



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – GEOTECNIA

**EVALUACIÓN DEL TRANSPORTE DE CONTAMINANTES DESDE EL CAUCE A
LAS RIBERAS DEL RÍO LERMA**

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRA EN INGENIERÍA

PRESENTA:
VIVIANA CRUZ MÉNDEZ

TUTORA PRINCIPAL
DRA. NORMA PATRICIA LÓPEZ ACOSTA,
INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

CIUDAD DE MÉXICO, MÉXICO, ENERO 2024



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Rigoberto Rivera Constantino
Secretario: Dr. Osvaldo Flores Castrellón
Vocal: Dra. Norma Patricia López Acosta
1er. Suplente: Dra. Judith Guadalupe Ramos Hernández
2do. Suplente: M. I. Juan de Dios Alemán Velásquez

Lugar donde se realizó la tesis: INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM, MÉXICO

TUTORA DE TESIS:

DRA. NORMA PATRICIA LÓPEZ ACOSTA

FIRMA

DEDICATORIAS

A mis razones de ser:

A mis padres, M.^a de Lourdes Méndez Gómez y Natalio Cruz Hernández, por todo su amor y apoyo.

A mi hermana, Citlally del Carmen Cruz Méndez, por inspirarme y motivarme.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por regalarme cada día.

A mi novio, Carlos A. Alejandro Morales, por su amor incondicional, comprensión y apoyo.

A toda mi familia por creer en mí y alentarme para cumplir con mis objetivos.

A la Dra. Norma Patricia López Acosta por la confianza, paciencia, consejos y apoyo brindado durante la realización de este trabajo.

A mis hermanos por elección, Miguel Ángel y Kenia Sofía, por estar juntos una vez más; ahora en esta travesía llamada maestría.

A mis amigas en la distancia, Lucía Angélica y Diana Priego, por acompañarme durante esta etapa y estar muy atentas de mi bienestar sin importar los kilómetros que nos separan.

A los integrantes del grupo “3A de Delfín Madrigal” por la familia adoptiva que formamos al compartir el sentimiento de estar lejos de los nuestros.

A Ceci y Lucca por hacer todas mis tardes más felices y divertidas.

A mis amigos Ricardo, Octavio, Yoali, Aivy, Manuel, Daniela, Valeria, Armando, Ángel, Miriam, Allyson y Alexander por acompañarme en este camino de aprendizaje y hacer cada día más ameno.

A Laura, Liliana, Eduardo, Martín y David por hacer más grata mi estadía en el cubículo.

A Ydalia por enseñarme a cuidar mi salud mental durante este proceso.

A Marco P. Robaldi Velázquez por sus asesorías e información proporcionada para la realización de este trabajo.

A mis sinodales Dr. Rigoberto Rivera Constantino, Dr. Osvaldo Flores Castellón, Dra. Judith Guadalupe Ramos Hernández y M. I. Juan de Dios Alemán Velásquez por el tiempo invertido en la revisión de este trabajo.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por el apoyo económico para realizar mis estudios de maestría.

Al Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México por brindarme un espacio de trabajo y otorgarme una beca para la culminación de esta tesis.

ÍNDICE

RESUMEN	III
ABSTRACT	IV
ÍNDICE DE FIGURAS	V
ÍNDICE DE TABLAS	VII
NOTACIÓN	IX
1. INTRODUCCIÓN	1
2. GEOTECNIA Y MEDIO AMBIENTE	3
2.1 Importancia de la geotecnia ambiental	3
2.2 Políticas ambientales en México	4
2.3 Marco conceptual	6
3. MARCO TEÓRICO	9
3.1 Flujo de agua en el suelo	9
3.1.1 Consideraciones generales	9
3.1.2 Soluciones analíticas y numéricas.....	13
3.2 Flujo de contaminantes en suelos saturados	14
3.2.1 Ecuación de transporte de solutos	14
3.2.2 Procesos de transporte en suelos	16
3.2.3 Procesos de atenuación.....	24
3.2.4 Soluciones analíticas y numéricas.....	29
3.3 Fuente contaminante.....	29
3.3.1 Aspectos generales	29
3.3.2 Metales pesados.....	31
3.4 Consecuencias de la contaminación del suelo y agua	33
3.4.1 En el medio ambiente y la salud.....	33
3.4.2 En la geotecnia	35
4. CASO DE APLICACIÓN EN SAN MATEO ATENCO, ESTADO DE MÉXICO	37
4.1 Planteamiento del problema	37
4.2 Ubicación del sitio	40
4.2.1 Ubicación geográfica.....	40
4.2.2 Ubicación geotécnica	43

4.3	Parámetros empleados en la modelación numérica	46
4.3.1	Parámetros geotécnicos	46
4.3.2	Parámetros del contaminante	53
4.4	Modelación numérica	57
4.4.1	Consideraciones generales	57
4.4.2	Desarrollo de los análisis de flujo de solutos	59
4.4.3	Resumen de resultados y comentarios	61
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	65
5.1	Conclusiones.....	65
5.2	Recomendaciones	68
	REFERENCIAS	69
	ANEXO I. PERFILES ESTRATIGRÁFICOS.....	i
	ANEXO II. DETALLE DE LOS RESULTADOS.....	vii
	ANEXO III. COMPARACIÓN DE RESULTADOS (EN PORCENTAJE)	xxiii

RESUMEN

El río Lerma se origina en la laguna de Almoloya, Estado de México y desemboca en el Lago de Chapala. Actualmente es considerado como uno de los ríos más contaminados del país, debido a la alta actividad industrial que se desarrolla en la región, la producción agrícola y el acelerado crecimiento urbano que ha provocado una sobre explotación del río. Los metales pesados son los contaminantes predominantes en el río Lerma, siendo el plomo soluble uno de los principales causantes del deterioro del río. Lo anterior representa una amenaza para la cadena trófica de las comunidades aledañas al río (zona de riberas).

El objetivo principal de esta tesis de maestría es evaluar si el plomo soluble que se encuentra en el río Lerma se transporta, mediante flujo de agua subterránea, hacia la ribera izquierda del río, ubicado en el municipio de San Mateo Atenco (Estado de México). Se estudia solamente esta ribera por el impacto que la concentración excesiva de contaminación puede tener sobre las personas que ahí habitan y también en las hortalizas que se siembran en esa zona. No se centra la atención en la otra ribera (derecha) porque no está habitada, sino que se ocupa como vía de comunicación. El presente trabajo pretende contribuir a las investigaciones relacionadas con la contaminación del río Lerma y municipios aledaños y, por otra parte, identificar los parámetros que tienen mayor influencia en el estudio del transporte de contaminantes.

En la parte principal de esta tesis, se muestra un caso de estudio (evaluado con modelación numérica) en un sitio particular de San Mateo Atenco en el Estado de México. Los análisis numéricos se resuelven con un programa especializado que emplea el método de elemento finito. En los cálculos se considera un medio compuesto por cuatro estratos: el primero constituido por arenas, el segundo por arcilla orgánica arenosa, el tercero está compuesto de limo con arena y el siguiente, por arcilla orgánica. Dada la cercanía con el río Lerma, la zona se asume saturada. El tirante de agua del río se establece máximo para representar la condición más desfavorable. Como ya se mencionó, el estudio se lleva a cabo en la margen izquierda, ya que es zona agrícola y de viviendas. En la margen derecha del río se ubica la autopista Lerma – Tenango del Valle. Para el transporte de solutos, se considera una concentración promedio de plomo soluble igual a 1.0 g m^{-3} y se usa el método de advección – dispersión para determinar su movilidad. Los análisis se ejecutan utilizando los parámetros propios de cada estrato, y en algunos casos, se consideran valores máximos y mínimos según el tipo de suelo, para evaluar la sensibilidad de los parámetros en este tipo de análisis. Los resultados se comparan con tres normas mexicanas que establecen los límites permisibles de plomo soluble en el suelo y en el agua para uso y consumo humano.

Por último, se dan conclusiones y recomendaciones derivadas de los análisis realizados, resaltando los parámetros más significativos para este tipo de análisis. Se espera que este trabajo motive la inclusión del estudio del transporte de contaminantes en el ámbito de la geotecnia ambiental y que contribuya no sólo a las investigaciones sobre contaminación realizadas en la zona alta del río Lerma, en el municipio de San Mateo Atenco, sino también a motivar investigaciones similares en sitios con condiciones semejantes a las de la zona evaluada en esta tesis.

ABSTRACT

The Lerma River originates in the Almoloya lagoon, State of Mexico and flows into Lake Chapala. It is currently considered one of the most polluted rivers in the country due to the high industrial activity that takes place in the region, agricultural production and the accelerated urban growth that has caused overexploitation of the river. Heavy metals are the predominant contaminants in the Lerma River, with soluble lead being one of the main causes of the river's deterioration. The above represents a threat to the food chain of the communities surrounding the river (riparian zone).

The objective of this master's thesis is to evaluate whether soluble lead found in the Lerma River is transported, through groundwater flow, to the left bank of the river, located in the municipality of San Mateo Atenco (State of Mexico). This riverbank is studied because of the impact that the excessive concentration of pollution can have on the people who live there and also on the vegetables that are planted in that area. Attention is not focused on the other bank (right) because it is not inhabited, but is used as a communication route. This work aims to contribute to research related to the contamination of the Lerma River and surrounding municipalities and, on the other hand, identify the parameters that have the greatest influence in the study of contaminant transport.

In the main part of this thesis, a case study is shown in a particular site in the State of Mexico. The analyzes are resolved with a specialized program that uses the finite element method and is considered a medium composed of four strata: the first is composed of sand, the second by sandy organic clay, the third corresponds to silt with sand and finally, a organic clay layer. Given the proximity to the Lerma River, it is assumed to be a saturated zone. The water depth of the river is set maximum to represent the most unfavorable condition. The study is carried out on the left bank, since it is an agricultural and residential area. The Lerma – Tenango del Valle highway is located on the right bank of the river. For the transport of solutes, an average concentration of soluble lead equal to 1.0 g m^{-3} is considered and the advection – dispersion method is used to determine the mobility of the contaminant. The analyzes are executed using the parameters specific to each stratum, and in some cases, maximum and minimum values are considered depending on the type of soil, to evaluate the sensitivity of the parameters in this type of analysis. The results are compared with three Mexican regulations that establish the permissible limits of soluble lead in soil and water for human use and consumption.

Finally, conclusions and recommendations derived from the analyzes carried out are given, highlighting the most significant parameters for this type of analysis. It is expected that this work motivates the inclusion of the study of contaminant transport in the field of environmental geotechnics and that it contributes to the investigations on contamination carried out in the upper area of the Lerma River, in the municipality of San Mateo Atenco.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 Tipos de fronteras que se presentan en un flujo no confinado (López Acosta, 2017)	10
Figura 3.2 Ejemplo de cambios en la línea de corriente superior (López Acosta, 2017).....	13
Figura 3.3 Ley de Darcy.....	17
Figura 3.4 Gradiente de concentración constante.....	19
Figura 3.5. Perfil de difusión obtenido con la función de error complementaria.....	21
Figura 3.6 a) dispersión longitudinal por tortuosidad, b) dispersión longitudinal por amplitud de canales y c) dispersión transversal (Fetter <i>et al.</i> , 2018)	22
Figura 3.7. Formación de la pluma contaminante en un estrato de suelo (Yong, 2000)	23
Figura 3.8 Isoterma de adsorción lineal (Fetter <i>et al.</i> , 2018).....	27
Figura 3.9. Efecto del coeficiente de distribución en el proceso de retardo durante el transporte de contaminante, en un sistema de flujo de agua. Considerando: porosidad = 0.3; conductividad hidráulica = 0.5 m/día; contornos de concentración en $C/C_0 = 0.9, 0.7, 0.5, 0.3$ y 0.1 ; $\alpha_l = 10$ m y $\alpha_t = 0.5$ m (Allan-Freeze y Cherry, 1979).....	27
Figura 3.10. Posibles vías de exposición a la contaminación del suelo en un entorno doméstico	33
Figura 4.1. Margen izquierda del Río Lerma, en San Mateo Atenco.....	38
Figura 4.2. Ruptura de bordo casado por inundaciones, San Mateo Atenco 2018.....	38
Figura 4.3. Vulnerabilidad y área de inundación en San Mateo Atenco (Toscana-Aparicio <i>et al.</i> , 2009)..	39
Figura 4.4. Sección topográfica de la zona de estudio, representativa de la problemática	39
Figura 4.5 Ubicación de la cuenca Lerma – Chapala – Santiago (Esteller y Díaz-Delgado, s/f).....	40
Figura 4.6. Localización del Municipio de San Mateo Atenco (Toscana-Aparicio <i>et al.</i> , 2009).....	41
Figura 4.7. Uso de suelo y vegetación en San Mateo Atenco, Estado de México (Gobierno del Estado de México, 2022)	42
Figura 4.8. Zona urbana del Valle de Toluca: zonificación original (García-Rocha <i>et al.</i> , 2010)	43
Figura 4.9. Zonificación modificada del Valle de Toluca (García-Rocha <i>et al.</i> , 2010).....	44
Figura 4.10. Contribución a la zonificación geotécnica general del Valle de Toluca	46
Figura 4.11. Exploración geotécnica en margen izquierda del Río Lerma, San Mateo Atenco.....	47
Figura 4.12. Perfil de suelo de la margen izquierda del río Lerma, en San Mateo Atenco.....	50
Figura 4.13. Perfil de suelo en la sección estratigráfica 2+620 (Zona UTM: 14Q, coordenada Este: 445311.00 m E, coordenada Norte: 2129936.00 m N).....	52
Figura 4.14. Condiciones de frontera aguas arriba y aguas abajo en SEEP/W	58
Figura 4.15 Condiciones de frontera en CTRAN/W	58
Figura 4.16. Ubicación de nodos en las diferentes secciones de la región de análisis	59

Figura 4.17. Gráficas de concentración de plomo soluble vs tiempo, para $\alpha_L/\alpha_T=1$ (caso V), $\alpha_L/\alpha_T=2$ (caso VI), $\alpha_L/\alpha_T=5$ (caso VII) y $\alpha_L/\alpha_T=20$ (caso VIII), en: a) pie del bordo, b) 10 m de ribera, c) 20 m de ribera y d) 30 m de ribera	62
Figura I. 1 Perfil estratigráfico del pozo a cielo abierto PCA-1	i
Figura I. 2 Perfil estratigráfico del pozo a cielo abierto PCA-2	i
Figura I. 3 Perfil estratigráfico del pozo a cielo abierto PCA-3	ii
Figura I. 4 Perfil estratigráfico del pozo a cielo abierto PCA-4	ii
Figura I. 5 Perfil estratigráfico del sondeo SM-1	iii
Figura I. 6 Perfil estratigráfico del sondeo SM-2	iv
Figura I. 7 Perfil estratigráfico del sondeo SM-3	v
Figura I. 8 Perfil estratigráfico del sondeo SM-4	vi
Figura II. 1 Pluma contaminante para un tiempo de 5 años, caso I.....	vii
Figura II. 2 Pluma contaminante para un tiempo de 50 años, caso I.....	vii
Figura II. 3 Pluma contaminante para un tiempo de 5 años, caso II	ix
Figura II. 4 Pluma contaminante para un tiempo de 50 años, caso II	ix
Figura II. 5 Pluma contaminante para un tiempo de 5 años, caso III	xi
Figura II. 6 Pluma contaminante para un tiempo de 50 años, caso III	xi
Figura II. 7 Pluma contaminante para un tiempo de 5 años, caso IV	xiii
Figura II. 8 Pluma contaminante para un tiempo de 50 años, caso IV	xiii
Figura II. 9 Pluma contaminante para un tiempo de 5 años, caso V	xv
Figura II. 10 Pluma contaminante para un tiempo de 50 años, caso V	xv
Figura II. 11 Pluma contaminante para un tiempo de 5 años, caso VI.....	xvii
Figura II. 12 Pluma contaminante para un tiempo de 50 años, caso VI.....	xvii
Figura II. 13 Pluma contaminante para un tiempo de 5 años, caso VII.....	xix
Figura II. 14 Pluma contaminante para un tiempo de 50 años, caso VII.....	xix
Figura II. 15 Pluma contaminante para un tiempo de 5 años, caso VIII	xxi
Figura II. 16 Pluma contaminante para un tiempo de 50 años, caso VIII	xxi

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Límites máximos permisibles para metales pesados y cianuro (NOM-001-SEMARNAT-2021)	5
Tabla 2.2 Referencia de límites permisibles de contaminantes solubles.....	5
Tabla 3.1 Condiciones de frontera en flujo de agua establecido (López Acosta, 2017)	11
Tabla 3.2 Permeabilidad k en algunos suelos naturales (Strack, 2017).....	12
Tabla 3.3 Valores del coeficiente de permeabilidad (Flores-Berrones, 2000)	12
Tabla 3.4 Recopilación de parámetros requeridos según el proceso de transporte – Flujo estacionario.....	15
Tabla 3.5 Recopilación de parámetros requeridos según el proceso de transporte – Flujo no estacionario	16
Tabla 3.6 Tabulación de la función de error de Gauss complementaria (Fetter <i>et al.</i> , 2018)	20
Tabla 3.7 Movilidad relativa de elementos traza en suelos (Kabata-Pendias y Mukherjee, 2007)	25
Tabla 3.8 Contaminantes, descripción y fuentes (Escobar, 2002).....	30
Tabla 3.9 Efectos importantes de algunos metales solubles, parte 1.....	31
Tabla 3.10 Efectos importantes de algunos metales solubles, parte 2.....	32
Tabla 3.11 Impacto de los metales pesados en propiedades geotécnicas (Rehman <i>et al.</i> , 2023)	36
Tabla 4.1 Contaminantes solubles en el río Lerma, en San Mateo Atenco, Estado de México	38
Tabla 4.2 Uso de suelo en San Mateo Atenco (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2010).....	41
Tabla 4.3 Parámetros utilizados para realizar pruebas de consolidación de la zona IV, Martínez (1976)..	44
Tabla 4.4 Relación de estudios, ubicación y número de sondeos (García-Rocha <i>et al.</i> , 2010).....	45
Tabla 4.5 Descripción estratigráfica del PCA-1 (VADA Ingeniería S.A. de C.V., 2018a)	47
Tabla 4.6 Descripción estratigráfica del PCA-2 (VADA Ingeniería S.A. de C.V., 2018a)	48
Tabla 4.7 Descripción estratigráfica del ESM-2 (VADA Ingeniería S.A. de C.V., 2018a).....	48
Tabla 4.8 Descripción estratigráfica del PCA-3 (VADA Ingeniería S.A. de C.V., 2018a)	49
Tabla 4.9 Descripción estratigráfica del PCA-4 (VADA Ingeniería S.A. de C.V., 2018a)	49
Tabla 4.10 Descripción estratigráfica del ESM-1 (VADA Ingeniería S.A. de C.V., 2018a).....	50
Tabla 4.11 Descripción estratigráfica del SM-3 (VADA Ingeniería S.A. de C.V., 2018a)	51
Tabla 4.12 Descripción estratigráfica del SM-4 (VADA Ingeniería S.A. de C.V., 2018a)	51
Tabla 4.13 Resumen de trabajos de laboratorio (VADA Ingeniería S.A. de C.V., 2018a).....	52
Tabla 4.14 Parámetros geotécnicos en función del contenido de agua mínimo	53
Tabla 4.15 Parámetros geotécnicos en función del contenido de agua máximo	53
Tabla 4.16 Múltiples investigaciones relacionadas con cultivos y metales pesados, parte 1	54
Tabla 4.17 Múltiples investigaciones relacionadas con cultivos y metales pesados, parte 2	55
Tabla 4.18 Parámetros necesarios para realizar análisis de flujo de solutos	56
Tabla 4.19 Valores de dispersión utilizados para el análisis de flujo de solutos.....	56

Tabla 4.20 Resumen de resultados de la concentración de plomo soluble para un tiempo de 5 años.....	63
Tabla 4.21 Resumen de resultados de la concentración de plomo soluble para un tiempo de 10 años.....	63
Tabla 4.22 Resumen de resultados de la concentración de plomo soluble para un tiempo de 20 años.....	64
Tabla 4.23 Resumen de resultados de la concentración de plomo soluble para un tiempo de 50 años.....	64
Tabla II. 1 Concentración de $Pb_{soluble}$ (en $g\ m^{-3}$) respecto al tiempo, de forma vertical, caso I.....	viii
Tabla II. 2 Concentración de $Pb_{soluble}$ (en $g\ m^{-3}$) respecto al tiempo, de forma horizontal, caso I.....	viii
Tabla II. 3 Concentración de $Pb_{soluble}$ (en $g\ m^{-3}$) respecto al tiempo, de forma vertical, caso II.....	ix
Tabla II. 4 Concentración de $Pb_{soluble}$ (en $g\ m^{-3}$) respecto al tiempo, de forma horizontal, caso II.....	x
Tabla II. 5 Concentración de $Pb_{soluble}$ (en $g\ m^{-3}$) respecto al tiempo, de forma vertical, caso III.....	xii
Tabla II. 6 Concentración de $Pb_{soluble}$ (en $g\ m^{-3}$) respecto al tiempo, de forma horizontal, caso III.....	xii
Tabla II. 7 Concentración de $Pb_{soluble}$ (en $g\ m^{-3}$) respecto al tiempo, de forma vertical, caso IV.....	xiv
Tabla II. 8 Concentración de $Pb_{soluble}$ (en $g\ m^{-3}$) respecto al tiempo, de forma horizontal, caso IV.....	xiv
Tabla II. 9 Concentración de $Pb_{soluble}$ (en $g\ m^{-3}$) respecto al tiempo, de forma vertical, caso V.....	xvi
Tabla II. 10 Concentración de $Pb_{soluble}$ (en $g\ m^{-3}$) respecto al tiempo, de forma horizontal, caso V.....	xvi
Tabla II. 11 Concentración de $Pb_{soluble}$ (en $g\ m^{-3}$) respecto al tiempo, de forma vertical, caso VI.....	xviii
Tabla II. 12 Concentración de $Pb_{soluble}$ (en $g\ m^{-3}$) respecto al tiempo, de forma horizontal, caso VI.....	xviii
Tabla II. 13 Concentración de $Pb_{soluble}$ (en $g\ m^{-3}$) respecto al tiempo, de forma vertical, caso VII.....	xx
Tabla II. 14 Concentración de $Pb_{soluble}$ (en $g\ m^{-3}$) respecto al tiempo, de forma horizontal, caso VII.....	xx
Tabla II. 15 Concentración de $Pb_{soluble}$ (en $g\ m^{-3}$) respecto al tiempo, de forma vertical, caso VIII.....	xxii
Tabla II. 16 Concentración de $Pb_{soluble}$ (en $g\ m^{-3}$) respecto al tiempo, de forma horizontal, caso VIII.....	xxii
Tabla III. 1 Resumen de casos estudiados.....	xxiii
Tabla III. 2 Diferencia de resultados entre casos, de forma vertical (profundidad).....	xxv
Tabla III. 3 Diferencia de resultados entre casos, de forma horizontal (ribera).....	xxvi

