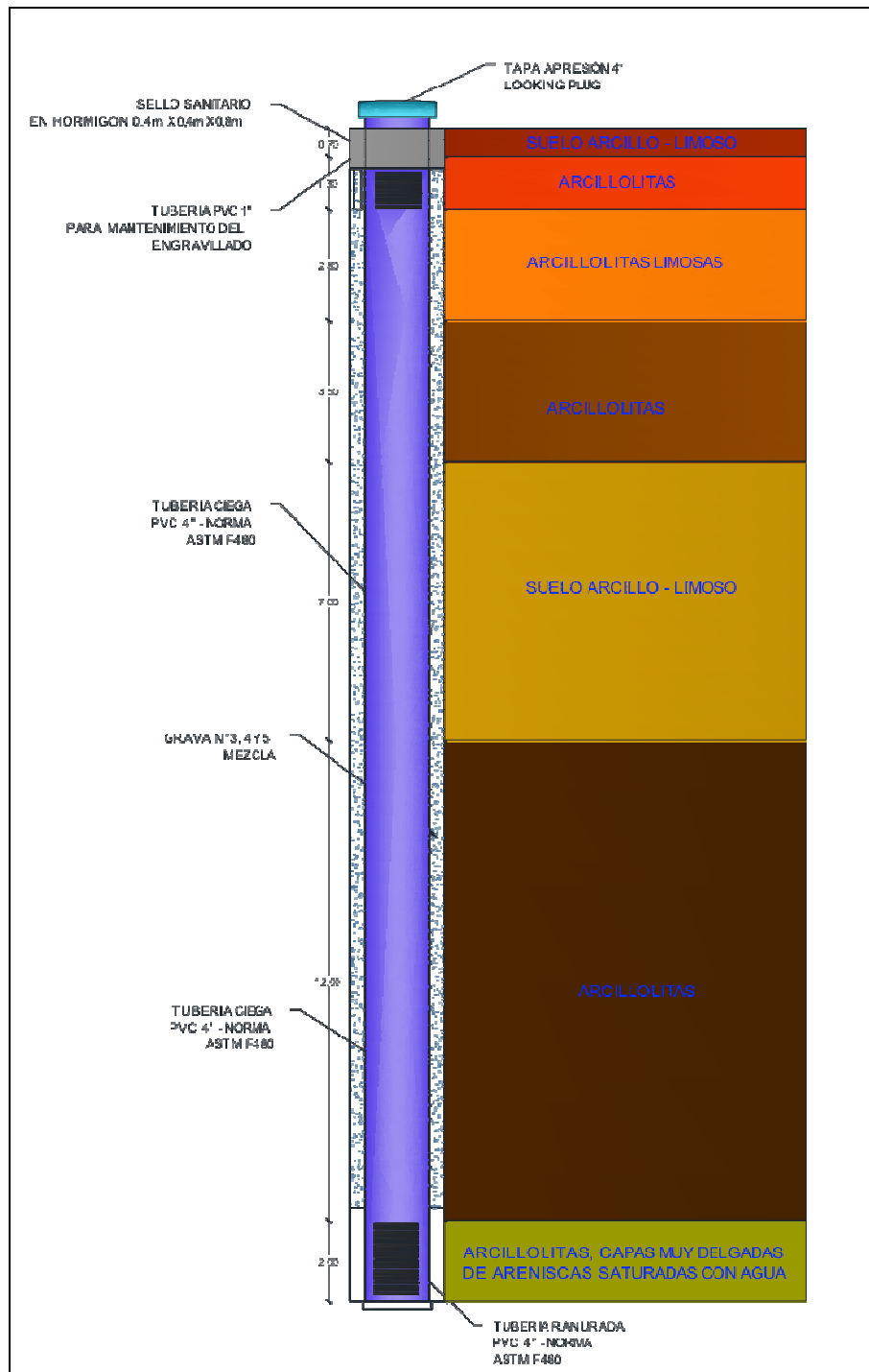
EB = Eficiencia de la bomba (0.75).

$$HP_b = \frac{\frac{2l}{s} \times 53.3m}{76 + 0.75} = 1.87 HP \approx 2 HP$$

### 3.6 RED DE MONITOREO DE AGUAS SUBTERRANEAS

De acuerdo a los resultados obtenidos en los sondeos eléctricos verticales realizados en el área de la plataforma (**Figura 8**), se logró identificar la litología encontrada en el suelo receptor, así mismo se encontró que a partir de los 11.5 a 12 metros de profundidad, se presenta una capa de areniscas con agua e intercalaciones de arcillolitas. Por esto se recomienda adelantar perforaciones de por lo menos 14m de profundidad para la respectiva instalación de piezómetros que permitirán el monitoreo de las aguas subterráneas.