NOTACIÓN

A	Área transversal por donde ocurre el flujo
AA	Análisis de agua
A_v	Área transversal efectiva de flujo (área de los espacios vacíos)
α	Constante de adsorción relacionada con la energía de unión (L/mg)
β	Cantidad máxima de soluto que puede ser absorbida por el sólido (mg/kg/)
C	Concentración del contaminante disuelto
Ca	Calcio
$CARL$	Curso Alto del Río Lerma
cm/s	Centímetro/segundo
C_0	Concentración inicial del contaminante
Cr	Cromo
C_s	Concentración adsorbida
Cu	Cobre
$C(x,t)$	Concentración del contaminante en la distancia “x” transcurrido un tiempo “t”
D	Coefficiente de dispersión hidrodinámica
D_d	Coefficiente de difusión del contaminante
D_0	Coefficiente del contaminante
D_L	Coefficiente de dispersión longitudinal
D_T	Coefficiente de dispersión transversal
D^*	Coefficiente de difusión efectivo
D^*_L	Coefficiente de dispersión hidrodinámica longitudinal
D^*_T	Coefficiente de dispersión hidrodinámica transversal
$erfc(u)$	Función de error de Gauss
$erf(u)$	Función complementaria de la función de error de Gauss
Fe	Hierro
F_v	Flujo másico de contaminantes debido a la advección
H	Carga hidráulica total
i	Gradiente hidráulico
J	Flujo másico debido a la difusión
K	Potasio
k	Conductividad hidráulica
K_d	Coefficiente de distribución
L	Longitud total del estrato donde ocurre el flujo
$LGEEPA$	Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección Ambiental
m/d	Metro/día
MEF	Método de Elemento Finito
MDF	Método de Diferencia Finita
Mn	Manganeso
n	Porosidad
n_e	Porosidad efectiva
NOM	Norma Oficial Mexicana
NMX	Norma Mexicana
Pb	Plomo

Q	Gasto o caudal
q	Inyección o extracción
S	Azufre
SCFI	Secretaria de Comercio y Fomento Industrial
SSA1	Comité Consultivo Nacional de Normalización de Control y Fomento Sanitario
SEMARNAT	Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales
t	Tiempo
Ti	Titanio
V	Velocidad de descarga o de flujo
V	Vanadio
V_s	Velocidad media de filtración lineal
V_v	Volumen de los espacios vacíos
V_m	Volumen total de la muestra
Zn	Zinc
$\partial C/\partial x$	Gradiente de concentración del contaminante
$(\partial C/\partial t)_r$	Degradación del contaminante
α_L	Dispersividad longitudinal
α_T	Dispersividad transversal
τ	Coefficiente de tortuosidad (razón de la longitud real de recorrido de la partícula para unir dos puntos del medio poroso y la longitud en línea recta que existe entre dichos puntos, generalmente es menor que 1.
Θ	Contenido de agua volumétrico
ρ_b	Densidad aparente del suelo

1. INTRODUCCIÓN

De acuerdo con el índice de calidad del agua (ICA), el río Lerma está altamente contaminado. Hasta el 2010 se tenían detectadas 375 descargas industriales y los efluentes de más de 700 industrias (Comisión Nacional del Agua y Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2018). Diversos autores (Avila-Pérez *et al.*, 2011; Barceló-Quintal *et al.*, 2013a; Zarazúa *et al.*, 2011) determinaron que los metales pesados son la principal fuente de contaminación del río Lerma, entre los cuales destacan: hierro, manganeso, cobre, cromo, plomo, zinc, potasio, titanio, vanadio, calcio y azufre. Lo anterior representa un riesgo al medio ambiente y a los seres vivos, porque estas aguas son destinadas al uso doméstico, agrícola, pecuario, industrial y para la generación de energía eléctrica (Zarazúa *et al.*, 2013). Los metales pesados solubles, pueden introducirse en el agua subterránea como consecuencia de actividades naturales, como la lixiviación, o por actividades humanas. Cuando se introduce un contaminante en un medio poroso (suelo), su destino y concentración están controlados por procesos físicos, químicos y bioquímicos que ocurren entre el contaminante y los constituyentes del subsuelo (Barceló y Kostianoy, 2017).

El transporte de contaminantes en el suelo considera dos elementos fundamentales: el agua como medio de transporte y los solutos como agentes transportados. Establecer un vínculo entre ambos elementos es importante para comprender cómo se desarrolla la pluma contaminante, cómo se espera que evolucione en el futuro y, cómo plantear una estrategia de recuperación del suelo.

Existen métodos numéricos con elementos finitos o diferencias finitas que permiten simular problemas de transporte de contaminantes en el subsuelo. El Método de Elementos Finitos (MEF)

es un método aproximado de discretización de los problemas continuos, en donde el continuo se divide en un número finito de partes, llamados elementos, cuyo comportamiento se especifica mediante un parámetro asociado a puntos característicos, llamados nodos. En cambio, el Método de Diferencias Finitas (MDF) consiste en obtener una solución aproximada de ecuaciones diferenciales definidas en dominios finitos o región de trabajo (Lara-Romero *et al.*, 2019).

El objetivo principal de esta tesis de maestría es evaluar si el plomo soluble que se encuentra en el río Lerma se transporta, mediante flujo de agua subterránea, hacia la ribera izquierda del río, ubicado en el municipio de San Mateo Atenco (Estado de México). Se estudia solamente esta ribera por el impacto que la concentración excesiva de contaminación puede tener sobre las personas que ahí habitan y también en las hortalizas que se siembran en esa zona. No se centra la atención en la otra ribera (derecha) porque no está habitada, sino que se ocupa como vía de comunicación. El presente trabajo pretende contribuir a las investigaciones relacionadas con la contaminación del río Lerma y municipios aledaños y, por otra parte, identificar los parámetros que tienen mayor influencia en el estudio del transporte de contaminantes.

Este trabajo se compone de cinco capítulos, incluyendo la introducción como Capítulo 1. En el Capítulo 2 se describe la importancia de la geotecnia ambiental y su aplicación en el aprovechamiento de recursos hídricos. Se presentan las normas mexicanas relacionadas con el tema de contaminación del agua y suelo, se especifican los valores admisibles de contaminantes. Por último, se definen conceptos fundamentales para el transporte de contaminantes.

En el Capítulo 3 se resumen los temas fundamentales del transporte de contaminantes en suelos saturados. Al respecto, se presenta la ecuación de transporte de contaminantes, los procesos de transporte y de atenuación. Se detallan los conceptos básicos sobre flujo de agua en medios saturados y no saturados, confinados o no confinados, transitorios o estables. Se mencionan las distintas condiciones de frontera que son utilizadas en este tipo de análisis. Al final, se mencionan las posibles fuentes contaminantes y las consecuencias de la contaminación del agua y suelo.

En el Capítulo 4 se implementa el modelado numérico de transporte de solutos, utilizando el método de advección-dispersión, para analizar el transporte de plomo soluble desde el cauce hacia la ribera y determinar si los niveles de concentración de plomo soluble se encuentran dentro de los límites permisibles establecidos en la normativa mexicana. Al inicio del capítulo se plantea la problemática y las condiciones geotécnicas del sitio en estudio; cabe destacar, que la margen de interés es la izquierda porque es en donde el suelo tiene un uso agrícola. También se describen de forma detallada los parámetros geotécnicos y geoquímicos necesarios para realizar un análisis de transporte de contaminantes. También se establece el criterio de selección del contaminante y la concentración de plomo soluble utilizada en los análisis. Finalmente, se presentan los resultados de la modelación numérica ejecutada con los módulos de GeoSlope: SEEP/W y CTRAN/W.

Finalmente, en el Capítulo 5 se presentan las conclusiones generales y las recomendaciones para futuras aplicaciones.

2. GEOTECNIA Y MEDIO AMBIENTE

2.1 Importancia de la geotecnia ambiental

La integración de la geotecnia clásica y las ciencias medioambientales da origen a la geotecnia ambiental, cuyo fin es utilizar técnicas de construcción que permitan evitar o remediar la contaminación del suelo y del agua que constituyen nuestro entorno. Los estudios geotécnicos-ambientales buscan caracterizar materiales para conocer el alcance que tienen los contaminantes y diseñar barreras de impermeabilización y contención de contaminantes para la protección del ambiente; utilizando para ello ensayos geotécnicos clásicos, análisis químicos o análisis mineralógicos.

En la ingeniería geotécnica y ambiental el agua es un recurso de interés, sea superficial o subterránea. Este recurso puede modificar los estados de esfuerzos del suelo, transportar minerales y contaminantes a través de los poros de la masa de suelo y, así modificar las propiedades geotécnicas o generar afectaciones ambientales. La adsorción, disolución y filtración son procesos de transporte de contaminantes en el subsuelo y son estudiados por la geotecnia ambiental.

Las obras geotécnicas involucran movimientos de masas de suelo, sea por excavaciones, construcción de terraplenes, cimentaciones de edificaciones, muros de contención, carreteras, etc. Los efectos ambientales de las obras geotécnicas dependen del tipo de obra, por ejemplo, las obras viales (carreteras y vías férreas) abren nuevas oportunidades de movilización comercial, permiten

el acceso de comunidades aisladas a la vida moderna y, en general, representan un beneficio para la sociedad. No obstante, las obras viales alteran el equilibrio de la naturaleza al penetrar en zonas que eran inaccesibles, generando la depredación de flora y fauna, propician la migración de especies, modifican la topografía e hidrología y favorecen la erosión del suelo o fallas geotécnicas.

El aprovechamiento de los recursos hídricos es un tema de estudio de la geotecnia ambiental, sea su explotación o preservación. La explotación del agua subterránea ocasiona modificaciones geohidrológicas, por ejemplo, la disminución de los niveles piezométricos. Lo anterior tiene consecuencias ambientales, las cuales pueden ser: desecación superficial, hundimientos y agrietamientos del terreno. El Valle de México ejemplifica tal situación, dada la gradual explotación de los acuíferos, está sufriendo hundimientos excesivos anualmente.

La preservación del medio ambiente se refiere a mantener el medio en su estado original, libre de alteraciones. Sin embargo, cuando se adaptan las condiciones naturales de un medio a uno nuevo y mejorado, en equilibrio permanente y sin crear un deterioro, se llama conservación. Este último es el objetivo de los estudios de la geotecnia ambiental. Es importante señalar que, en la actualidad, la sociedad es más consciente sobre las implicaciones que tiene la construcción de una obra civil y las alteraciones al medio ambiente. Por ello, existen normas que regulan estos aspectos, las cuales se describen a continuación (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 1991).

2.2 Políticas ambientales en México

En 1988 se promulgó la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), la cual es la base de la política ambiental en el país. Su objetivo es propiciar el desarrollo sustentable y establecer las bases para garantizar el derecho de toda persona a vivir en un medio ambiente sano para su desarrollo, salud y bienestar; la preservación, restauración y mejoramiento del medio ambiente; el aprovechamiento, la preservación y restauración del suelo, agua y demás recursos naturales, entre otros.

En el artículo 6, la LGEEPA (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2021) menciona que la autoridad a quien le corresponde aplicar las leyes y reglamentos en materia ecológica y ámbito federal es a la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). La NOM-001-SEMARNAT-2021 (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2022) establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. De acuerdo con esta normativa, los contaminantes básicos son aquellos compuestos y parámetros que se presentan en las descargas de aguas residuales y que pueden ser removidos o estabilizados mediante tratamientos convencionales.

Por otra parte, los metales pesados y cianuros son aquellos contaminantes que, en concentraciones por encima de los determinados límites, pueden producir efectos negativos en la salud humana, flora o fauna. Como se observa en la Tabla 2.1, la NOM-001-SEMARNAT-2021 proporciona los límites de concentración permitida de los siguientes metales pesados: arsénico, cadmio, cobre, cromo, mercurio, níquel, plomo, zinc y cianuro.

Tabla 2.1 Límites máximos permisibles para metales pesados y cianuro (NOM-001-SEMARNAT-2021)

Parámetros (miligramos por litro)	Suelo								
	Riego de áreas verdes			Infiltración y otros riegos			Cárstico		
	P. M.	P. D.	V. I.	P. M.	P. D.	V. I.	P. M.	P. D.	V. I.
Arsénico	0.200	0.300	0.400	0.100	0.150	0.200	0.100	0.150	0.200
Cadmio	0.050	0.075	0.100	0.100	0.150	0.200	0.050	0.075	0.100
Cianuros	2.000	2.500	3.000	1.000	1.500	2.000	1.000	1.500	2.000
Cobre	4.000	5.000	6.000	4.000	5.000	6.000	4.000	5.000	6.000
Cromo	0.500	0.720	1.000	0.500	0.750	1.000	0.500	0.750	1.000
Mercurio	0.005	0.008	0.010	0.005	0.008	0.010	0.005	0.008	0.010
Níquel	2.000	3.000	4.000	2.000	3.000	4.000	2.000	3.000	4.000
Plomo	0.500	0.750	1.000	0.200	0.300	0.400	0.200	0.300	0.400
Zinc	10.000	15.000	20.000	10.000	15.000	20.000	10.000	15.000	20.000

P.D. = Promedio diario; P.M. = Promedio mensual; V. I. = Valor instantáneo

La Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021 (Secretaría de Salud, 2021) establece los límites permisibles de calidad que debe cumplir el agua para su uso y consumo humano. Estas especificaciones incluyen la concentración de metales en estado suspendido y disueltos en el agua. Por otra parte, la Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2007) establece los criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y vanadio. En la Tabla 2.2 se muestran las concentraciones de referencia de contaminantes solubles.

Tabla 2.2 Referencia de límites permisibles de contaminantes solubles

Parámetros	Límite permisible (mg/l)	
	NOM-127-SSA1-2021	NOM-147-SEMARNAT/SSA1-204
Aluminio	0.200	0.500
Arsénico	0.025	---
Bario	1.300	10.00
Cadmio	0.005	0.100
Cobre	2.000	---
Cromo total	0.050	---
Hierro	0.300	---
Manganeso	0.150	---
Mercurio	0.006	0.020
Níquel	0.070	1.100
Plomo	0.010	0.500
Selenio	0.040	0.100
Berilio	---	0.122
Plata	---	0.500
Talio	---	0.020
Vanadio	---	0.160

De acuerdo con la Norma Mexicana NMX-AA-051-SCFI-2016 (Secretaría de Economía, 2021), los efectos de los metales que se encuentran en las aguas naturales potables, residuales y residuales tratadas sobre la salud humana pueden ser: benéficos, causantes de problemas o tóxicos. Esta clasificación depende del tipo de material y de su concentración, por lo que su cuantificación en cuerpos de agua es importante. Dicha normativa propone el método de espectrofotometría de absorción atómica en aguas naturales, potables y residuales; el procedimiento se basa en la generación de átomos en estado basal y en la medición de la cantidad de energía absorbida por estos, la cual es directamente proporcional a la concentración de ese elemento en la muestra analizada.

La norma NMX-AA-132-SCFI-2016 (Secretaría de Economía, 2016) establece las especificaciones generales para el muestreo de suelos, cuyo contenido de metales y metaloides requiere ser identificado y cuantificado, sin embargo, reconoce que los programas de muestreo dependen de las características específicas del sitio en estudio.

2.3 Marco conceptual

Conceptos sobre medio ambiente (LGEEPA, 2021):

- *Ambiente*. El conjunto de elementos naturales y artificiales o inducidos por el hombre que hacen posible la existencia y desarrollo de los seres humanos y demás organismos vivos que interactúan en un espacio y tiempo determinado.
- *Contaminante*. Toda materia o energía en cualesquiera de sus estados físicos o formas, que al incorporarse o actuar en la atmosfera, agua, suelo, flora, fauna o cualquier elemento natural, altere o modifique su composición y condición natural.
- *Preservación*. El conjunto de políticas y medidas para mantener las condiciones que propicien la evolución y continuidad de los ecosistemas y habitat naturales, así como conservar las poblaciones viables de especies en sus entornos naturales y los componentes de la biodiversidad fuera de sus hábitats naturales.

Conceptos sobre metales pesados (NMX-AA-051-SCFI-2016):

- *Metales suspendidos*. Son aquellos metales en estado suspendido los cuales son retenidos por una membrana de poro de 0.45 μ .
- *Metales disueltos*. Son aquellos metales en disolución en muestras no acidificadas o en estado coloidal que pasan a través de una membrana de poro de 0.45 micra.
- *Metales totales*. Es la suma de las concentraciones de metales en ambas fracciones de una muestra, disueltos y suspendidos. Estos pueden ser determinados en una muestra sin filtrar que previamente ha sido digerida vigorosamente con ácido para solubilizar completamente a los metales a determinar.

Conceptos sobre muestreo de suelos contaminados (NMX-AA-132-SCFI-2016):

- *Área de estudio.* Son aquellas superficies en donde se encuentran las zonas que están dentro de la influencia de la contaminación.
- *Perfil de suelo.* Sección vertical del terreno que permite identificar los horizontes en el suelo a partir de la superficie, los cuales forman una serie de estratos con propiedades diferentes.
- *Suelo.* Material no consolidado, de origen natural, compuesto por partículas inorgánicas, materia orgánica, agua, aire y organismos, que incluye aquel alterado por actividades antropogénicas.
- *Suelo expuesto.* Suelo que no esté cubierto por concreto, asfalto o materiales similares no naturales.

Conceptos relacionados con flujo de agua (López-Acosta, 2017):

- *Permeabilidad:* Se refiere a un fluido que circula a través del medio poro, generalmente se llama permeabilidad o conductividad hidráulica cuando tal fluido es agua. Cuando el fluido no se especifica se denomina coeficiente de permeabilidad.
- *Permeabilidad saturada:* Se refiere a la permeabilidad que se presenta cuando el estado de suelo es saturado, tal permeabilidad está en función del grado de saturación o de la succión.
- *Permeabilidad equivalente:* En suelos heterogéneos, anisótropos y discontinuos la permeabilidad presenta una gran variabilidad natural (variando hasta en ordenes de magnitud) y por ello se han establecido fórmulas para determinar una permeabilidad equivalente, en algunos casos se considera como la media geométrica obtenida de los valores de permeabilidad en dirección x y en dirección y, en otros casos se requiere determinar permeabilidades máximas y mínimas.
- *Función de retención:* También llamada función de almacenamiento o curva característica, dependiendo de si la succión se expresa en términos del grado de saturación o del contenido de agua volumétrico, respectivamente.
- *Función hidráulica:* También llamada función de permeabilidad. Representa la succión en función de la permeabilidad.

Conceptos relacionados con transporte de contaminantes:

- *Tortuosidad:* En un medio poroso, es un parámetro físico de los flujos hidráulicos y corrientes eléctricas. Es la razón entre la longitud real que debe recorrer una partícula fluida para unir dos puntos en el medio poroso y la distancia en línea recta entre dichos puntos.
- *Advección:* Proceso de transporte que se refiere al arrastre de las partículas contaminantes en la misma dirección y velocidad que el medio de transporte (agua).
- *Difusión:* Proceso de transporte de contaminantes en donde las partículas contaminantes se transportan de la zona de mayor concentración a una zona de menor concentración debido a los movimientos aleatorios a nivel molecular.
- *Sorción:* Proceso físico-químico en el cual una sustancia se adhiere a otra, mediante los procesos de adsorción o absorción.

- *Adsorción*: Proceso en el que un compuesto soluble (adsorbato) se remueve de la solución por contacto con una superficie sólida (adsorbente).
- *Absorción*: A diferencia de la adsorción, la absorción es un proceso en el que un compuesto soluble (adsorbato) pierde intensidad (ocurre el proceso de difusión) al atravesar un medio.
- *Degradación o descomposición*: Se refiere a transformar una sustancia compleja en otra de estructura sencilla. La transformación ocurre mediante procesos, físicos, químicos o biológicos.
- *Dispersión mecánica*: Es el movimiento longitudinal o transversal del fluido en el medio poroso.
- *Dispersión longitudinal*: Ocurre cuando el movimiento del fluido es de forma longitudinal.
- *Dispersión transversal*: Ocurre cuando el movimiento del fluido es perpendicular, debido a la bifurcación de los caminos que este encuentra. En magnitud, la dispersión transversal es menor que la dispersión longitudinal (por lo que la mancha contaminante adquiere la forma alargada en el sentido del flujo).
- *Dispersión hidrodinámica*: Es la acción conjunta del proceso de difusión y del proceso de dispersión mecánica.

Conceptos relacionados con geotecnia:

- *Porosidad*: se representa como n , es la relación entre el volumen de vacíos y el volumen total de la muestra de suelo. En general, se expresa como un porcentaje y puede variar de 0% (sólo fase sólida) a 100% (espacio vacío).
- *Relación de vacíos*: se representa como e , representa la relación entre el volumen de vacíos y el volumen de sólidos. Teóricamente puede variar de 0 a infinito.
- *Grado de saturación*: se representa como S , es la relación entre el volumen del agua en los espacios vacíos y el volumen de vacíos. En general, se expresa como porcentaje. Esta relación puede variar entre 0% (suelo seco) y 100% (suelo totalmente saturado).
- *Densidad*: se representa como ρ , se define como la masa por unidad de volumen.
- *Densidad de sólidos*: También llamada gravedad específica, representada como G_s , es la relación entre la densidad de un material y la densidad del agua a 4°C.
- *Contenido de agua gravimétrico*: se representa como w , se define como la relación entre el peso del agua y el peso de la materia sólida de una muestra de suelo. Se expresa en porcentaje y teóricamente puede variar de 0% a infinito.
- *Contenido de agua volumétrico*: se representa como θ , se define como la relación entre el volumen de agua y el volumen total de una muestra de suelo. Teóricamente, su valor varía de 0% (suelo seco) a 100% (indica únicamente presencia de agua).

3. MARCO TEÓRICO

3.1 Flujo de agua en el suelo

3.1.1 Consideraciones generales

El flujo de agua a través de un medio poroso puede ser de dos tipos: laminar o turbulento. En el primer caso, las partículas se mueven en trayectorias definidas sin intersecar la trayectoria de otras y generalmente se presenta en suelos de grano fino. En cambio, en un flujo turbulento las partículas tienen un movimiento desordenado, en diferentes direcciones y entrecruzándose, este tipo de flujo es más común en rocas fracturadas, gravas y arenas gruesas. El flujo laminar se presenta a velocidades bajas y a medida que esta aumente, se puede convertir en un flujo turbulento. No obstante, es común que los análisis de flujo sean de forma bidimensional, considerando un ancho unitario en aquellas estructuras de gran longitud transversal al flujo. Lo anterior se realiza con la finalidad de reducir el grado de complejidad de los análisis de flujo de agua.

Según sea el tipo de problema de flujo de agua a resolver, este puede ser de las siguientes formas: de flujo confinado o de flujo no confinado. En un flujo confinado, se conocen todas las condiciones de fronteras del caso en estudio: frontera suelo infiltrado – suelo impermeable, frontera suelo infiltrado – aire, frontera agua – suelo infiltrado y frontera suelo infiltrado – suelo permeable no infiltrado. Mientras que, en un flujo no confinado una de las condiciones de fronteras es desconocida. En general, la frontera desconocida es la frontera suelo infiltrado – suelo permeable

no infiltrado, también llamada línea de corriente superior y debe determinarse como parte de la solución del problema planteado. Los problemas de flujo no confinado se conocen como problemas de superficie o fronteras libres. En la Figura 3.1 se muestran los tipos de fronteras previamente mencionados.

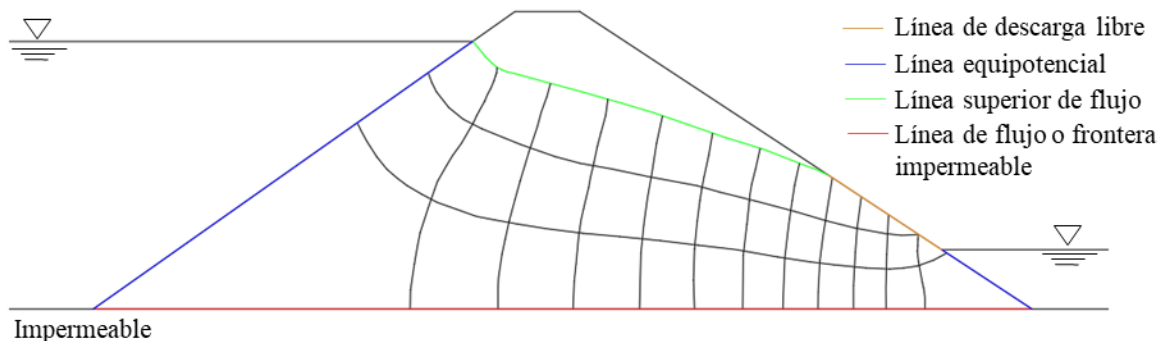


Figura 3.1 Tipos de fronteras que se presentan en un flujo no confinado (López Acosta, 2017)

Por otra parte, cuando las características del flujo de agua no varían con el tiempo, representa un problema de flujo establecido o estacionario; la ecuación que permite estudiarlos se basa en la Ley de Darcy y en el principio de continuidad de flujo (la cantidad de agua que entra en un medio es la misma que sale) y se denomina ecuación de Laplace:

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = 0 \quad 3.1$$

La ecuación anterior se cumple bajo las siguientes hipótesis:

- El suelo está saturado.
- El agua y el suelo son incompresibles.
- El flujo no modifica la estructura del suelo en ninguna forma, no se presenta inyección o extracción de agua.

La forma de resolver la ecuación 3.1 puede ser:

- Analítica (solución exacta, método de los fragmentos, elementos de frontera).
- Soluciones gráficas (redes de flujo, teoría de la transformada, método del seno y tangente).
- Soluciones numéricas (elementos y diferencias finitos) y modelos físicos (modelos de laboratorio o analógicos).

Las características de las condiciones de frontera para un análisis de flujo de agua establecido se muestran en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Condiciones de frontera en flujo de agua establecido (López Acosta, 2017)

Nombre	Tipo	Características
Frontera suelo infiltrado – Suelo impermeable	Línea de flujo (Frontera impermeable)	A través de esa frontera el agua no puede fluir; las componentes normales de la velocidad son nulas a lo largo de ella; define una frontera de flujo; toda la línea de flujo se considera una frontera impermeable.
Frontera agua – suelo infiltrado	Línea equipotencial	La distribución de la presión puede considerarse hidrostática; a lo largo de toda la frontera se debe cumplir la condición $H=Constante$ (H es la carga hidráulica).
Frontera suelo infiltrado – suelo no infiltrado	Línea de corriente o línea superiores de flujo	Las componentes de la velocidad normal a dicha línea son nulas; la presión es constante a lo largo de la línea y es igual a la atmosférica; se cumple la condición $H=h_z$ (carga hidráulica = carga de posición); entre líneas equipotenciales que intersequen la LCS se debe tener el mismo incremento de carga hidráulica.
Frontera suelo infiltrado – aire	Línea de descarga libre o línea de superficie libre	La presión es constante a lo largo de la línea y es igual a la atmosférica; se cumple la condición; se cumple la condición $H=h_z$ (carga hidráulica = carga de posición); entre líneas equipotenciales que intersequen la línea de descarga libre se debe tener el mismo incremento de carga hidráulica; no es una línea de flujo ni equipotencial, por lo tanto, puede ser atravesada por vectores de velocidad o bien, intersecada por líneas de flujo o equipotenciales.

Cuando los niveles de agua varían con el tiempo, el flujo se considera transitorio, y en este caso, ocurre un proceso de almacenamiento o desalmacenado de agua en el medio en estudio. Para resolver este tipo de problemas se establece la ecuación de balance de masas (ecuación 3.2), misma que se deriva de la ecuación de Richards:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + q = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad 3.2$$

donde H es la carga hidráulica total (m), k_x se refiere a la permeabilidad en la dirección x ($m s^{-1}$), k_y es la permeabilidad en dirección y ($m s^{-1}$), q representa la inyección o extracción ($m^3 s^{-1} m^{-2}$), θ es el contenido de agua volumétrico ($m^3 m^{-3}$) y t es el tiempo (s). Algunos valores de permeabilidad según el tipo de suelo o tipo de drenaje se presentan en las Tabla 3.2 y Tabla 3.3.

Tabla 3.2 Permeabilidad k en algunos suelos naturales (Strack, 2017)

Tipo de suelo	m/s	cm/s
Arcilla	$<8.64 \times 10^{-5}$	$<1 \times 10^{-7}$
Arcilla arenosa	$8.64 \times 10^{-5} - 8.64 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-7} - 1 \times 10^{-6}$
Turba	$8.64 \times 10^{-5} - 8.64 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-7} - 1 \times 10^{-5}$
Limo	$8.64 \times 10^{-4} - 8.64 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-6} - 1 \times 10^{-5}$
Arena muy fina	0.086 – 0.864	$1 \times 10^{-4} - 1 \times 10^{-3}$
Arena fina	0.864 – 8.64	$1 \times 10^{-3} - 1 \times 10^{-2}$
Arena gruesa	8.64 – 86.4	$1 \times 10^{-2} - 1 \times 10^{-1}$
Grava con arena	86.4– 864	$1 \times 10^{-1} - 1 \times 10^0$
Grava	>864	$>1 \times 10^0$

Tabla 3.3 Valores del coeficiente de permeabilidad (Flores-Berrones, 2000)

Permeabilidad, k (cm/s)										
10^2	10^1	1.0	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}
Buen drenaje						Mal drenaje			Prácticamente impermeable	
Secciones permeables de presas y diques						Secciones impermeables de presas y diques				
Grava limpia	Arenas limpias y mezclas de grava y arena limpia				Arenas muy finas, limos orgánicos e inorgánicos, mezclas de arena, limo y arcillas; depósitos estratificados de arcillas.				Suelos impermeables, por ejemplo: arcillas homogéneas	

La solución de la ecuación 3.2 puede ser de forma analítica, mediante soluciones gráficas (redes de flujo transitorias), soluciones numéricas (elementos finitos y diferencias finitas) y modelos físicos (modelos de laboratorio) o soluciones estocásticas. El fenómeno de vaciado y llenado rápido de presas de tierra, bordos, diques o terraplenes es un ejemplo de un flujo transitorio. En este caso, las condiciones de frontera del problema corresponden a las mencionadas en la Tabla 3.1 y se encuentran en función del tiempo. En la Figura 3.2 se observa como la línea de corriente superior varía respecto al tiempo (flujo transitorio) hasta que logra establecerse (flujo establecido).

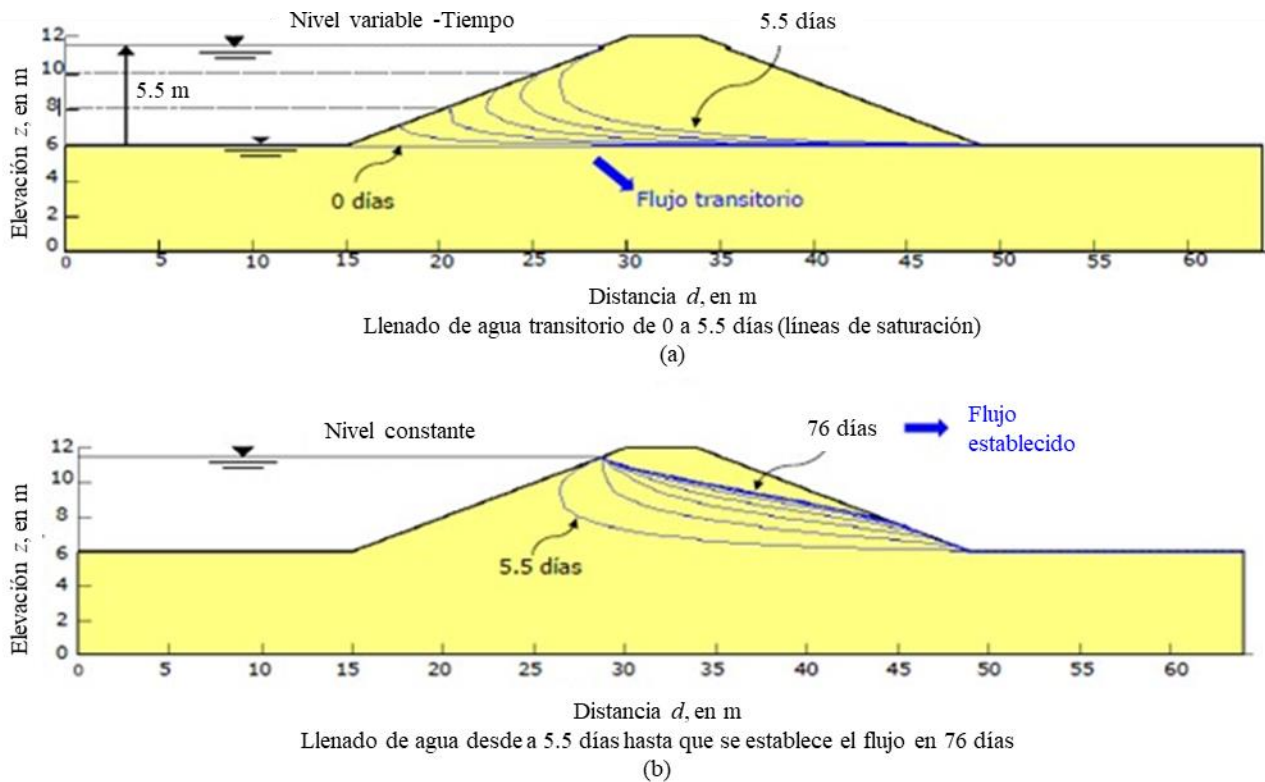


Figura 3.2 Ejemplo de cambios en la línea de corriente superior (López Acosta, 2017)

3.1.2 Soluciones analíticas y numéricas

Las soluciones analíticas son de uso limitado, ya que solo existen para casos sencillos de flujo de agua, los cuales no representan las complejidades que pueden darse en casos reales. Por otra parte, los métodos numéricos son soluciones aproximadas a problemas de flujo de agua complejos, ya sea en estado establecido o transitorio. Para comenzar a resolver el problema, es importante limitar la región de flujo que se quiere estudiar y posteriormente, asignar las condiciones de frontera de acuerdo con tipo de flujo que se desee analizar. Enseguida, se especifican los parámetros de los materiales, los cuales dependen del tipo de análisis:

- *Flujos establecidos*: permeabilidad saturada.
- *Flujos transitorios*: permeabilidad relativa, grado de saturación, porosidad, tiempo, volumen de recarga o extracción.

Es importante señalar que, los datos más importantes para realizar un análisis de flujo de agua son los parámetros hidráulicos de los materiales. Cuando se estudian suelos parcialmente saturados, se requiere conocer la función de almacenamiento (función de retención de agua o curva característica) y la función de conductividad hidráulica (función de permeabilidad).

Existen diversos programas comerciales que permiten resolver problemas de flujo de agua, entre los que destacan PLAXFLOW, SEEP/W y SVFLUX. En este trabajo, el caso de estudio se resuelve utilizando SEEP/W. Este software utiliza el método del elemento finito y admite análisis de

filtración de agua subterránea y resuelve problemas de disipación del exceso de presión del agua intersticial dentro de materiales porosos como el suelo. Además, SEEP/W permite modelar flujos saturados estacionarios, suelos parcialmente saturados y procesos dependientes del tiempo como la infiltración debido a la precipitación.

3.2 Flujo de contaminantes en suelos saturados

3.2.1 Ecuación de transporte de solutos

La distribución de los contaminantes en el subsuelo es consecuencia de los procesos de transporte de masas y transferencia de masas. En el transporte de masa, los procesos que afectan al flujo de contaminantes en el agua son: advección, dispersión, adsorción y degradación (ver inciso 3.2.2). Dichos procesos son considerados en la ecuación general de transporte de contaminantes para zonas saturadas, en un medio homogéneo, isótropo y unidimensional, como se muestra a continuación:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - V_s \frac{\partial C}{\partial x} - \frac{\rho_b}{n} \frac{\partial C_s}{\partial t} + \left(\frac{\partial C}{\partial t} \right)_r \quad 3.3$$

(dispersión) (advección) (adsorción) (degradación)

donde D es el coeficiente de dispersión hidrodinámica, V_s la velocidad media de filtración lineal del agua subterránea, ρ_b es la densidad aparente del suelo, n es la porosidad, C es la concentración del contaminante, C_s es la concentración adsorbida, t es el tiempo y $\left(\frac{\partial C}{\partial t} \right)_r$ corresponde al término para degradación (Iturbe-Arguelles, 2014).

Sin considerar las reacciones fisicoquímicas (dispersión y degradación), en un medio heterogéneo, isótropo y bidimensional, la ecuación de transporte solutos se expresa de la siguiente forma (Allan-Freeze y Cherry, 1979):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_l \frac{\partial^2 C}{\partial s_l^2} + D_t \frac{\partial^2 C}{\partial s_t^2} - v \frac{\partial C}{\partial s_l} \quad 3.4$$

donde s_l y s_t son las direcciones del flujo de agua y la normal a estas líneas, respectivamente.

Para resolver un problema de flujo de contaminantes, se requiere conocer que parámetros influyen, por tanto, en la Tabla 3.4 y Tabla 3.5 se presentan los parámetros requeridos según el proceso y tipo de flujo de agua.

Tabla 3.4 Recopilación de parámetros requeridos según el proceso de transporte – Flujo estacionario

Procesos de transportes	Con base en	Fórmulas	Parámetros		
			Simbología y descripción		Unidades
Advección	Ley de Darcy	$F_v = n_e v_s C$ $F_v = v C$ $F_v = k i C$	n_e	Porosidad efectiva	adimensional
			v_s	Velocidad media de filtración lineal	longitud/tiempo
			C	Concentración de los contaminantes disueltos	masa/volumen
			v	Velocidad de Darcy (velocidad de descarga), ki	longitud/tiempo
			k	Coefficiente de conductividad hidráulica	longitud/tiempo
			i	Gradiente hidráulico	adimensional
			F_v	Flujo másico debido a la advección	masa/tiempo-longitud ²
Difusión	1ra Ley de Fick	$J = -D^* \frac{\partial c}{\partial x}$ $D^* = \tau D_0$ $\tau = \frac{L_1}{L_2}$	J	Flujo másico debido a la difusión	masa/tiempo-longitud ²
			D^*	Coefficiente de difusión efectivo	longitud ² /tiempo
			$\partial C/\partial x$	Gradiente de concentración del contaminante	
			τ	Coefficiente de tortuosidad	adimensional
			D_0	Coefficiente del contaminante	longitud ² /tiempo
			L_1	Recorrido real de la partícula para llegar de un punto a otro	Longitud
			L_2	Distancia en línea recta del punto inicial al punto final del recorrido de la partícula	Longitud
Dispersión mecánica		$D_L = \alpha_L v_s$ $D_T = \alpha_T v_s$	D_L	Coefficiente de dispersión longitudinal	longitud ² /tiempo
			α_L	Dispersividad longitudinal	longitud
			v_s	Velocidad media de filtración lineal	longitud/tiempo
			D_T	Coefficiente de dispersión transversal	longitud ² /tiempo
			α_T	Dispersividad transversal	longitud

Tabla 3.5 Recopilación de parámetros requeridos según el proceso de transporte – Flujo no estacionario

Procesos de transportes	Con base en	Fórmulas	Parámetros		
			Simbología y descripción		Unidades
Difusión	2da Ley de Fick	$C(x, t) = C_0 \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{D^*t}}\right)$	$C(x, t)$	Concentración en la distancia "x" después de un tiempo "t"	masa/volumen
			C_0	Concentración inicial del contaminante	masa/volumen
			$\operatorname{erfc}(u)$	Función error	
			x	Distancia recorrida	Longitud
			t	Tiempo	Tiempo
Dispersión hidrodinámica		$D^*_L = \alpha_L v_s + D^*$ $D^*_T = \alpha_T v_s + D^*$	D^*_L	Coficiente de dispersión hidrodinámica longitudinal	longitud ² /tiempo
			D^*_T	Coficiente de dispersión hidrodinámica transversal	longitud ² /tiempo
			α_L	Dispersividad longitudinal	longitud
			v_s	Velocidad media de filtración lineal	longitud/tiempo
			α_T	Dispersividad transversal	longitud
			D^*	Coficiente de difusión efectivo	longitud ² /tiempo

3.2.2 Procesos de transporte en suelos

3.2.2.1 Advección

La advección, también conocida como transporte advectivo, se refiere al arrastre del contaminante por el agua que fluye en respuesta a un gradiente hidráulico. Las partículas contaminantes siguen la dirección y velocidad del flujo. Para un flujo laminar en estado estacionario su cálculo se basa en la ley de Darcy, la cual establece la relación entre el caudal que atraviesa un medio poroso y las características del medio como:

$$Q = VA \quad 3.5$$

$$V = ki \quad 3.6$$

donde Q es el gasto o caudal ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$), A el área transversal por donde ocurre el flujo (m^2), V es la velocidad de descarga (m s^{-1}), k corresponde a la conductividad hidráulica (m s^{-1}) e i es el gradiente hidráulico (adimensional), este último se refiere a la pérdida de carga por unidad de longitud.

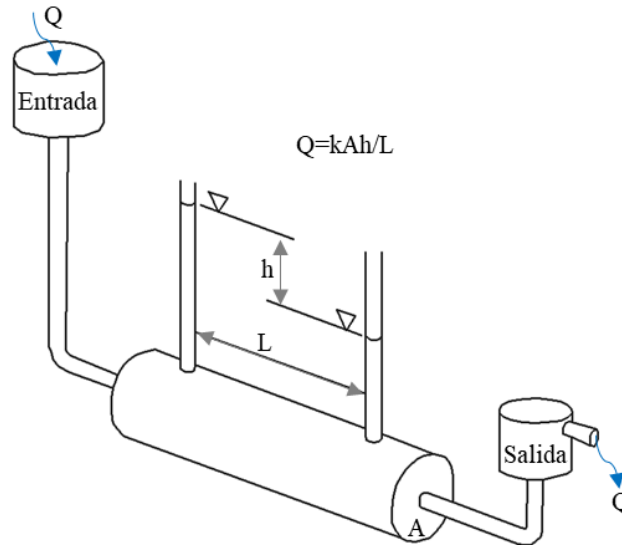


Figura 3.3 Ley de Darcy

La velocidad de la ecuación 3.5 corresponde a la velocidad en todo el medio, el área utilizada incluye a los sólidos y vacíos del medio poroso. Así, la velocidad con la que una partícula del fluido se desplaza en el medio poroso, velocidad de filtración lineal, se calcula de la siguiente forma:

$$Q = VA = V_s A_v \quad 3.7$$

$$V_s = V \frac{A}{A_v} \quad 3.8$$

donde A_v se refiere al área transversal efectiva de flujo (m^2) y V_s es la velocidad de filtración lineal ($m s^{-1}$).

Otra propiedad del suelo relacionada con el flujo de agua y contaminantes es la porosidad (adimensional), la cual relaciona el volumen de los espacios vacíos, V_v (m^3) y el volumen total de la muestra, V_m (m^3), de la siguiente forma:

$$n = \frac{V_v}{V_m} \quad 3.9$$

Considerando que el volumen total de la muestra es igual al producto de la longitud total del estrato donde ocurre el flujo L (m), y el área transversal A (m^2) y que, el volumen de espacios vacíos es igual al producto de LA_v , la ecuación 3.9 puede reescribirse como:

$$n = \frac{V_v}{V_m} = \frac{LA_v}{LA} = \frac{A_v}{A} \quad 3.10$$

Reemplazando la ecuación 3.10 en la ecuación 3.8, obtenemos que la velocidad media de filtración lineal queda definida por:

$$V_s = \frac{V}{n} = \frac{ki}{n_e} \quad 3.11$$

donde n_e es la porosidad efectiva (adimensional). La porosidad efectiva se define como el volumen del espacio vacío que conduce la mayor parte del flujo, dividido entre el volumen total del suelo. La porosidad efectiva excluye los poros no interconectados y sin salida, por lo tanto, $n_e < n$.