En la **Figura 29** se estructura el diseño definitivo de los piezómetros a construir para el monitoreo de las aguas subterráneas presentes en el área de influencia del campo de aspersión.



*Fuente: Los Autores, 2014*

**Figura 29:** Diseño final de los piezómetros

## **4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **DISEÑO HIDRÁULICO DEL CAMPO DE ASPERSIÓN**

- Se propone utilizar una bomba cuya potencia sea de 2 HP (HorsePower) ó 1.5 Kw (Kilo-Watts) para el funcionamiento óptimo de los aspersores según el diseño del campo de aspersión.
- Los aspersores recomendados deberán cumplir con las siguientes características: diámetro de cobertura de 27.6m, un caudal de 1806 l/h, elevador de 0.46m, boquilla de 5.16 mm y presión de operación de 3.10 bares.
- Se recomienda una tubería de riego con un diámetro de 2"; esta misma servirá como tubería principal. Los ramales o tubería secundarias tendrán un diámetro de 1.5" y se necesitarán aproximadamente 200 m. De la misma manera, y según las especificaciones de diseño de los aspersores, los 4 elevadores tendrán una altura de 0,46 m y estos tendrán un diámetro de ¾".
- El área de disposición para las aguas residuales tratadas tendrá una superficie de aproximadamente 1028 m<sup>2</sup> y en la misma se dispondrá diariamente una lámina bruta de 168.09mm durante un periodo de 24 horas. De esta manera no se sobrepasará la capacidad de infiltración del terreno y garantiza que en el período de disposición no se saturará el suelo.

### **RED DE MONITOREO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS**

- Se contempla la perforación de prueba en 8" mínimo 6", con el fin de instalar tubería en 4" PVC norma ASTM F480, ciega los primeros 12m de perforación

y perforada (ranurada) los últimos 2m. Con el fin de garantizar que la tubería quede centrada, se deben emplear centralizadores que se distribuyan en toda la longitud de la tubería.

- Se debe colocar una mezcla de grava N° 3, 4 y 5 entre la tubería de revestimiento y la pared de la perforación a lo largo del piezómetro. Durante el proceso de desarrollo ocurren procesos de asentamiento de la grava, por lo que es necesario agregar mayor volumen de la misma, por lo que se recomienda poner un tubo engavillado de entre 1" y 2", que va desde la superficie del piezómetro hasta donde inicia el nivel de la grava (80cm de la superficie, lugar en que se encuentra ubicado el cello sanitario del piezómetro).
  
- Cada piezómetro debe contar con un sello sanitario, el cual tiene la función de impedir la entrada de elementos contaminantes provenientes de la superficie, de esta manera se evita una contaminación cruzada del exterior hacia el acuífero. Este sello será desarrollado en concreto con unas dimensiones de 50cm de ancho por 50cm de largo, por una profundidad de 80cm.

## BIBLIOGRAFÍA

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 1984. Ambient Water Quality Criteria. Office of Water Regulations and Standards Criteria and Standards Division. Washington, DC 20460. January 1985.

GEOPRODUCTION OIL AND GAS COMPANY OF COLOMBIA. 2010. Estudio de impacto ambiental para la modificación de la Resolución N° 0098 de Enero 18 de 2008. Licencia Ambiental Global para el desarrollo del proyecto "Bloque Esperanza". MCS Consultoría y Monitoreo Ambiental S.A.S. y Técnicas S.A.S. Soluciones Integrales.

Metcalf & Eddy (1998). "Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertida y reutilización ". McGraw Hill. 3ª Ed. (Castellano)

Resolución 0098 del 18 de enero de 2008. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Por el cual se otorga la licencia ambiental global del Bloque Esperanza a la empresa Geoproduction Oil And Gas Company Of Colombia.

Richards, L.A., 1931. Capillary conduction of liquids in porous media. Physucs. 1, 318-333.

Simunek, J., M. Sejna, and M. Th. Van Genuchten. 1998. The Hydrus-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media. Versión 1.0 IGMWMC-TPS-70. Golden, Colo.: Colorado School of Mines, International Ground Water Modeling Center.

Vallejo-Gonzalez L. 2002. Ingeniería Geológica. Pearson Educación. ISBN 9788420531045.