En condiciones de flujo de estado estacionario unidimensional, el flujo másico de contaminantes (masa de contaminantes por unidad de área por unidad de tiempo) debido a la advección F_v (g sm^{-2}) está dado por:

$$F_v = VC = n_e V_s C \quad 3.12$$

donde C es la concentración de contaminantes disueltos (g m^{-3}). En condiciones de flujo uniforme, el transporte advectivo se describe mediante:

$$\frac{dC}{dt} = -V_s \frac{dC}{dx} \quad 3.13$$

En general, se deben conocer los siguientes parámetros de los medios porosos para realizar un análisis de transporte advectivo:

- Gradiente hidráulico.
- Conductividad y transmisividad hidráulica.
- Porosidad y porosidad efectiva.
- Rendimiento específico y capacidad de almacenamiento.

3.2.2.2 Difusión

También se le conoce como difusión molecular y se refiere al movimiento de contaminantes bajo un gradiente de concentración química, desde un área de mayor concentración hacia un área de menor concentración. Además de moverse en el sentido del flujo, la difusión puede ocurrir incluso cuando el contaminante fluye en la dirección opuesta al movimiento del flujo.

La velocidad a la que ocurre la difusión se le conoce como flujo de difusión, J (kg sm^{-2}), y se define como la cantidad de masa M (kg) que se difunde a través de un área A (m^2) por unidad de tiempo t (s). En un líquido (no contenido en un medio poroso) se expresa como:

$$J = \frac{M}{At} \quad 3.14$$

De forma diferencial:

$$J = \frac{1}{A} \frac{\partial M}{\partial t} \quad 3.15$$

La difusión en estado estacionario (a una velocidad constante con el tiempo) es calculada usando la primera ley de Fick. Si la partícula del contaminante se desplaza de un punto X_A a un punto X_B , la concentración de dicha partícula va a disminuir de C_1 a C_2 de forma lineal, como se observa en la Figura 3.4 y en la ecuación 3.16:

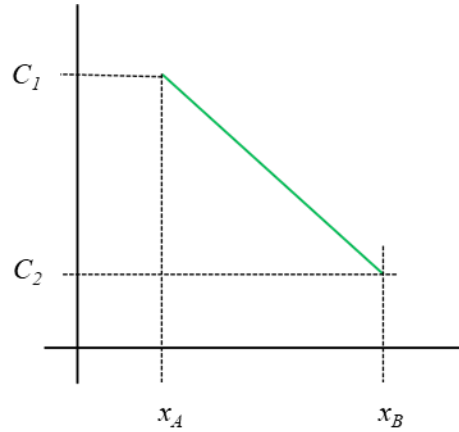


Figura 3.4 Gradiente de concentración constante

$$\text{Gradiente de concentración} = \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\Delta C}{\Delta x} = \frac{C_1 - C_2}{X_A - X_B} \quad 3.16$$

El flujo de difusión (J) es directamente proporcional al gradiente de concentración, en donde la constante de proporcionalidad es el coeficiente de difusión D_d ($m^2 s^{-1}$). La ecuación matemática que describe dicho comportamiento es:

$$J = -D_d \frac{\partial C}{\partial x} \quad 3.17$$

La ecuación 3.17 tiene signo negativo porque indica que la dirección de la difusión (J) se produce en dirección de gradiente hacia abajo, es decir, de regiones de mayor concentración a regiones de menor concentración ($\frac{\partial C}{\partial x}$).

En flujos no estacionarios, la concentración del contaminante cambia con el tiempo. En medios porosos, la difusión no puede ocurrir a la velocidad del agua porque las partículas contaminantes recorren mayor distancia mientras viajan alrededor de los minerales del suelo. Por lo tanto, en flujos no estacionarios se aplica la segunda ley de Fick:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D^* \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad 3.18$$

La variable D^* se refiere al coeficiente de difusión efectivo ($m^2 s^{-1}$) y se puede expresar como:

$$D^* = \tau D_d \quad 3.19$$

donde τ es el coeficiente de tortuosidad (adimensional) y D_d al coeficiente de difusión del contaminante ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$).

El término tortuosidad, se refiere a la razón de la longitud real de recorrido de la partícula para unir dos puntos del medio poroso y la longitud en línea recta que existe entre dichos puntos. En general, en un medio poroso es mayor que 1 porque las trayectorias de flujo que toman las moléculas deben divergir alrededor de las partículas del suelo. Asimismo, un material bien gradado tiende a tener un valor más bajo de tortuosidad que un material mal gradado. No obstante, Perkins y Johnson (1963) encontraron que la tortuosidad es igual a 0.7 en una columna de arena uniforme.

Por otra parte, la solución a la ecuación 3.18 se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$C(x, t) = C_0 \operatorname{erfc}(u) \quad ; \quad u = \frac{x}{2\sqrt{D^*t}} \quad 3.20$$

donde $C(x, t)$ es la concentración en la distancia x después de transcurrido un tiempo t , C_0 representa la concentración inicial (kg m^{-3}). En este caso, se requiere utilizar la función de error (erf) y su complementaria (erfc). Ambas funciones se denominan Gaussianas, son empleadas en probabilidad y estadística para resolver ecuaciones diferenciales parciales, se relacionan con la distribución de los errores en observaciones o mediciones experimentales. Se determinan como:

$$\operatorname{erfc}(u) = 1 - \operatorname{erf}(u) \quad 3.21$$

$$\operatorname{erf}(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u e^{-\eta^2} d\eta$$

La solución de las funciones Gaussianas puede realizarse en el programa Excel mediante las sintaxis: FUN.ERROR(u) y FUN.ERROR.COMPL(u). En la Tabla 3.6 se muestran los resultados de la ecuación 3.21.

Tabla 3.6 Tabulación de la función de error de Gauss complementaria (Fetter *et al.*, 2018)

u	$\operatorname{erf}(u)$	$\operatorname{erfc}(u)$
-3	-1.0000	2.0000
-2.5	-0.9996	1.9996
-2	-0.9953	1.9953
-1.5	-0.9661	1.9661
-1	-0.8427	1.8427
-0.5	-0.5205	1.5205
0	0.0000	1.0000
0.5	0.5205	0.4795
1	0.8427	0.1573
1.5	0.9661	0.0339
2	0.9953	0.0047
2.5	0.9996	0.0004
3	1.0000	0.0000

En la Figura 3.5 se muestra la solución de la función de error complementaria de Gauss muestra el perfil de concentración relativa de un soluto que se difunde desde una región donde la concentración es C_0 a una región donde inicialmente es cero.

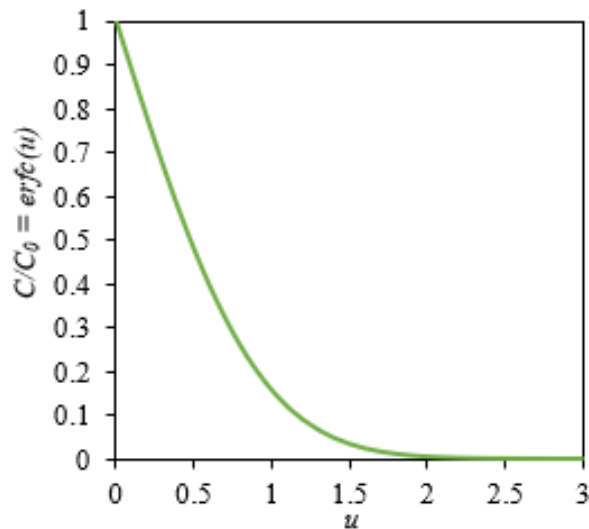


Figura 3.5. Perfil de difusión obtenido con la función de error complementaria

3.2.2.3 Dispersión

A nivel de macroescala, el transporte de contaminantes se define por la velocidad media del flujo del agua subterránea. Sin embargo, a microescala, la velocidad real del agua puede variar de un punto a otro y puede ser menor o mayor que la velocidad promedio. Esta diferencia en las velocidades del agua a microescala surge debido a:

- *Tamaño de poro.* La velocidad del flujo del agua es inversamente proporcional al tamaño del poro, lo que implica que existen velocidades más bajas en espacios porosos más grandes. Mientras que, velocidades mayores se presentan en espacios porosos más pequeños para la misma cantidad de flujo.
- *Longitud de la trayectoria.* Cuanto mayor sea la trayectoria del flujo, menor será la velocidad. La trayectoria del flujo puede ser más larga o corta según el tamaño y la distribución de las partículas.
- *Fricción en poros.* El agua que fluye cerca de los sólidos del suelo posee velocidades más bajas debido a la fricción, mientras que el agua que se aleja de los sólidos del suelo posee velocidades más altas.

Debido a las diferencias de velocidades, se producen diferentes trayectorias del flujo, tal como se observa en la Figura 3.6. Esta mezcla se llama dispersión mecánica y la mezcla que ocurre a lo largo de la dirección del flujo se denomina dispersión longitudinal. Cuando los contaminantes se propagan en direcciones normales a la dirección de la trayectoria del flujo, se le conoce como dispersión transversal. Tanto la dispersión longitudinal como la dispersión transversal son función de la velocidad media. Así, la dispersión longitudinal es:

$$D_L = \alpha_L V_s \quad 3.22$$

donde D_L se refiere al coeficiente de dispersión longitudinal ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$), α_L representa la dispersividad longitudinal (m) y V_s la velocidad media de filtración líneal (m s^{-1}). La dispersión transversal se expresa como:

$$D_T = \alpha_T V_s \quad 3.23$$

donde D_T se refiere al coeficiente de dispersión transversal ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) y α_T es la dispersividad transversal (m).

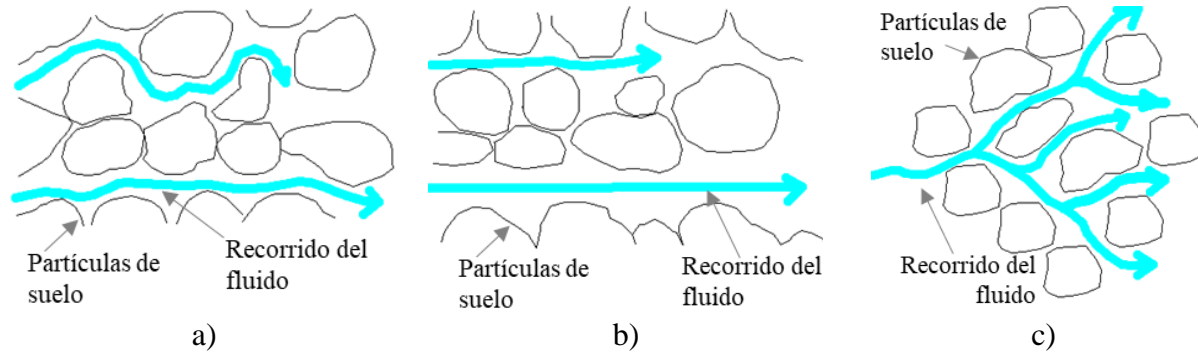


Figura 3.6 a) dispersión longitudinal por tortuosidad, b) dispersión longitudinal por amplitud de canales y c) dispersión transversal (Fetter *et al.*, 2018)

Por otra parte, a la acción conjunta del transporte de contaminantes por dispersión y el transporte mediante difusión se le llama dispersión hidrodinámica y es la causante de la dilución del soluto contaminante. Los coeficientes de dispersión hidrodinámica longitudinal y transversal, D^*_L ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) y D^*_T ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$), respectivamente, se obtienen de la siguiente forma:

$$D^*_L = \alpha_L V_s + D^* \quad 3.24$$

$$D^*_T = \alpha_T V_s + D^* \quad 3.25$$

Según Iturbe Argüelles (2014), cuando la contaminación llega a la zona saturada se forma una pluma contaminante o mancha (Figura 3.7), la cual va en dirección del flujo de agua y la concentración disminuye en la misma dirección.

La ecuación que se utiliza para modelar la mancha o pluma contaminante considera únicamente los procesos de advección y dispersión hidrodinámica. En un medio tridimensional su valor queda definido por:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \left(D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) - \left(v_x \frac{\partial C}{\partial x} + v_y \frac{\partial C}{\partial y} + v_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad 3.26$$

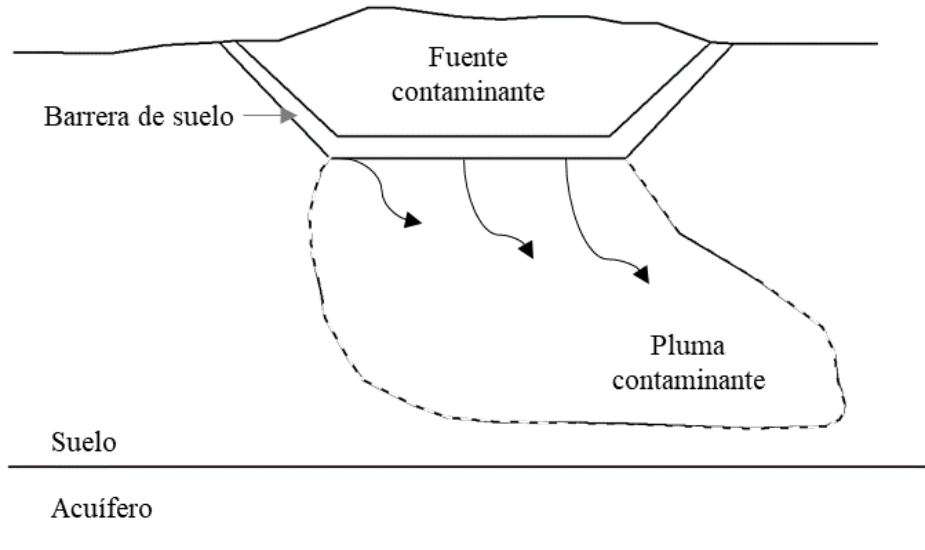


Figura 3.7. Formación de la pluma contaminante en un estrato de suelo (Yong, 2000)

En un medio homogéneo los coeficientes de dispersión hidrodinámica en sentido x , y y z (D_x , D_y y D_z) no varían en el espacio. No obstante, el coeficiente de dispersión hidrodinámica está en función de la dirección del flujo y por ello puede ocurrir que en un medio isótropo y homogéneo $D_x \neq D_y \neq D_z$. En aquellos medios en donde la velocidad lineal v_x , es uniforme y el medio es homogéneo e isótropo, la ecuación unidimensional es:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D^*_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - V_s \frac{\partial C}{\partial x} \quad 3.27$$

En un medio homogéneo con velocidad uniforme, bidimensional, con flujo paralelo al eje x , la ecuación es la siguiente (Fetter *et al.*, 2018):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D^*_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D^*_T \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - V_s \frac{\partial C}{\partial x} \quad 3.28$$

Para obtener una solución única a una ecuación diferencial es necesario especificar las condiciones iniciales y de contorno. Las primeras describen los valores de la variable en estudio (en este caso, la concentración del contaminante), en un tiempo inicial igual a 0. Las condiciones de contorno especifican la interacción entre el área de análisis y su ambiente externo, existen tres tipos: concentración fija, gradiente fijo y flujo variable.

Para un flujo unidimensional, se especifican las siguientes condiciones relacionadas con la distancia (x) y el tiempo (t):

$$C(x, t) = C(t) \quad 3.29$$

Y se considera que:

$C(0,t) = C_0 \quad t \geq 0$	Condición de concentración fija
$C(x,0) = 0 \quad x \geq 0$	Condición inicial
$C(\infty,t) = 0 \quad t \geq 0$	Condición de concentración fija

El primer enunciado expresa que para todo tiempo t igual o mayor que cero, en $x = 0$ la concentración se mantiene en C_0 , esta situación es un ejemplo de condición de concentración fija. La segunda declaración es una condición inicial, establece que en el momento $t = 0$, la concentración es cero en todas partes dentro del dominio de flujo, sea x mayor o igual que cero. La tercera condición muestra que el sistema de flujo es infinitamente largo y que no importa cuán grande sea el tiempo, la concentración seguirá siendo cero al final del sistema. Así, la solución analítica para obtener una aproximación de la ecuación de dispersión en un medio unidimensional es la siguiente (Sauty, 1980):

$$\frac{C}{C_0} = 0.5 \operatorname{erfc} \left(\frac{L - V_s t}{2\sqrt{D^*_L t}} \right) \quad 3.30$$

donde C es la concentración en la distancia x después de transcurrido un tiempo t , C_0 representa la concentración inicial (kg m^{-3}), la función de error (erf) y su complementaria (erfc), ambas funciones se denominan Gaussianas, y L (m) es la distancia recorrida por el contaminante.

Es importante mencionar que, en los análisis de transporte de contaminantes en dos dimensiones, los parámetros de dispersividad longitudinal y transversal son determinantes para la formación de la pluma contaminante en el subsuelo. En laboratorio, la dispersividad longitudinal se mide haciendo pasar un trazador no reactivo a través de muestras cilíndricas de muestras inalteradas de suelos. Con ello, se tienen curvas de variación de concentración del contaminante, posteriormente para establecer la dispersividad se realiza un ajuste de la correspondiente solución de la ecuación de advección – dispersión a la curva experimental. Por otra parte, la velocidad se obtiene dividiendo la descarga entre la porosidad de la muestra inalterada.

Debido a las heterogeneidades en los materiales a escala macroscópica en campo, los valores de dispersividad son superiores a las obtenidos en pruebas de laboratorio. Los valores de campo pueden establecerse realizando alguno de los principales ensayos: Pozo único de inyección y extracción, ensayo con gradiente natural, dos pozos de inyección – extracción con recirculación y, dos pozos de bombeo utilizando la técnica del impulso (Ormazahal y Larrañaga, 1998).

En la literatura hay escasez de datos sobre las relaciones de las dispersividades longitudinal y transversal. Entre los estudios de campo disponibles, α_l / α_t está en un rango de 6 a 20 (Fetter *et al.*, 2018).

3.2.3 Procesos de atenuación

Existen diversos factores que influyen en la disponibilidad de compuestos solubles (contaminantes) en los suelos o agua, como son: el pH, la textura, condiciones de óxido-reducción, el contenido y tipo de materia orgánica, la capacidad de intercambio catiónico de la matriz del suelo y las

propiedades fisicoquímicas del compuesto. Así, es importante comprender los procesos fisicoquímicos que tienen lugar en el suelo y que afectan la movilidad de estos elementos.

3.2.3.1 Solubilidad

El término solubilidad se refiere a la capacidad máxima de un soluto para disolverse en una solución. Los factores que influyen en este fenómeno son:

- El pH de la solución puede afectar la solubilidad de un compuesto poco soluble.
- La temperatura, al incrementarse la temperatura aumenta la solubilidad.
- La salinidad incrementa la movilización de iones y modifica su capacidad de retención.

En el caso del suelo, uno de los principales factores que afectan la solubilidad, es la acidez. Por ejemplo, muchos metales presentan mayor movilidad en condiciones ácidas y oxidantes, otros son retenidos bajo condiciones alcalinas y reductoras. Algunos ejemplos se muestran en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7 Movilidad relativa de elementos traza en suelos (Kabata-Pendias y Mukherjee, 2007)

Grado de movilidad	Condiciones	Elementos
Alta	Oxidantes y ácidas	B, Br, I
	Neutras o alcalinas	B, Br, F, I, Li, Mo, Re, Se, U, V, W, Zn
Media	Reductoras	B, Br, I
	Oxidantes y ácidas	Li, Sc, Mo, Ra, Rb, Se, Sr, F, Cd, Hg, Cu, Ag, Zn
Media	Principalmente ácidas	Ag, Au, Cd, Co, Cu, Hg, Ni
	Reductoras, con potencial variable	As, Ba, Cd, Co, Cr, Fe, Ge, Li, Mn, Nb, Sb, Sn, Sr, Tl, U, V
Baja	Oxidantes y ácidas	Ba, Be, Bi, Cs, Fe, Ga, Ge, La, Li, Rb, Si, Th, Ti, Y
	Neutras o alcalinas	Ba, Be, Bi, Co, Cu, Ge, Hf, Mn, Ni, Pb, Si, Ta, Te, Zr
Muy baja	Oxidado y ácido	Ag, Al, Au, Cu, Co, Fe, Ga, Ni, Th, Ti, Y, Zr
	Neutras o alcalino-reductoras	Ag, As, Au, B, Ba, Be, Bi, Cd, Co, Cu, Cs, Ge, Hg, Li, Mo, Ni, Pb, Re, Se, Te, Th, Ti, U, V, Zn, Zr

3.2.3.2 Adsorción

La adsorción es el fenómeno en el cual las moléculas de un soluto se concentran en una superficie sólida (por ejemplo: el suelo), ocurre como consecuencia de las reacciones fisicoquímicas entre soluto y los componentes de la fase sólida. En un medio saturado, la adsorción de un compuesto soluble en el medio poroso se divide entre el líquido y la matriz sólida; cualquier aumento de concentración del compuesto soluble en la fase líquida está asociado con modificaciones de concentración en la fase sólida y viceversa. En un medio no saturado, la adsorción de compuesto soluble en el medio poroso se divide entre las fases sólida, líquida y gaseosa.

Los principales factores que afectan la adsorción son:

- Solubilidad (capacidad de disolverse). A mayor solubilidad, mayor adsorción.

- Estructura molecular. Los compuestos de cadena ramificada se adsorben mejor que las moléculas de menor tamaño.
- Peso molecular. Las moléculas más grandes se adsorben mejor que las de menor tamaño.
- Polaridad. A mayor polaridad, mayor adsorción.

La adsorción se puede clasificar en tres categorías:

- Intercambio. Se refiere a la acumulación del químico en una superficie a causa de la atracción electrostática entre las cargas del suelo y las cargas del compuesto.
- Física. Es el resultado de la intervención de fuerzas de Van der Waals (fuerzas atractivas o repulsivas entre moléculas).
- Química. Es el resultado de una reacción química entre la superficie sólida y el compuesto químico.

La capacidad de adsorción está definida con isotermas de adsorción. Dichas isotermas se refieren a la relación de dependencia entre las moléculas adsorbidas distribuidas en la fase líquida y sólida, a temperatura constante, cuando el proceso de adsorción alcanza un estado de equilibrio. Los tipos de isotermas son:

- I. Isoterma no lineal o también llamada isoterma de Freundlich (Fetter *et al.*, 2018), expresada de la siguiente forma:

$$C_s = bC^N \quad 3.31$$

donde C_s se refiere a la masa de soluto adsorbido por unidad de peso de sólido, en mg kg^{-1} ; b y N son constantes, las cuales dependen de la temperatura; y, C se refiere a la concentración del adsorbato en la solución (mg L^{-1}). Cuando $N < 1$ significa que a medida que C_s aumenta, se hace más difícil que se absorban cantidades adicionales de adsorbato; ocurre lo contrario cuando $N > 1$.

- II. La isoterma lineal es cuando $N=1$. Entonces, en la ecuación 3.31 se reemplaza b por K_d , como:

$$C_s = K_d C \quad 3.32$$

El coeficiente K_d se denomina coeficiente de distribución o coeficiente de reparto y expresa la afinidad de un elemento hacia el sólido en relación con el líquido (generalmente para un medio saturado). K_d es igual a la pendiente del isoterma lineal (Figura 3.8). En un medio no saturado, el coeficiente K_d está en función del grado de saturación y la ecuación 3.32 es válida, no obstante, no es aplicable cuando el grado de saturación es bajo (usualmente ocurre cuando está cerca de la superficie del suelo). En la Figura 3.9 se muestra la influencia del coeficiente de distribución. $K_d=0 \text{ ml g}^{-1}$ exhibe que la zona ocupada por el elemento contaminante no se ve afectada por reacciones químicas. En este caso, los procesos de advección y dispersión hacen que el contaminante ocupe gradualmente gran parte del dominio de flujo. En cambio, cuando $K_d > 0 \text{ ml g}^{-1}$, el contaminante ocupa una porción pequeña del dominio del flujo y sí $K_d > 10 \text{ ml g}^{-1}$ la mayor parte del contaminante migra solo a una distancia muy corta desde la zona de entrada.

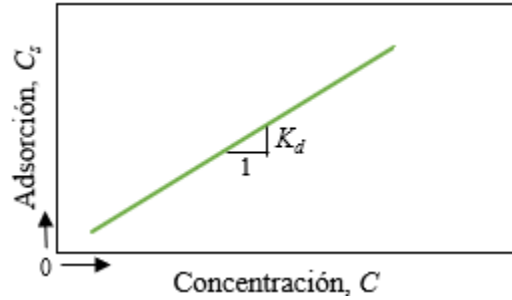


Figura 3.8 Isoterma de adsorción lineal (Fetter *et al.*, 2018)

Si se considera que el transporte de contaminante tiene adsorción lineal, se reemplaza la ecuación 3.32 en la ecuación 3.3 y se obtiene:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} - \frac{\rho_b}{n} \frac{\partial (K_d C)}{\partial t} \quad 3.33$$

Reorganizando los términos, la ecuación de advección-dispersión es:

$$\frac{\partial C}{\partial t} \left(1 + \frac{\rho_b}{n} K_d \right) = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} \quad 3.34$$

De donde se obtiene la siguiente expresión y se denomina factor de retardo, R :

$$1 + \frac{\rho_b}{n} K_d = R \quad 3.35$$

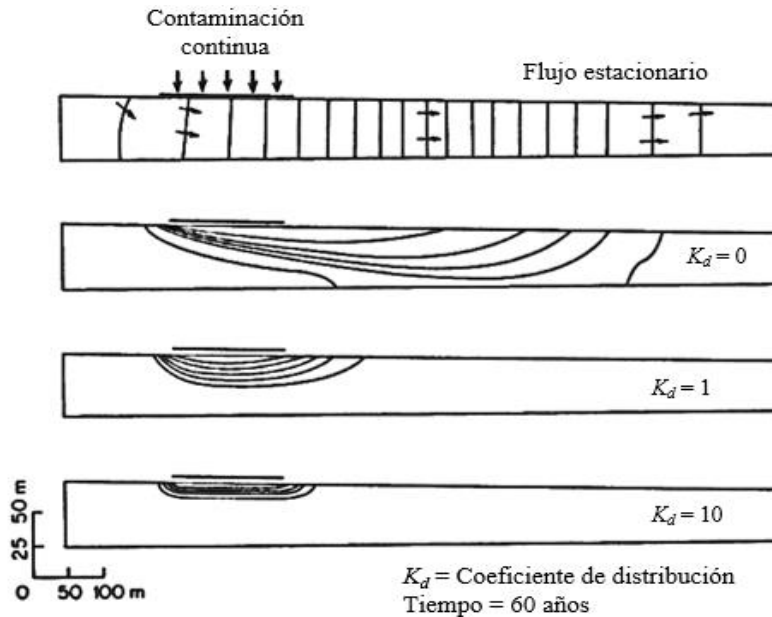


Figura 3.9. Efecto del coeficiente de distribución en el proceso de retardo durante el transporte de contaminante, en un sistema de flujo de agua. Considerando: porosidad = 0.3; conductividad hidráulica = 0.5 m/día; contornos de concentración en $C/C_0 = 0.9, 0.7, 0.5, 0.3$ y 0.1 ; $\alpha_l = 10$ m y $\alpha_t = 0.5$ m (Allan-Freeze y Cherry, 1979)

III. Isotermas de equilibrio no lineal o también llamada isoterma de Langmuir (Fetter *et al.*, 2018), en donde:

$$C_s = \frac{\alpha\beta C}{1 + \alpha C} \quad 3.36$$

donde α es una constante de adsorción relacionada con la energía de unión y β es la cantidad máxima de soluto que puede ser absorbida por el sólido.

En la realidad los sistemas de aguas subterráneas no están estrictamente en equilibrio, contienen flujos advectivos o difusivos de los elementos contaminantes. Sin embargo, en muchos casos el tiempo en el que ocurre la reacción por adsorción es rápido, en relación con los tiempos de advección y difusión, por lo que se puede suponer un equilibrio.

3.2.3.3 Degradación

Los procesos de transferencia son aquellos que reubican los compuestos orgánicos sin alterar su estructura, tales como la lixiviación, erosión o adsorción. En cambio, un proceso de degradación es aquel que altera la estructura química del compuesto, por ejemplo, la fotólisis o la degradación química.

La fotólisis es la descomposición de un compuesto químico como resultado directo de una irradiación. Las reacciones en donde participa la luz solar son muy importantes para determinar la distribución de los contaminantes en el medio acuático. Asimismo, desempeñan un papel significativo en la degradación de los contaminantes del suelo. Las reacciones de fotólisis en los suelos son difíciles de determinar debido a la pérdida de penetración que experimenta la radiación y a la naturaleza heterogénea de los suelos.

Por otra parte, la degradación química es la alteración de los compuestos orgánicos por procesos como la hidrólisis y las reacciones redox (oxidación o reducción química del compuesto contaminante). La hidrólisis se refiere a la reducción de los contaminantes debido a la interacción con el agua. Las reacciones redox son aquellas en las que los estados de oxidación cambian porque implican una transferencia de electrones (agentes reductores) a otras especies (oxidantes). Se denomina potencial redox del suelo a su capacidad reductora u oxidativa.

El tiempo de degradación depende del tipo de contaminante que se esté estudiando. Por ejemplo, los metales pesados como Cd, Zn, Pb, Cu y Mn, son un tipo de contaminante peligroso para la vida de los seres vivos cuando entran en contacto con el agua, aire y los alimentos en cantidades más altas que los límites permisibles. Por lo tanto, los metales pesados aumentan su peligrosidad al no ser química ni biológicamente degradables (Pedraza-Chávez, 2011).

3.2.4 Soluciones analíticas y numéricas

Al igual que en las soluciones analíticas de flujo de agua, en el transporte de contaminantes los procedimientos analíticos permiten resolver problemas sencillos que no representan la complejidad de los casos reales.

El transporte de contaminantes en el subsuelo puede ser simulado mediante la aproximación de la ecuación de transporte, a través de diferencias finitas o elementos finitos. Para ello se requiere el uso de métodos numéricos, empleando programas comerciales entre de los que destacan CTRAN/W, FLAC y MODFLOW.

Para fines del presente trabajo, el caso de estudio se resuelve utilizando CTRAN/W. Dicho software se basa en elementos finitos y permite modelar el movimiento de contaminantes a través de materiales porosos como el suelo y roca. CTRAN/W utiliza las velocidades de flujo de SEEP/W para calcular el movimiento de los constituyentes disueltos en el agua. Los tipos de análisis que se pueden realizar en CTRAN/W son: seguimiento de partícula y análisis de advección dispersión. El primero proporciona una aproximación de las distancias y tiempos de viaje de los contaminantes, siendo una forma rápida de presentar la región contaminada. No obstante, se requiere un análisis completo de dispersión por advección para conocer la concentración dentro de la región contaminada. Por otra parte, el análisis de advección – dispersión se refiere al proceso por el cual los solutos son transportados por el movimiento masivo del agua subterránea que fluye (GEOSLOPE International, 2021).

3.3 Fuente contaminante

3.3.1 Aspectos generales

Se llama fuente contaminante al sitio en donde se generan elementos que, al entrar en contacto con el suelo, agua o aire, modifican negativamente sus características físicas, químicas o biológicas; aunado a ello, tienen efectos adversos sobre el crecimiento de las plantas, salud de los animales, seres humanos o influencia negativa en el medio ambiente.

Hay numerosas fuentes y tipos de contaminación de suelo, agua y aire. Por ejemplo, las fuentes industriales, domesticas o los asentamientos humanos pueden generar contaminantes orgánicos los cuales se descomponen en el agua y provocan la disminución del oxígeno disuelto; también las fuentes agrícolas, mediante el empleo de fertilizantes, contaminan con fosfatos y nitratos al entrar en contacto con el agua inducen la eutrofización. En la Tabla 3.8 se presentan otros ejemplos de contaminantes y su posible fuente.

Para fines de la presente tesis, el contaminante que se estudia pertenece al grupo de metales pesados (en forma soluble), derivado de actividades antropogénicas. Por tal motivo, se describe con más detalle en el subtema 3.3.2 del presente documento.

Tabla 3.8 Contaminantes, descripción y fuentes (Escobar, 2002)

Contaminantes	Descripción	Fuentes
Metales pesados	Se originan principalmente alrededor de centros industriales y mineros. También pueden provenir de actividades militares o a través de los lixiviados.	Fuentes industriales, mineras, asentamientos humanos, actividades militares.
Contaminación microbiológica	Desechos domésticos no tratados, criaderos de animales.	Fuentes municipales
Compuestos tóxicos orgánicos	Químicos industriales, dioxinas, plásticos, pesticidas agrícolas, hidrocarburos de petróleo, hidrocarburos policíclicos generados de la combustión del petróleo. Compuestos orgánicos persistentes (POP) como químicos disruptores endocrinos, cianotoxinas, compuestos organoestánicos de pinturas antiincrustantes.	Fuentes industriales, asentamientos humanos, escorrentía agrícola.
Químicos traza y compuestos farmacéuticos	Desechos hospitalarios, son sustancias peligrosas no removidos necesariamente por los tratamientos convencionales y han sido reconocidos con disruptores endocrinos y carcinogénicos.	Industria química y farmacia.
Partículas suspendidas	Pueden ser orgánicas o inorgánicas y se originan principalmente de prácticas agrícolas y del cambio en el uso de la tierra, como deforestación, conversión de pendientes en pastizales originando erosión.	Industria, asentamientos humanos, escorrentía agrícola y cambios en el uso de la tierra.
Desechos nucleares	Incluye una gama amplia de radio núcleos utilizados en fines pacíficos.	Plantas nucleares, Fallot radioactivo, ensayos nucleares, desechos hospitalarios, desechos industriales.
Salinización	Se produce por la presencia de sales en los suelos y drenajes inadecuados. También ocurre por afloramiento de agua proveniente de zonas altas, donde se riega (lavado de sales).	Presencia de sales en los suelos, la que aflora por carecerse de un buen drenaje, irrigación con agua salobre, agua de yacimientos secundarios de petróleo.
Acidificación	Está relacionada con un pH bajo del agua dado por la deposición sulfúrica producida por la actividad industrial y por las emisiones urbanas.	Fuentes industriales y municipales.

3.3.2 Metales pesados

El término “metales pesados” se utiliza de forma general para denominar a todos aquellos elementos químicos que tienen una alta densidad (mayor que 5 g cm^{-3}) y se caracterizan por un peso atómico arriba de 20, además de ser tóxicos. En este grupo se encuentran el plomo (Pb), Cadmio (Cd), Cobre (Cu), Mercurio (Hg) y Zinc (Zn). En general, los metales pesados se encuentran en bajas concentraciones en el ambiente, muchos de ellos son micronutrientes esenciales para plantas, animales y humanos. Sin embargo, en concentraciones altas pueden causar problemas a la salud humana.

Los metales pesados a nivel de suelo se encuentran en forma soluble como: iones intercambiables de los coloides que integran el complejo de cambio, formando complejos en materia orgánica, adsorbidos en los óxidos e hidróxidos o constituyentes de los minerales del suelo. Mientras que, en el agua se presentan como partículas suspendidas o de forma disuelta.

Entre las fuentes antropogénicas de metales pesados se encuentran: los residuos industriales, fertilizantes, plaguicidas, biosólidos, aguas residuales, residuos domésticos y actividad minera. Los metales pesados son contaminantes más persistentes y complejos para remediar en la naturaleza, ya que degradan la calidad de la atmósfera, los cuerpos de agua y los cultivos de alimento (Orozco-Barrenetxea *et al.*, 2011). En la Tabla 3.9 y Tabla 3.10 se muestran algunos ejemplos de fuentes contaminantes de metales, metaloides y sus efectos.

Tabla 3.9 Efectos importantes de algunos metales solubles, parte 1

Elemento	Origen	Efectos
Antimonio (Sb)	Industria de esmaltes y tipografía	Patología cardíaca
Arsénico (As)	Minería, pesticidas e industria química	Tóxico para la piel y sistema nervioso. Posiblemente cancerígeno
Cadmio (Cd)	Carbón, minería y tratamiento de metales	Afecciones renales, cardiovasculares, hipertensión
Cobalto (Co)	Aleaciones, tintes y pinturas, cerámicas, medicina nuclear	A altas dosis puede ser tóxico
Cobre (Cu)	Recubrimiento de metales, minería y corrosión	Tóxico en algas y plantas. No muy tóxico en animales. Afectaciones al sistema digestivo.
Cromo (Cr)	Recubrimiento de metales, industria textil y de curtido	Daños al sistema digestivo, riñón e hígado.
Hierro (Fe)	Minería, erosión, lixiviación de rocas y suelos, fundición, corrosión	No tóxico. Problemas de sabor y turbidez. Daños a plantas a alta concentración.
Bario (Ba)	Minería e industria de pinturas	Sistema circulatorio
Berilio (Be)	Carbón, industria nuclear y espacial	Tóxico, afecciones pulmonares. Posiblemente cancerígeno

Tabla 3.10 Efectos importantes de algunos metales solubles, parte 2

Elemento	Origen	Efectos
Manganeso (Mn)	Minería, aleaciones, lixiviación en rocas y suelos. Industria química	No muy tóxico. A altas concentraciones daños al sistema nervioso, neumonía
Mercurio (Hg)	Minería, carbón, industria química, fungicidas	Altamente tóxico y daños al sistema nervioso y riñón.
Níquel (Ni)	Recubrimiento de metales, aleaciones, baterías, catalizadores y pigmentos	Cancerígeno en alta dosis, dermatitis, náuseas
Plata (Ag)	Galvanoplastia, fotografía, moneda	Daños al riñón, hígado y piel
Plomo (Pb)	Minería, pinturas, corrosión, carburantes	Muy tóxico. Daños al sistema nervioso, riñón y produce anemia.
Selenio (Se)	Carbón y petróleo, minería del cobre	Afecta sistema nervioso a altas concentraciones y produce hemorragias.
Vanadio (V)	Carbón y petróleo, erosión natural, aleaciones, catalizador, tintes y pinturas	Problemas gastrointestinales y de respiración
Zinc (Zn)	Recubrimiento de metales, aleaciones, pigmentos, pinturas, catalizador	Fitotóxico

3.3.2.1 Pruebas para determinar metales pesados en el suelo y agua

Determinar cuantitativamente los niveles de concentración de metales pesados en muestras ambientales es necesario debido a alta su toxicidad. A diferencia de los contaminantes orgánicos, los metales pesados no se degradan y se acumulan en los suelos y sedimentos, lo cual afecta a los ecosistemas de forma prolongada.

La especiación de metales pesados es importante para entender los roles que desempeñan sus distintas formas químicas en el ambiente. La técnica más utilizada para determinar el grado de asociación de los metales pesados con otras especies químicas presentes en el suelo es la de extracción secuencial o fraccionamiento (Y. Martínez y Rivero, 2005). La prueba consiste en separar los metales mediante un solvente adecuado que los solubilice. En muchos suelos algunos metales se extraen con solventes como el agua o soluciones de sales, mientras que otros metales pueden resistir la extracción con soluciones químicas agresivas (ácidos concentrados).

Para la detección y cuantificación de metales pesados en el agua, se utiliza el método basado en la NMX-AA-051-SCFI-2016. Esta norma establece que el método para la determinación de metales pesados por absorción atómica en aguas naturales, potables y residuales se basa en la generación de átomos en estado basal y en la medición de la cantidad de energía absorbida por los mismos, la cual es directamente proporcional a la concentración del elemento en la muestra analizada.

3.4 Consecuencias de la contaminación del suelo y agua

3.4.1 En el medio ambiente y la salud

La contaminación ambiental por metales pesados afecta el aire, agua y suelos. Debido a su poca o nula degradación y biotransformación, los metales pesados pueden acumularse en los suelos y con ello generar afectaciones a la salud animal y humana, incluyendo la cadena trófica (Londoño Franco *et al.*, 2016). En la Figura 3.10 se ilustran las posibles vías de exposición a un suelo contaminado.

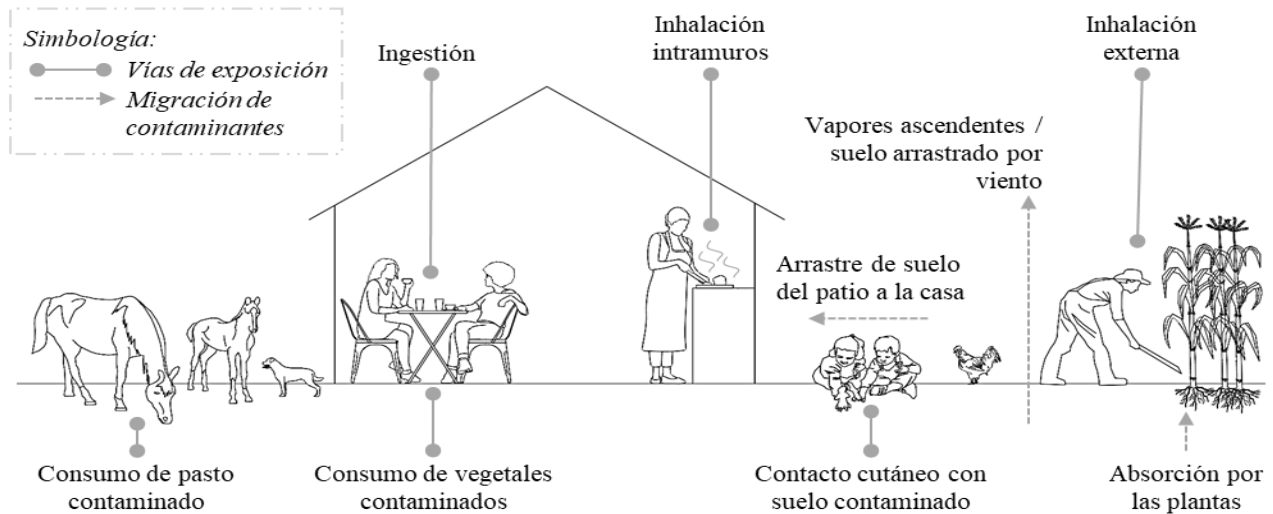


Figura 3.10. Posibles vías de exposición a la contaminación del suelo en un entorno doméstico

Dentro de los metales pesados más comunes y con alto índice de afectaciones a la salud, se encuentran:

Cadmio: El cadmio se utiliza en pinturas, plásticos, pilas, baterías, abonos, soldaduras, asbestos, pigmentos, farmacéutica, fotografía, vidrio, etcétera. Para la mayoría de los seres vivos, la mayor fuente de exposición a este elemento es a través de los alimentos y el agua. Tal elemento entra al cuerpo mediante la inhalación, ingestión o contacto cutáneo y la mayor parte del cadmio que entra al cuerpo va a los riñones e hígado y puede permanecer ahí durante años, causando fragilidad de los huesos y daños en el riñón (Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades, 1999).

Arsénico: El principal mineral del arsénico es el FeAsS (arsenopirita) y se usa en tratamiento de maderas, productos agrícolas (pesticidas, herbicidas) bronceadores de piel, anticorrosivos, vidrio y cerámica, pinturas, pigmentos, medicamentos. También se usa en alimentación animal como factor de crecimiento, gases venenosos de uso militar, etcétera. Por otra parte, el arsénico entra al cuerpo humano mediante la inhalación, ingestión o contacto con la piel, lo anterior puede producir dolor de garganta e irritación de los pulmones e incluso, aumenta el riesgo de cáncer de la piel y cáncer de hígado, vejiga y pulmones (Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2007).

Plomo: Se usa como aditivo antidetonante en la gasolina, baterías, en monitores de computadoras y pantallas de televisión, joyería, latas de conserva, tintes para el cabello, pigmentos, aceites, cosmetología, soldaduras, insecticidas, etcétera. El plomo entra al cuerpo humano cuando se expone a áreas contaminadas con este elemento, mediante inhalación, ingestión o tacto; el plomo puede afectar casi todos los órganos y sistemas del cuerpo, siendo el sistema nervioso el más afectado, además de disminuir la capacidad de aprendizaje, memoria y atención, también afecta la debilidad de los dedos de las manos o tobillos; también causa anemia y daños en los riñones. En mujeres embarazadas puede producir un aborto espontáneo y en hombres provoca daños en los órganos reproductores (Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades, 2020).

Mercurio: El mercurio se utiliza en empastes dentales, pilas, lámparas, aparatos electrónicos, pinturas, catalisis, agricultura, productos farmacéuticos, pulpa, papel, cosméticos, cremas, jabones para la piel, etcétera. El mercurio entra al cuerpo humano principalmente, a través de los alimentos como pescados, mariscos y arroz. Todas las formas en las que se presenta el mercurio afectan el sistema nervioso y riñones e incluso, puede provocar cáncer de estómago o tiroides (Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades, 2022).

Cromo: La exposición al cromo ocurre al ingerir alimentos o agua contaminados o al respirar aire contaminado. Niveles altos de cromo (VI) pueden dañar la nariz y producir cáncer. Ingerir niveles altos de cromo (VI) pueden producir anemia o dañar el estómago o los intestinos. El cromo (III) es un elemento nutritivo esencial que ayuda al cuerpo a usar azúcares, proteínas y grasas. La EPA ha determinado que los compuestos de cromo (VI) son carcinogénicos en seres humanos, la inhalación de cromo (VI) produce cáncer de pulmón y, en seres humanos y animales expuestos a cromo (VI) en el agua potable se ha observado un aumento de tumores estomacales (Agency for toxic substances and disease registry, 2012).

Hierro: Es el cuarto metal más abundante en la corteza terrestre, es maleable y tenaz; la presencia del hierro en el agua provoca precipitación y coloración no deseada; su uso más extenso es para realizar aceros estructurales. También este elemento se encuentra en la carne, productos integrales y vegetales. Los seres humanos absorben el hierro de animales más rápido que de las plantas. El exceso de hierro provoca conjuntivitis, coriorretinitis y retinitis, la inhalación de concentraciones excesivas de oxígeno de hierro puede incrementar el riesgo de desarrollar cáncer de pulmón (Lenntech, s/f).

Por otra parte, Castro-González *et al.* (2017) describen un caso real en donde se encontró que las plantas de alfalfa producidas en los suelos agrícolas irrigados, en los estados de Tlaxcala y Puebla, (México) contienen metales pesados en las partes comestibles. Los metales identificados son cadmio (Cd), plomo (Pb) y arsénico (As), los cuales representan un riesgo a la salud. Con base en estos resultados, decidieron examinar la leche producida por el ganado de la región que es alimentado con alfalfa y encontraron que dicha leche contiene elementos tóxicos como plomo (Pb) y arsénico (As).

Otro ejemplo de que la contaminación que existe en el suelo se transporta hacia la vegetación, es lo ocurrido en el estado de Hidalgo (México). En este caso, se evaluaron las concentraciones de arsénico (As) y metales pesados en plantas de maíz cultivadas en invernadero, considerando dos suelos influenciados por contaminación derivada de la actividad minera. Las plantas se cultivaron durante 165 días en ambos suelos, uno de ellos más contaminado por estar más cerca de los residuos mineros. Se evaluó el crecimiento de las plantas, y luego de la cosecha, físicamente las plantas mostraron un desarrollo deprimido: poca altura, crecimiento lento e inmadurez fisiológica de la mazorca. Además, se registraron concentraciones importantes de los metales en las partes aprovechables (grano, tallo y vaina de la mazorca). El orden de acumulación fue $Zn > Fe > Pb > As > Cd$. Estas concentraciones de As y Pb no cumplen con las normas relacionadas con el maíz, que establece que la mazorca debe estar libre de metales pesados (Armienta *et al.*, 2020).

Con base en lo anterior, se estima que la contaminación por metales pesados desencadena diversas intoxicaciones causando daños irreparables en la salud animal y humana, incluso cáncer o la muerte. Por lo tanto, es importante realizar investigaciones sobre la forma en la que los metales pesados pueden transportarse a través del subsuelo hasta llegar a ser ingerido por los seres humanos.

3.4.2 En la geotecnia

Desde el punto de vista ambiental, se han realizado diversas investigaciones sobre los cambios que sufre el suelo bajo la acción de diversos contaminantes. En cambio, en el ámbito geotécnico, existe poca información sobre el efecto que tiene la contaminación en las propiedades mecánicas del suelo.

La Universidad Autónoma de Querétaro (Gaxiola-Gómez *et al.*, 2019) efectuó diversas investigaciones donde se evaluaron las propiedades geotécnicas de una arcilla expansiva considerando dos escenarios: estado natural y contaminada con diferentes aguas residuales. Los investigadores determinaron que los límites de consistencia de Atterberg aumentan conforme la concentración de las aguas residuales se incrementa, haciendo un suelo mayormente compresible. Asimismo, conforme se incrementó la concentración de las aguas residuales en el suelo, la cohesión disminuyó hasta 50%. Mientras que, el ángulo de fricción interna aumentó hasta 6.25 veces. Lo anterior puede tener consecuencias significativas al realizar el diseño geotécnico.

En la Universidad Nacional de Colombia (Zahermand *et al.*, 2020) se realizó un estudio donde se evaluaron los efectos de los contaminantes del petróleo en las propiedades geotécnicas de un suelo arcilloso y un suelo arenoso. En las muestras arcillosas, los límites de Atterberg aumentaron en función de la concentración de hidrocarburos de petróleo. Mientras que, en las muestras arenosas, a mayor concentración de contaminantes de petróleo, la densidad seca máxima aumentó y disminuyó el contenido de humedad óptimo.

Otros ejemplos de repercusiones de la contaminación del suelo, en materia de la geotecnia, se muestran en la Tabla 3.11 .

Tabla 3.11 Impacto de los metales pesados en propiedades geotécnicas (Rehman *et al.*, 2023)

Tipo de suelo	Contaminante	Remediación	Propiedad clave	Referencias
Caolín-bentonita/arcilla china	Pb	---	La adición de plomo provocó agregación, reducción del índice de expansión y contenido de limo; también generó aumento de cohesión.	(Zhou <i>et al.</i> , 2019)
Arcilla	Pb (II) y Fe(III)	Cal	Los contaminantes afectan notablemente la reacción cal-arcilla y los productos de hidratación considerando los efectos a corto y largo plazo.	(Boardman <i>et al.</i> , 2004)
Arcilla de caolín	Zn y Pb	Aglutinante a base de fosfato	El efecto combinado de la exhibición de zinc y plomo redujo la resistencia del suelo estabilizado en comparación con el zinc solo.	(Du <i>et al.</i> , 2003)
Arcilla de caolín	Zn	Cemento	Afectaciones a causa del zinc en producto de hidratación, las características técnicas y la microestructura.	(Du <i>et al.</i> , 2014)
Suelo arenoso	Cd, Ni, Zn, Cu y Pb	Escoria-cemento y escoria activada con cal	Mejora del comportamiento mecánico y de lixiviación; la escoria activada con cal tiene efectos adversos sobre la permeabilidad y la lixiviación.	(Kogbara y AlTabbaa, 2011)
Suelo de grano fino y grueso	gasóleo	---	Reducción de la densidad seca y ángulo de fricción; aumento de los parámetros de consistencia y cohesión del suelo.	(Khosravi <i>et al.</i> , 2013; Nasehi <i>et al.</i> , 2016)
Arena fina a mediana no plástica, uniformemente graduada	Hidrocarburo	Tratamiento térmico	Reducción de la permeabilidad y contenido óptimo de agua; variación en la curva de compactación; aspecto visual del suelo.	(Khan <i>et al.</i> , 2014)
Arcilla	Etanol y glicerol	---	El etanol produce un efecto significativo en el aumento del índice de compresión, mientras que el efecto del glicerol no es notable.	(Estabragh <i>et al.</i> , 2014)
Arcilla	Pb	NZVI	Mejora notable en la resistencia al corte del suelo arcilloso.	(Zhou <i>et al.</i> , 2019)

4. CASO DE APLICACIÓN EN SAN MATEO ATENCO, ESTADO DE MÉXICO

4.1 Planteamiento del problema

En el Valle de Toluca, la alta densidad poblacional es causa del establecimiento y desarrollo de zonas industriales, lo cual representa un fuerte progreso económico. No obstante, este crecimiento genera una gran cantidad de desechos industriales y domésticos que han influido para que la cuenca alta del río Lerma sea considerada como una de las más contaminadas del país (Esteller y Díaz-Delgado, s/f).

Los principales contaminantes de la cuenca alta del río Lerma son metales pesados, algunos se muestran en la Tabla 4.1. Lo anterior constituye un problema de interés social, ya que los metales pesados representan un riesgo para la salud por su alta toxicidad y la mayoría están clasificados como cancerígenos o probables cancerígenos para los seres humanos (Greenpeace, 2013).

Como se mencionó en el capítulo 3.4, los metales pesados pueden ser absorbidos por las plantas y afectar la cadena trófica. Según datos del INEGI, el 30% de uso de suelo de San Mateo Atenco es destinado a actividades agrícolas (maíz, haba, frijol, entre otras plantas), mismas que son llevadas a cabo en las riberas del río Lerma (Figura 4.1).

Tabla 4.1 Contaminantes solubles en el río Lerma, en San Mateo Atenco, Estado de México

Nombre	Nomenclatura	Concentración (mg/l)	Fuente
Fosfatos	PO ₄ ³	35.9	(Barceló-Quintal <i>et al.</i> , 2013b)
Nitratos	NO ₃	20.2	
Sólidos totales	---	111	
Hierro	Fe	0.2	(García-Aragón <i>et al.</i> , 2012)
Manganeso	Mn	0.19	
Nitratos	NO ₃	55	(Pérez-Díaz <i>et al.</i> , 2019)
Fosfatos	PO ₄ ³	10	
Boro	B ³	0.3	
Cloruro	Cl	2	
Cromo	Cr	0.02	(Avila-Pérez <i>et al.</i> , 2007)
Manganeso	Mn	0.285	
Hierro	Fe	0.99	
Cobre	Cu	0.043	
Zinc	Zn	0.129	
Plomo	Pb	0.011	
Plomo	Pb	1.1	
			(de Oca-Jiménez <i>et al.</i> , 2022a)

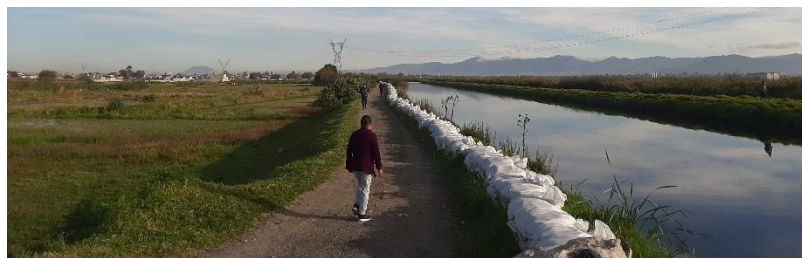


Figura 4.1. Margen izquierda del Río Lerma, en San Mateo Atenco

El 29 de agosto de 2018 se publicó una declaratoria de desastre natural por la presencia de lluvia severa e inundación fluvial en 8 municipios del Estado de México, entre los cuales se encuentra San Mateo Atenco. Mismo año en el que debido a las severas lluvias, ocurrió la ruptura del bordo de protección de la margen izquierda del río y la zona de riberas fue inundada. Se estima que, de ese modo el suelo de las riberas fue contaminado (Figura 4.2). En la Figura 4.3 se muestran los niveles de vulnerabilidad y área de inundación del municipio de San Mateo Atenco.



Figura 4.2. Ruptura de bordo casado por inundaciones, San Mateo Atenco 2018

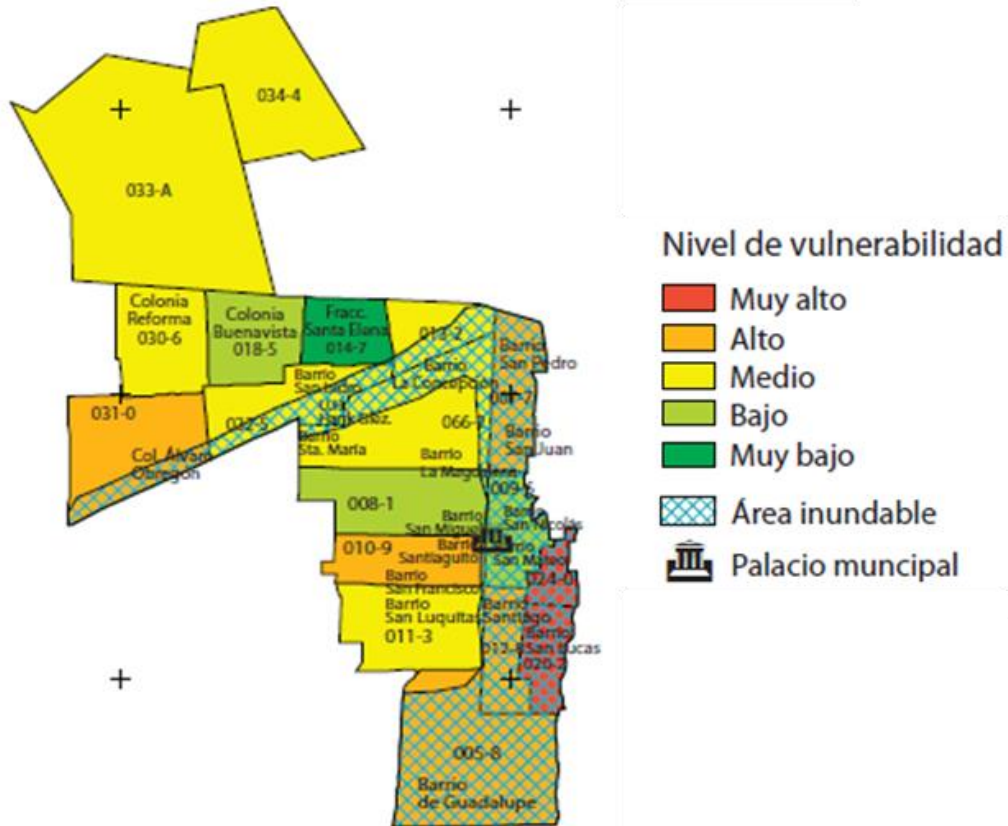


Figura 4.3. Vulnerabilidad y área de inundación en San Mateo Atenco (Toscana-Aparicio *et al.*, 2009)

Para proponer una solución que permita reducir los riesgos para la salud de los seres humanos es importante conocer el origen de la contaminación del suelo. En este caso, se debe analizar si la contaminación de las riberas del río Lerma ocurre por flujos en el subsuelo o es producto de las inundaciones de la zona, cabe aclarar que este último punto no es tratado en esta tesis. Así, surge la necesidad de llevar a cabo un estudio que evalué el movimiento de la contaminación por metales pesados a través del suelo, desde el cauce hacia las riberas del río Lerma. Para ello, se utilizan métodos numéricos que permiten simular el flujo de agua y transporte de contaminantes. Con estas herramientas se puede conocer el tiempo de expansión del contaminante a través de las riberas, distancia de expansión y las concentraciones en la masa de suelo.



Figura 4.4. Sección topográfica de la zona de estudio, representativa de la problemática

Es importante tener en cuenta que, en el Valle de Toluca, específicamente en el municipio de San Mateo Atenco, no existen investigaciones que aborden el tema de transporte de contaminantes en el subsuelo. Solo se tienen referencias relacionadas a la contaminación del río Lerma.

4.2 Ubicación del sitio

4.2.1 Ubicación geográfica

El municipio de San Mateo Atenco pertenece al Estado de México, se localiza en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca, específicamente al este de la ciudad de Toluca; colinda al norte con los municipios de Toluca y Lerma, al este con el río Lerma, al sur y oeste con el municipio de Metepec (Gobierno del Estado de México y Protección Civil, 2018).

San Mateo Atenco se encuentra dentro de la región hidrológica “Lerma – Chapala – Santiago”, misma que inicia en el Estado de México, continua por Querétaro, Guanajuato, Jalisco y desemboca en Nayarit (Figura 4.5).

El relieve del municipio es prácticamente homogéneo, presenta una pendiente máxima de 2% en toda su extensión y es apto en un 70% para la urbanización. Mientras que, el 30% corresponde a las zonas colindantes con el río Lerma que genera problemas de inundación durante la época de lluvias.

Geológicamente se caracteriza por presentar suelo tipo aluvial, formado por el depósito de materiales sueltos (gravas y arenas), provenientes de rocas preexistentes que han sido transportadas por corrientes superficiales de aguas desde las partes más altas de la Sierra Nahuatlaca – Matlazinca y la Sierra Nevada.

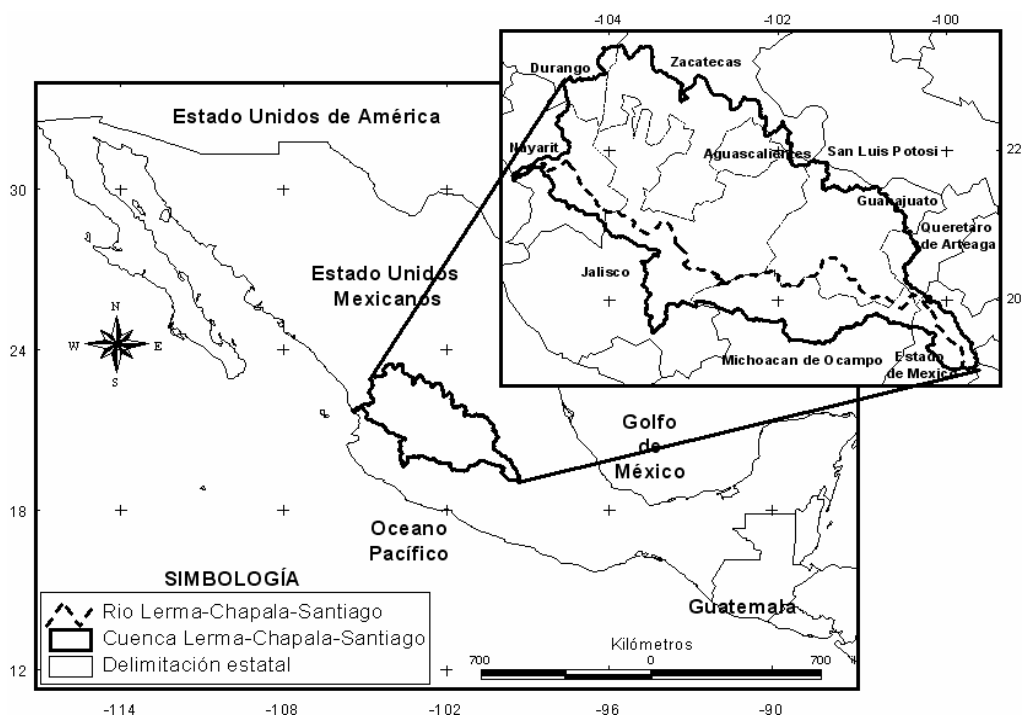


Figura 4.5 Ubicación de la cuenca Lerma – Chapala – Santiago (Esteller y Díaz-Delgado, s/f)

El río Lerma a su paso por el municipio funciona como división territorial entre los municipios de San Mateo Atenco y Lerma. El río se encuentra dividido en tres partes: curso alto, curso medio y

curso bajo; San Mateo Atenco se ubica en el Curso Alto del Río Lerma (CARL). Los barrios de San Mateo Atenco colindantes con el río Lerma son Guadalupe, San Lucas, Santiago, San Nicolas y San Juan, como se observa en la Figura 4.3.

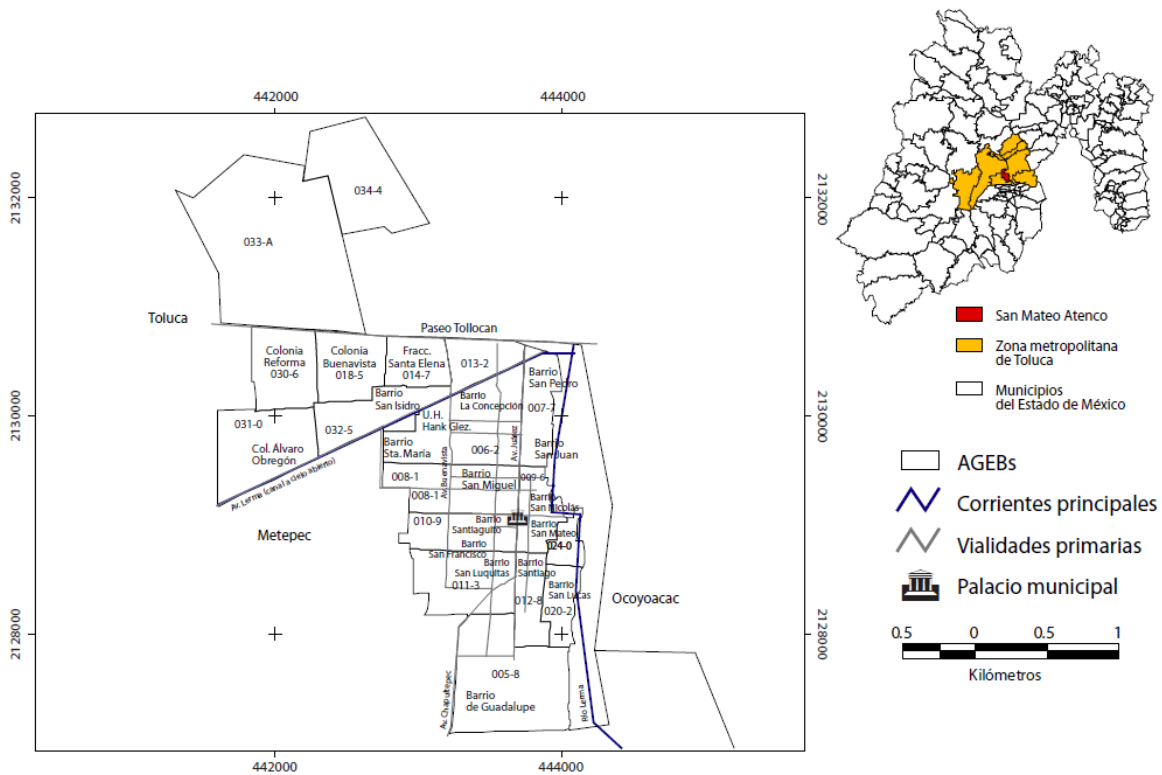


Figura 4.6. Localización del Municipio de San Mateo Atenco (Toscana-Aparicio *et al.*, 2009)

En la Tabla 4.1 se presentan los usos de suelo de la superficie del municipio. Con relación a la zona agrícola, el 80% se destina al maíz, el 10% al haba, el 5% al frijol, 3% a las hortalizas y 2% al cultivo de avena forrajera. Como se observa en la Figura 4.7, el área correspondiente a la agricultura colinda con el cauce del río Lerma.

Tabla 4.2 Uso de suelo en San Mateo Atenco (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2010)

Uso	Extensión (Hectáreas)	Porcentaje (%)
Habitacional	797.5	42.5
Mixto (habitacional – agropecuario)	390.6	20.8
Mixto (habitacional – comercio)	10.7	4.7
Industrial	47.8	2.6
Agrícola	551.2	29.4
Total	1797.8	100

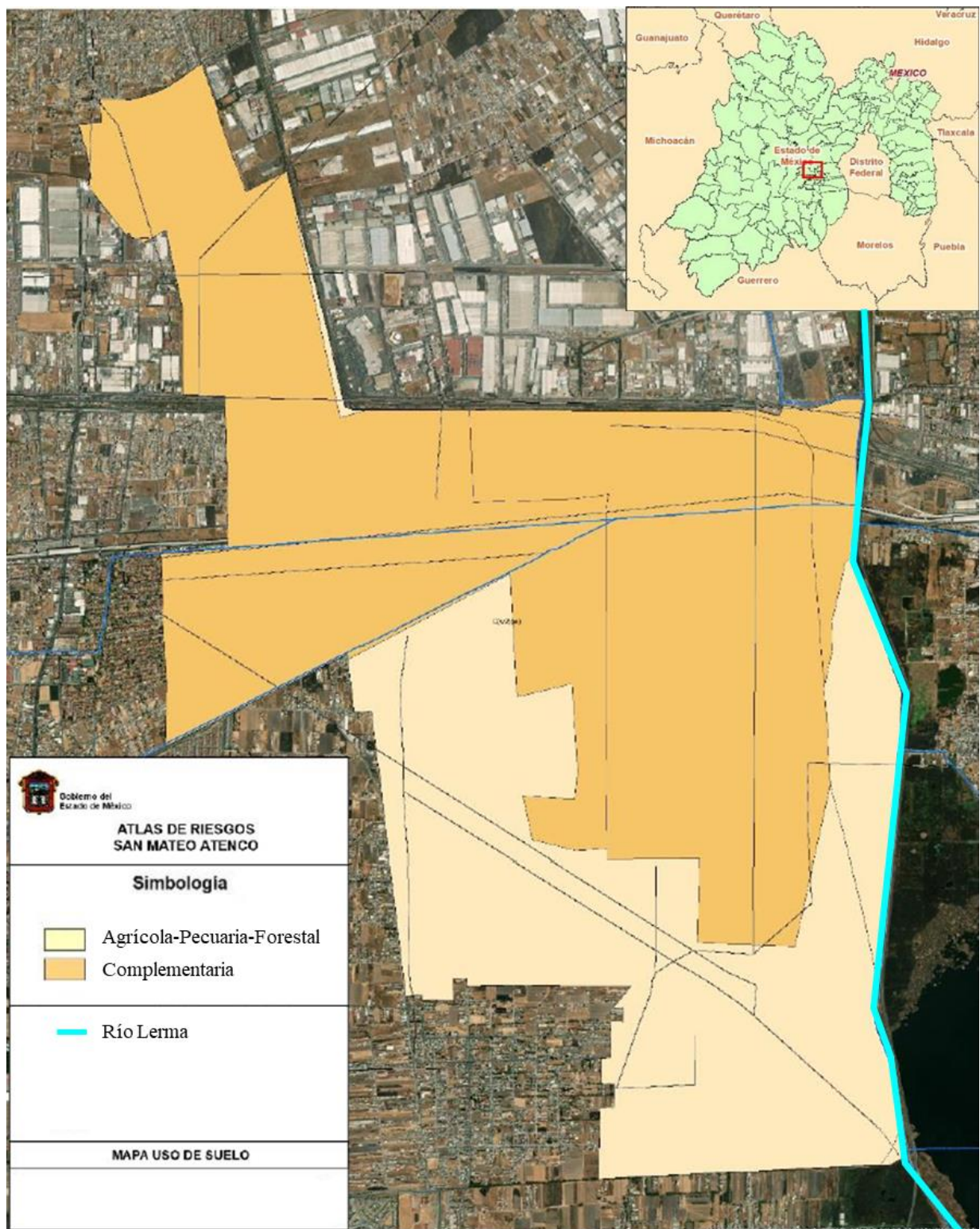


Figura 4.7. Uso de suelo y vegetación en San Mateo Atenco, Estado de México (Gobierno del Estado de México, 2022)

4.2.2 Ubicación geotécnica

El Valle de Toluca tiene cinco zonas geotécnicas, definidas de la siguiente forma:

- Zona I: Cerros y lomeríos.
- Zona II: Tobas (faldas de los cerros).
- Zona III: Terreno aluvial.
- Zona IV: Zona de transición entre zonas III y V.
- Zona V: Terreno lacustre.

De acuerdo con el mapa de zonificación elaborado por Martínez (1976) y tal como se observa en la Figura 4.8, el municipio de San Mateo Atenco se encuentra dentro de la zona geotécnica IV, de transición entre el terreno aluvial y terreno lacustre.

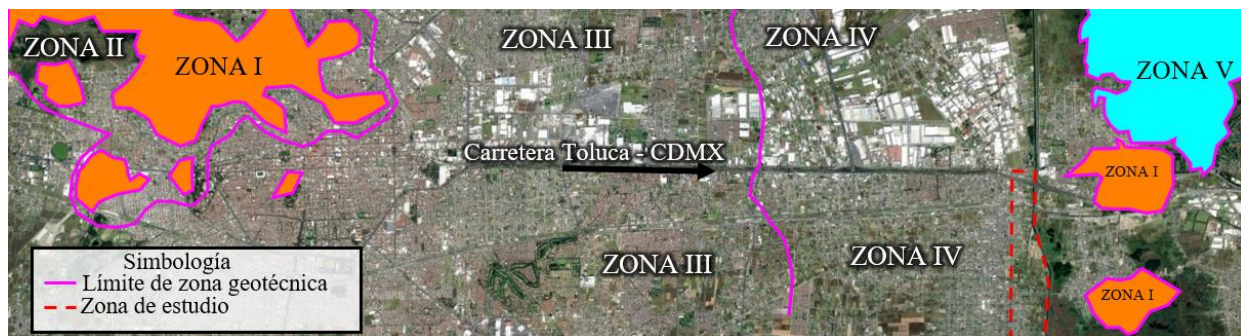


Figura 4.8. Zona urbana del Valle de Toluca: zonificación original (García-Rocha *et al.*, 2010)

Martínez (1976) describe que, el perfil de suelo en la zona IV consiste fundamentalmente de dos estratos de características definidas. El primero se localiza entre la superficie del terreno a una profundidad que varía de 8 a 10 m y está compuesto por materiales cohesivo friccionantes de una compacidad alta, con número de golpes en la prueba de penetración estándar, de 20 a más de 60. El siguiente estrato tiene un espesor no determinado, que es posible sea mayor de 20 m, ya que llega más allá de la cota -29 m. Está formado por materiales finos como limos arcillosos o arcillas limosas, entre los cuales se intercalan estratos de materia orgánica (turba de color café oscuro), así como limos orgánicos. La resistencia a la penetración de este estrato es de 2 a 5 golpes, con ligeros incrementos en algunas lentes arenosas.

El nivel freático se ubica desde 1.80 m hasta profundidades cercanas a la superficie. Por otra parte, las pruebas índices ejecutadas en las capas superiores muestran que los contenidos de humedad más comunes varían entre 20 y 40%, presentándose una densidad de sólidos con valores comprendidos entre 2.42 y 2.77. Los límites de consistencia determinados en fracciones que pasan la malla 40, denotan que los materiales son de baja plasticidad.

Con relación a las propiedades índice de los materiales blandos, presentan contenidos de agua con valores del orden de 120 a 150%, excepto en las capas de turba en que presentan valores extraordinariamente altos (576%). Sumando los espesores de los materiales orgánicos situados

entre 10 a 29 m, se alcanza un espesor total cercano a 3 m, lo que indica la necesidad de realizar en esta zona estudios exhaustivos.

El peso volumétrico natural de las muestras es de 1.6 t m^{-3} , aunque disminuye a 1.2 t m^{-3} para las turbas. Los límites de consistencia corresponden a materiales de alta plasticidad (CH, MH y OH). Dentro de los parámetros correspondientes a la zona descrita, se encuentran los mostrados en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3 Parámetros utilizados para realizar pruebas de consolidación de la zona IV, Martínez (1976)

Material	Profundidad	Densidad de sólidos	Relación de vacíos	Contenido de agua	Grado de saturación
		S_s	e	W	G
	m	---	---	%	%
Limo arcilloso	12.3	2.00	3.73	184	100
Arcilla	19.20	2.20	2.75	124	100
Limo	25.80	1.80	4.30	238	100

García-Rocha *et al.* (2010) realizaron una actualización de la zonificación geotécnica del Valle de Toluca, en donde se complementó el trabajo realizado por Martínez Parker (1976). Los autores complementaron la zonificación mediante la contribución de 23 estudios adicionales de mecánica de suelos, siendo un total de 84 sondeos profundos. En la Figura 4.9 se muestra la zonificación geotécnica modificada del Valle de Toluca. En la Tabla 4.4 se presenta un resumen de los estudios realizados, caracterizados por ubicación y número de sondeos.

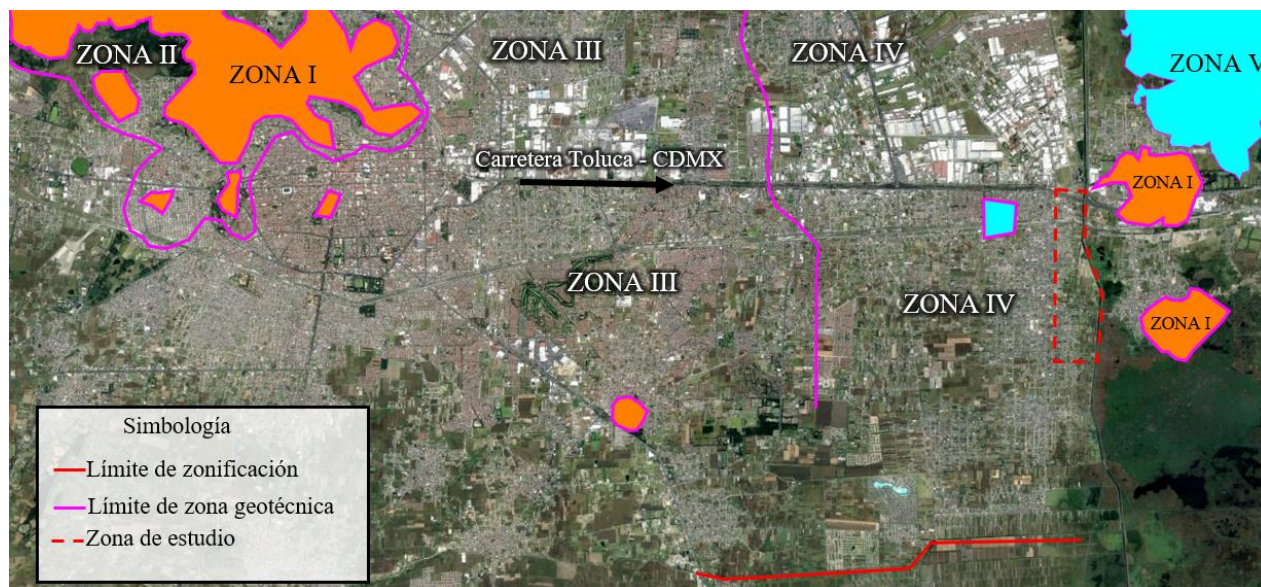


Figura 4.9. Zonificación modificada del Valle de Toluca (García-Rocha *et al.*, 2010)

Tabla 4.4 Relación de estudios, ubicación y número de sondeos (García-Rocha *et al.*, 2010)

Estudio	Ubicación	Número de sondeos
A	Ave. Las Torres y Ave. 16 de septiembre	5
B	Ave. Las Torres y Ave. Torres Chicas	3
C	Ave. Las Torres y Ave. Laguna del Volcán	4
D	Ave. Las Torres y Ave. Paseo Colón	3
E	Ave. Las Torres y Ave. Heriberto Enríquez	4
F	Ave. Las Torres y Ave. José Ma. Pino Suárez	3
G	Ave. Las Torres y Ave. 5 de Mayo	4
H	Ave. Las Torres y Ave. José Ma. Morelos	4
I	Ave. Las Torres y Ave. Comonfort	4
J	Ave. Las Torres y Ave. Manuel J. Clouthier	4
K	Ave. Las Torres y Ave. Tecnológico	5
L	Ave. Las Torres y Ave. Venustiano Carranza	6
M	Ave. Las Torres y Ave. Río Lerma	6
N	Bldv. Isidro Fabela y Calle Diego Rivera	4 PCA's
O	Paseo Tollocan y Paseo Colon	2 y 2 PCA's
P	Paseo Tollocan y Ave. Jesús Carranza	2 y 2 PCA's
Q	Paseo Tollocan y Vicente Guerrero	4
R	Paseo Tollocan y Calle Gran Lago del Oso	2 PCA's
S	Paseo Tollocan y Benito Juárez	3
T	Paseo Tollocan y Blvd. Miguel Alemán	2 y 4 PCA's
U	Puente vehicular en San Mateo Atenco	2
V	Estudio para pozos de absorción en Metepec	2
W	Paseo Tollocan y Ave. Venustiano Carranza	6

La actualización de la zona geotécnica IV está relacionada con los estudios M, T y U, en donde, la estratigrafía detectada coincide en gran parte con la descrita en la zonificación geotécnica original.

En general, se detectaron dos estratos bien definidos hasta 18 m de profundidad. El superior tiene un espesor entre 6 y 10 m, formado por una intercalación alternada de estratos blandos de limos de alta plasticidad (MH) con estratos de limo de baja plasticidad (ML), arenosos; con un número de golpes en la prueba de penetración estándar que varía entre 2 y 10 en los estratos blandos y más de 50 golpes en los estratos denominados como duros. Los contenidos de agua del subsuelo varían de 25 a 50% en los lentes de consistencia dura y más de 120% en suelos blandos. A partir de 10 m hasta los 18 m de profundidad aproximadamente, el subsuelo es limo de alta plasticidad arenoso, de consistencia blanda a firme, color gris verdoso, con número de golpes variable de 1 a 10, con un promedio de 5 golpes.

En la zonificación actual, la principal variación estratigráfica respecto a la realizada en 1976 consiste en que, en algunos sitios de la zona IV se detectó roca a 16 m de profundidad aproximadamente y en otros sitios dicho estrato se ubicó a partir de 22 m de profundidad.

Méndez-Sánchez, Auvinet y García (2012), hicieron una contribución a la zonificación geotécnica del Valle de Toluca empleando Sistemas de Información Geográfica (SIG). En la Figura 4.10 se muestra el mapa que obtuvieron como parte de esta contribución. El mapa corresponde a la propuesta general utilizada en el reglamento de construcciones del Valle de Toluca. Se observa que, San Mateo Atenco se ubica dentro de los depósitos aluvial lacustre.

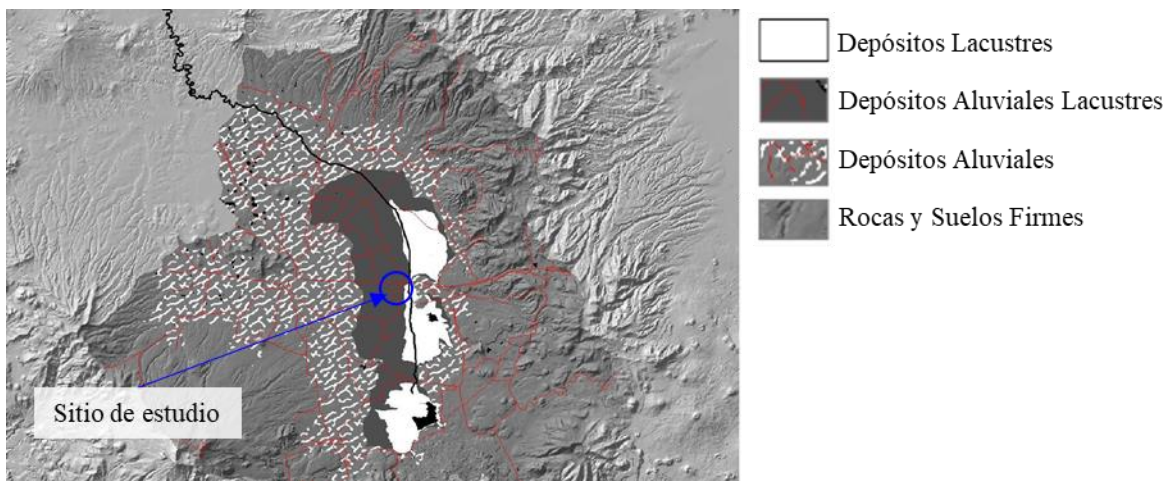


Figura 4.10. Contribución a la zonificación geotécnica general del Valle de Toluca

4.3 Parámetros empleados en la modelación numérica

4.3.1 Parámetros geotécnicos

Las propiedades geotécnicas del sitio en estudio son consideradas de acuerdo con el informe geotécnico realizado por VADA Ingeniería S.A. de C.V. (2018) en donde se menciona que las actividades de exploración realizadas para dicho proyecto son:

- Dos sondeos de penetración estándar con recuperación de muestras inalteradas mediante el uso de tubo Shelby, realizados en el centro del cauce del río Lerma, denominados SM-03 y SM-04 (Figura 4.11).
- Dos sondeos de penetración estándar con recuperación de muestras inalteradas mediante el uso de tubo Shelby, realizados en la margen izquierda del río Lerma, denominados ESM-1 y ESM-2 (Figura 4.11).
- Cuatro pozos a cielo abierto con recuperación de muestra cúbica, realizados en la margen izquierda del río Lerma, denominados PCA-1, PCA-2, PCA-3 y PCA-4 (Figura 4.11).

Entre las actividades de laboratorio realizadas, se encuentran:

- Contenido de agua
- Límites de Atterberg (límite líquido y límite plástico)
- Densidad de sólidos
- Granulometría



Figura 4.11. Exploración geotécnica en margen izquierda del Río Lerma, San Mateo Atenco

Con base en los trabajos de campo y laboratorio se determinó el perfil estratigráfico correspondiente a la margen izquierda del río Lerma (Figura 4.12), en sentido longitudinal, iniciando a partir del PCA-1 y finalizando con el ESM-1, los cuales se describen desde la Tabla 4.5 hasta la Tabla 4.10. Los perfiles estratigráficos se muestran en ANEXO I.

Tabla 4.5 Descripción estratigráfica del PCA-1 (VADA Ingeniería S.A. de C.V., 2018a)

Estrato	Espesor	Descripción
E1	0.00 m a -0.40 m	Revestimiento formado por limos arenosos y grava color blanco, en estado semicompacto. No se realizaron pruebas de laboratorio.
E2	-0.40 m a -1.70 m	Terreno formado por suelos tipo SC (Arenas arcillosas, mezcla de arena y arcilla) color café claro en estado semicompacto. El contenido de agua en el estrato es de 25%. Los resultados de granulometría reportan 14% de grava, 27% de finos y 59% de arena.
E3	-1.70 m a -3.00 m	Terreno natural formado por suelos tipo OH (arcillas orgánicas de mediana a alta plasticidad, limos orgánicos de media plasticidad) color café oscuro mezclado con arena. El contenido de agua en el estrato es de 93%. Los resultados de granulometría reportan 1% de grava, 75% de finos y 24% de arena.

Tabla 4.6 Descripción estratigráfica del PCA-2 (VADA Ingeniería S.A. de C.V., 2018a)

Estrato	Espesor	Descripción
E1	0.00 m a -0.43 m	Revestimiento formado por limos arenosos y grava color blanco, en estado semicompacto. No se realizaron pruebas de laboratorio.
E2	-0.43 m a -1.80 m	Terreno formado por suelos tipo SC (Arenas arcillosas, mezcla de arena y arcilla) color café claro en estado semicompacto. El contenido de agua en el estrato es de 19%. Los resultados de granulometría reportan 22% de grava, 32% de finos y 46% de arena.
E3	-1.80 m a -3.00 m	Terreno natural formado por suelos tipo MH (limos inorgánicos) color café claro en estado compacto. El contenido de agua en el estrato es de 118%. Los resultados de granulometría reportan 1% de grava, 51% de finos y 48% de arena.

Tabla 4.7 Descripción estratigráfica del ESM-2 (VADA Ingeniería S.A. de C.V., 2018a)

Estrato	Espesor	Descripción
E1	0.00 m a -2.40 m	Terreno formado por suelos de arenas arcillosas tipo SC. Con resistencia a la penetración estándar variable entre N=50 y N=16. Sin pruebas de laboratorio.
E2	-2.40 m a -4.20 m	Terreno natural formado por suelos tipo OH (arcillas orgánicas de media a alta plasticidad, limos orgánicos de media plasticidad). Con resistencia a la penetración estándar variable entre N=2 y N=9. El contenido de agua en el estrato es de 85%. Los resultados de granulometría reportan 1% de grava, 80% de finos y 19% de arena.
E3	-4.20 m a -6.90 m	Terreno natural formado por suelos tipo SM-SC (arenas limo-arcillosas, mezcla de arena limo y arcilla). Con resistencia a la penetración estándar variable entre N=1 y N=10. El contenido de agua en el estrato es de 53%. Los resultados de granulometría reportan 0% de grava, 17% de finos y 83% de arena.
E4	-6.90 m a -9.00 m	Terreno natural formado por suelos tipo OH (arcillas orgánicas de media a alta plasticidad, limos orgánicos de media plasticidad). Con resistencia a la penetración estándar variable entre N=0 y N=3. El contenido de agua en el estrato es de 112%. Los resultados de granulometría reportan 2% de grava, 89% de finos y 9% de arena.
E5	-9.00 m a -10.50 m	Terreno natural formado por suelos tipo MH (limos inorgánicos). Con resistencia a la penetración estándar casi nula (N=1). El contenido de agua en el estrato es de 119%. Los resultados de granulometría reportan 6% de grava, 75% de finos y 9% de arena.

Tabla 4.8 Descripción estratigráfica del PCA-3 (VADA Ingeniería S.A. de C.V., 2018a)

Estrato	Espesor	Descripción
E1	0.00 m a -0.50 m	Revestimiento formado por limos arenosos y grava color blanco, en estado semicompacto. No se realizaron pruebas de laboratorio.
E2	0.50 m a -2.00 m	Terreno formado por suelos tipo SC (Arenas arcillosas, mezcla de arena y arcilla) color café claro en estado semicompacto. El contenido de agua en el estrato es de 18%. Los resultados de granulometría reportan 22% de grava, 28% de finos y 50% de arena.
E3	2.00 m a -3.00 m	Terreno natural formado por suelos tipo OH (arcillas orgánicas de media a alta plasticidad, limos orgánicos de media plasticidad) color café oscuro en estado compacto. El contenido de agua en el estrato es de 123.5%. Los resultados de granulometría reportan 1% de grava, 85% de finos y 14% de arena.

Tabla 4.9 Descripción estratigráfica del PCA-4 (VADA Ingeniería S.A. de C.V., 2018a)

Estrato	Espesor	Descripción
E1	0.00 m a -0.60 m	Revestimiento formado por limos arenosos y grava color blanco, en estado semicompacto. No se realizaron pruebas de laboratorio.
E2	0.60 m a -1.80 m	Terreno formado por suelos tipo SC (Arenas arcillosas, mezcla de arena y arcilla) color café claro en estado semicompacto. El contenido de agua en el estrato es de 16.5%. Los resultados de granulometría reportan 24% de grava, 33% de finos y 43% de arena.
E3	1.80 m a -3.00 m	Terreno natural formado por suelos tipo MH (limos inorgánicos) color negro en estado compacto, contiene arenas. El contenido de agua en el estrato es de 82%. Los resultados de granulometría reportan 1% de grava, 53% de finos y 46% de arena.

Tabla 4.10 Descripción estratigráfica del ESM-1 (VADA Ingeniería S.A. de C.V., 2018a)

Estrato	Espesor	Descripción
E1	0.00 m a -2.40 m	Terreno formado por suelos de arenas arcillosas tipo SC. Con resistencia a la penetración estándar variable entre N=50 y N=18. Sin pruebas de laboratorio.
E2	-2.40 m a -8.10 m	Terreno natural formado por suelos tipo OH (arcillas orgánicas de media a alta plasticidad, limos orgánicos de media plasticidad). Con resistencia a la penetración estándar variable entre N=17 y N=2. El contenido de agua máximo en el estrato es de 148%. Los resultados de granulometría reportan 0% de grava, 64% de finos y 36% de arena.
E3	-8.10 m a -12.60 m	Terreno natural formado por suelos tipo MH (limos inorgánicos). Con resistencia a la penetración estándar variable entre N=0 y N=15. El contenido de agua máximo en el estrato es de 144%. Los resultados de granulometría reportan 0% de grava, 92% de finos y 8% de arena.
E4	-12.60 m a -15.00 m	Terreno natural formado por suelos tipo OH (arcillas orgánicas de media a alta plasticidad, limos orgánicos de media plasticidad). Con resistencia a la penetración estándar nula (N=0). El contenido de agua en el estrato es de 329%. Los resultados de granulometría reportan 0% de grava, 91% de finos y 9% de arena.

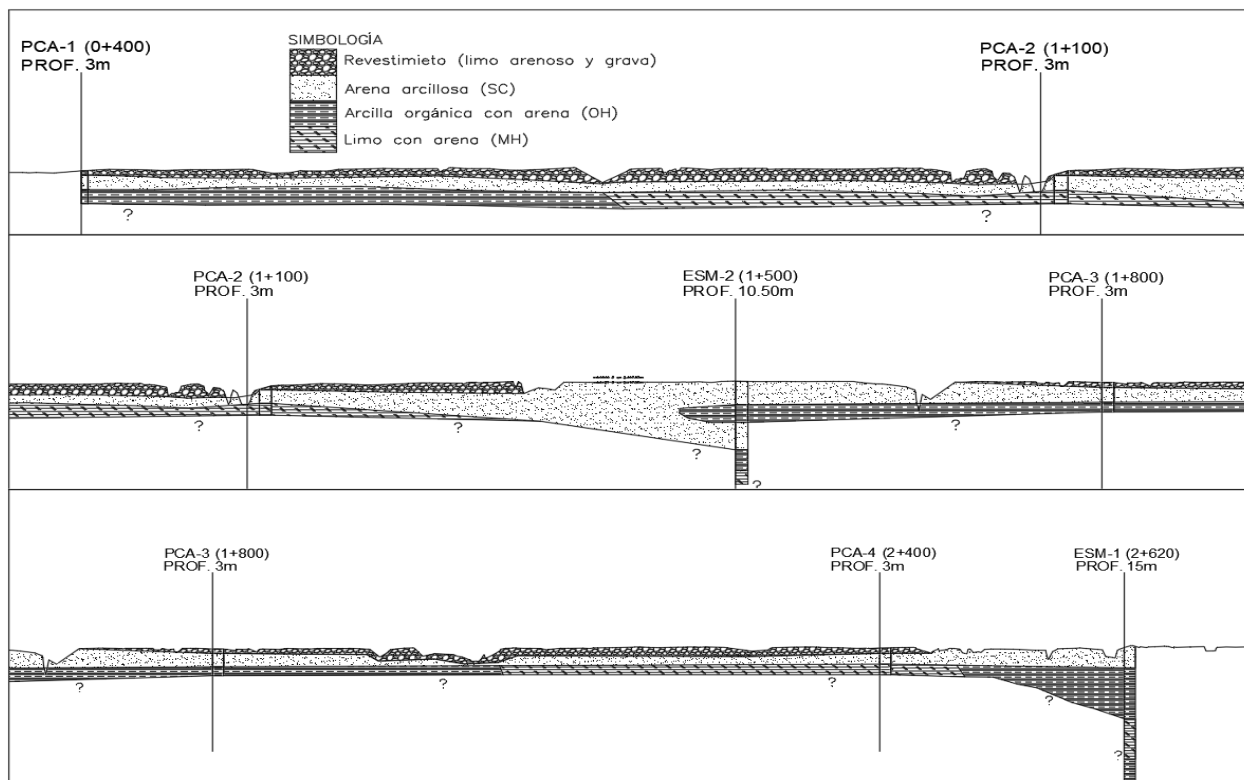


Figura 4.12. Perfil de suelo de la margen izquierda del río Lerma, en San Mateo Atenco

Los sondeos realizados en el cauce del río Lerma son el SM-3, el cual se ubicó en el centro del río sobre puente vehicular que une a San Pedro Tultepec con San Mateo Atenco, en km 2+848 y su descripción estratigráfica se presenta en la Tabla 4.11. Asimismo, el SM-4 se ejecutó en el centro del río Lerma, sobre el puente vehicular ubicado en el km 0+000; dicho sondeo se describe en la Tabla 4.12.

Tabla 4.11 Descripción estratigráfica del SM-3 (VADA Ingeniería S.A. de C.V., 2018a)

Estrato	Espesor	Descripción
---	0.00 m a -0.25 m	Pavimento del puente
---	-0.25 m a -2.20 m	Claro entre loza y espejo de agua
---	-2.20 m a -4.84 m	Tirante de agua
E1	-4.84 m a -20.74 m	Terreno natural formado por suelos tipo MH (limos inorgánicos). Con resistencia a la penetración estándar variable entre N=0 y N=10. El contenido de agua máximo en el estrato es de 54.5%. Los resultados de granulometría reportan 10% de grava, 68% de finos y 22% de arena.

Tabla 4.12 Descripción estratigráfica del SM-4 (VADA Ingeniería S.A. de C.V., 2018a)

Estrato	Espesor	Descripción
---	0.00 m a -0.32 m	Material de relleno
---	-0.32 m a -0.59 m	Concreto
---	-0.59 m a -3.44 m	Tirante de agua
E1	-3.44 m a -8.44 m	Terreno natural formado por suelos tipo OH (arcillas orgánicas de media a alta plasticidad, limos orgánicos de media plasticidad). Con resistencia a la penetración estándar variable entre N=2 y N=10. El contenido de agua máximo en el estrato es de 60%. Los resultados de granulometría reportan 5% de grava, 80% de finos y 15% de arena.

Comparando los resultados de laboratorio obtenidos para cada muestra, se observa la continuidad en el perfil de suelo. Se identificaron de forma general cuatro estratos, cuyas propiedades geotécnicas se muestran en la Tabla 4.13.

Es importante mencionar que, el tipo de suelo encontrado mediante la exploración geotécnica descrita anteriormente coincide con la descripción de la zonificación geotécnica del Valle de Toluca, zona geotécnica IV de transición (capítulo 4.2.2).

Tabla 4.13 Resumen de trabajos de laboratorio (VADA Ingeniería S.A. de C.V., 2018a)

Estrato	Exploración	Profundidad m	w%	Límites		Granulometría			SUCS
				LL%	LP%	G%	S%	F%	
E1	PCA-1	-0.4 a -1.7	24.6	28.7	21.2	14	59	27	SC
	PCA-2	-0.43 a -1.80	19.3	30.0	19.3	22	46	32	SC
	PCA-3	-0.50 a -2.00	18.2	26.0	17.5	22	50	28	SC
	PCA-4	-0.60 a -1.80	16.5	36.0	68.4	24	43	33	SC
E2	PCA-1	-1.7 a -3.0	92.9	91.4	67.4	1	24	75	OH
	PCA-2	-1.80 a -3.0	118.1	68.7	51.6	1	48	51	MH
	PCA-3	-2.00 a -3.0	123.5	100.0	72.6	1	14	85	OH
	PCA-4	-1.80 a -3.0	81.9	23.1	51.1	1	46	53	MH
	SM-1	-2.40 a -3.00	91.4	74.9	50.5	2	38	60	OH
	SM-2	-2.40 a -4.20	84.7	87.5	55.7	1	19	80	OH
	SM-1	-4.20 a -4.80	105.5	61.7	40.7	0	36	64	OH
	SM-1	-6.00 a -6.90	148.2	72.6	44.0	0	27	73	OH
E3	SM-1	-8.10 a -9.00	143.5	69.7	52.7	0	32	68	MH
	SM-1	-10.20 a -10.80	84.5	75.3	57.1	0	8	92	MH
E4	SM-2	-6.90 a -9.00	111.5	93.8	55.3	2	9	89	OH
	SM-2	-9.00 a -10.50	119.2	92.6	73.0	6	9	75	MH
	SM-1	-12.60 a -13.20	329.0	100.0	78.0	0	8	91	OH

Para fines de la presente tesis, se utiliza el sondeo ESM-1 para representar el perfil de suelo de la margen izquierda del río Lerma y el sondeo SM-3 para representar la estratigrafía del cauce (Figura 4.13). La elección del primer sondeo se basó en que tiene mayor profundidad y los espesores de los estratos que lo integran coinciden con el resto de la exploración geotécnica realizada en la margen izquierda. El sondeo SM-3 se eligió debido a que tiene más información geotécnica de la zona del cauce. Además, su cercanía los posiciona como sondeos ideales para representar la sección transversal del río.

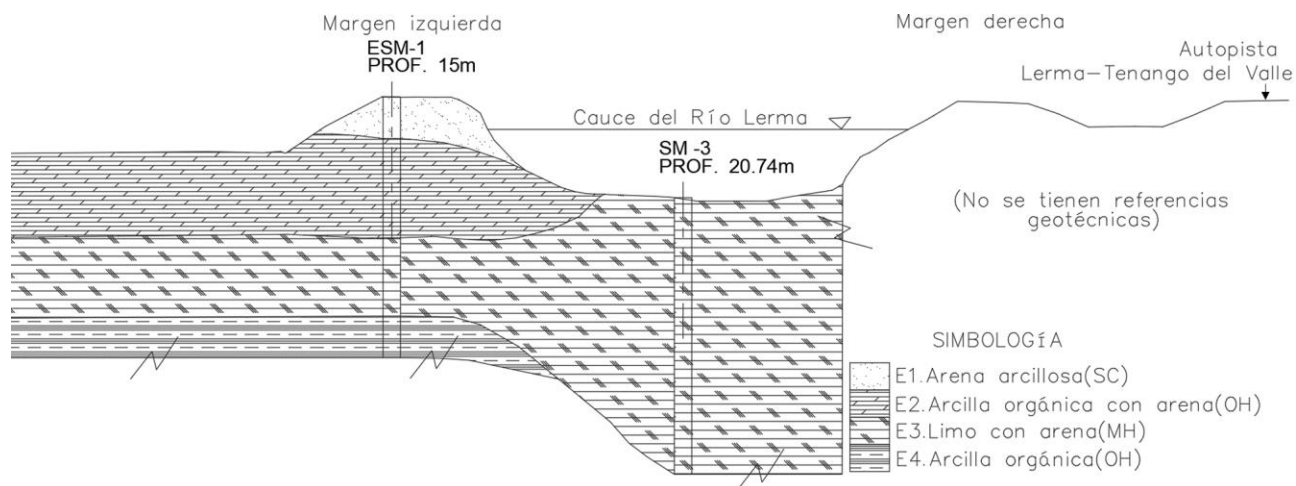


Figura 4.13. Perfil de suelo en la sección estratigráfica 2+620 (Zona UTM: 14Q, coordenada Este: 445311.00 m E, coordenada Norte: 2129936.00 m N)

Los parámetros geotécnicos necesarios para llevar a cabo el análisis de flujo de agua son: permeabilidad, relación de vacíos, contenido de agua volumétrico, relación de anisotropía y ángulo de rotación. En este trabajo, se utilizaron los valores de contenidos de agua gravimétricos mínimos y máximos de cada estrato, se propusieron valores de gravedad específica (Briaud, 2023) y permeabilidad (Flores-Berrones, 2000; López Acosta, 2017) para cada estrato y con ello, mediante correlaciones, se obtuvieron los valores de relación de vacíos y contenido de agua volumétrico, los cuales se muestran en la Tabla 4.14 y Tabla 4.15. La relación de anisotropía se asume como 1 y los estratos que consideran horizontales y por tal razón se considera 0° de ángulo de rotación.

Tabla 4.14 Parámetros geotécnicos en función del contenido de agua mínimo

Estrato	SUCS	Descripción	Permeabilidad saturada	Contenido de agua mínimo	Gravedad específica	Relación de vacíos	Contenido de agua volumétrico
			k_{sat}	w_{min}	G_s	$e = wG_s$	$\theta_w = (e/(1+e))S$
			m/s	%	---	---	---
E1	SC	Arena arcillosa	1.00×10^{-4}	16.50	2.66	0.44	0.31
E2	OH	Arcilla orgánica con arena	1.00×10^{-7}	81.90	2.60	2.13	0.68
E3	MH	Limo con arena	1.00×10^{-6}	84.50	2.73	2.31	0.70
E4	OH	Arcilla orgánica	1.00×10^{-8}	111.50	2.60	2.90	0.74

S = Grado de saturación = 1 (medio saturado)

Tabla 4.15 Parámetros geotécnicos en función del contenido de agua máximo

Estrato	SUCS	Descripción	Permeabilidad saturada	Contenido de agua máximo	Gravedad específica	Relación de vacíos	Contenido de agua volumétrico
			k_{sat}	$w_{max}\%$	G_s	$e = wG_s$	$\theta_w = (e/(1+e))S$
			m/s	%	---	---	---
E1	SC	Arena arcillosa	1.00×10^{-5}	24.60	2.64	0.65	0.39
E2	OH	Arcilla orgánica con arena	1.00×10^{-8}	148.20	2.13	3.16	0.76
E3	MH	Limo con arena	1.00×10^{-7}	143.50	2.66	3.82	0.79
E4	OH	Arcilla orgánica	1.00×10^{-9}	329.00	2.13	7.01	0.88

S = Grado de saturación = 1 (medio saturado)

4.3.2 Parámetros del contaminante

4.3.2.1 Criterio de selección del contaminante

El municipio de San Mateo Atenco (Estado de México) utiliza el 30% de su superficie en actividades agrícolas, las cuales se distribuye de la siguiente forma: 80% en maíz, 10% en haba, 5% en frijol, 3% en hortalizas y 2% en el cultivo de avena forrajera. Debido a que el maíz es el cultivo predominante, en este caso, se considera como cultivo de referencia.

El río Lerma está contaminado por metales pesados solubles, como: hierro (Fe), manganeso (Mn), cobre (Cu), cromo (Cr), plomo (Pb), zinc (Zn), potasio (K), titanio (Ti), vanadio (V), calcio (Ca) y azufre (S). El cultivo de maíz ocurre en las riberas del río Lerma y está demostrado que los cereales sembrados en áreas contaminadas presentan acumulaciones de metales en las plantas, iniciando con la absorción de contaminante en la raíz (el flujo de agua arrastra al contaminante hacia la raíz o conforme la raíz crece entra en contacto con la zona contaminada) y posteriormente fluye hasta llegar a los granos o semillas.

La relación entre los metales pesados y los cultivos de maíz ha sido bastante estudiada, algunas investigaciones se presentan en la Tabla 4.16. Los metales pesados que son absorbidos con facilidad por las plantas de maíz son los siguientes: cromo (Cr), cobre (Cu), hierro (Fe) y aluminio (Al) y plomo (Pb). De los metales mencionados, el Pb se presenta con mayor concentración en el río Lerma, por ello se propuso como el contaminante a evaluar.

Tabla 4.16 Múltiples investigaciones relacionadas con cultivos y metales pesados, parte 1

Cultivo	Metales pesados	Descripción	Sitio de estudio	Referencia
Lechuga y habas	Fe, Ca, Mn, Cu, Pb y Cr	Se estudió la contaminación por metales en suelos y vegetales, cultivadas en granjas urbanas y periurbanas de España, demostrando alta concentración de metales en el suelo y en vegetales, en niveles que podrían presentar un riesgo a la población.	Sevilla, España	(López <i>et al.</i> , 2019)
Cebollín, lechuga, tomate, pepino y yuca	Cd, Cr, Ni y Pb	Se estudió la contaminación por metales en suelos y partes comestibles de los vegetales, cultivadas en áreas contaminadas en Cuba. Las concentraciones totales y ambientalmente disponibles de Cd, Cr y Pb estaban por encima de los valores considerados seguros por los estándares internacionales, con un probable efecto adverso en la salud humana.	La Habana, Cuba	(Alfaro <i>et al.</i> , 2022)
Amaranto rojo, hoja de rábano, berenjena, espinaca, calabaza y zanahoria	Pb, Cd, Cr, Cu y Zn	Se estudió la contaminación por metales pesados en vegetales cultivados en áreas industriales de Bangladesh para evaluar los riesgos para la salud humana. Los metales estudiados se detectaron en todos los Vegetales y principalmente, los vegetales contenían Pb y Cd (elementos cancerígenos) por encima de los límites admisibles.	Bangladesh	(Islam <i>et al.</i> , 2022)
Maíz y arroz	Hg, Cd, As, Pb, Cr y Cu	Se evaluaron los riesgos que presentan los metales pesados, que se encuentran en muestras de maíz y arroz, para la salud. Concluyendo que el maíz absorbe en mayor concentración Cr y Cu.	Provincia Guizhou, China	(Xu <i>et al.</i> , 2022)

Tabla 4.17 Múltiples investigaciones relacionadas con cultivos y metales pesados, parte 2

Cultivo	Metales pesados	Descripción	Sitio de estudio	Referencia
Maíz y cebada	Cu, Fe, Zn, Pb y As	Se estudiaron los grados de concentración de metales pesados en muestras de suelos, en los cuales se cultivan maíz y cebada. Las concentraciones de Fe y As en suelos de maíz fueron más altas que en suelos de cebada. Los granos de maíz mostraron mayores concentraciones de Fe que los granos de cebada.	Andes Centrales, Perú	(Custodio <i>et al.</i> , 2021)
Maíz y trigo	Zn, Cd, Pb, Cr, y Ni	Evaluaron la acumulación de metales pesados en suelos y granos, el riesgo para salud bajo riego por goteo de aguas residuales municipales tratadas. Se encontró que, en el maíz, el cromo (Cr) está por encima de los límites establecidos por la EPA, generando un riesgo para la salud.	Isfahán, Irán	(Asgari y Cornelis, 2015)
Maíz y frijol	Pb	Determinaron el efecto del plomo en los procesos de inhibición, germinación y crecimiento en el frijol y el maíz, concluyendo que los procesos fisiológicos son afectados en ambas plantas.	Valle del Cauca, Colombia	(Isaza-Guzmán, 2013)
Lechuga	Pb	Estudiaron lechugas sembradas a cielo abierto y bajo invernadero, demostrando que las lechugas a cielo abierto tienen mayor concentración de plomo, sin embargo, los valores no superan los límites establecidos.	Azuay, Ecuador	(Vázquez <i>et al.</i> , 2019)
Calabaza	Pb	Se cultivó calabaza en suelo contaminado con plomo y se demostró que es posible la migración de plomo desde la raíz hasta las estructuras comestibles de la planta.	Acolman, Estado de México	(Solís-Mendoza <i>et al.</i> , 2012)

De acuerdo con Oca-Jiménez *et al.* (2022b) la concentración promedio de plomo soluble a lo largo del río Lerma es de 1.1 g m^{-3} , específicamente en la localidad de San Pedro Tultepec, la concentración de plomo soluble es de 1.0 g m^{-3} . Dicha localidad se encuentra en la margen derecha del río Lerma, opuesta al municipio de San Mateo Atenco. Por lo tanto, se propuso este valor para evaluar la expansión que tiene el contaminante en un periodo de 150 años y determinar si los niveles de concentración de plomo están dentro de los límites permisibles de las siguientes normas:

- NOM-127-SSA1-2021. Señala un límite permisible de 0.01 mg l^{-3} (0.01 g m^{-3}) en el agua para uso y consumo humano.
- NOM-001-SEMARNAT-2021. Indica un límite permisible de 0.4 mg l^{-3} (0.4 g m^{-3}) para la concentración de plomo en suelos.
- NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. Establece un límite permisible de 0.5 mg l^{-3} (0.5 g m^{-3}) para la concentración de plomo en suelos.

4.3.2.2 Parámetros geoquímicos

Los parámetros necesarios para llevar a cabo el análisis de flujo de solutos son: coeficiente de difusión, función de adsorción, descomposición, densidad seca, dispersión longitudinal y transversal; los cuales se describen en la Tabla 4.18.

Tabla 4.18 Parámetros necesarios para realizar análisis de flujo de solutos

Parámetro	Símbolo	Unidades	¿Qué representa físicamente?
Función del coeficiente de difusión	$D(\theta_w)$	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$	Define la relación entre el contenido de agua volumétrico y el coeficiente de difusión molecular.
Función de Adsorción	$K_d(C)$	g g^{-1}	Define la relación entre la concentración del agua en los poros y la adsorción de soluto correspondiente en un material.
Descomposición	$t_{1/2}$	s	Tiempo de vida de un soluto que se descompone.
Densidad seca	ρ_d	g m^{-3}	Interviene en la función de adsorción
Dispersión longitudinal	α_L	m	Se refiere al movimiento del fluido que ocurre de forma longitudinal entre los canales intergranulares.
Dispersión transversal	α_T	m	Representa el movimiento del fluido de forma transversal, debido a la bifurcación de los caminos que el fluido encuentra.

Para los análisis, se consideró un coeficiente de difusión del plomo de $D=7.36 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ (Roque-Martínez, 2015). Utilizando los valores de las Tabla 4.14 y 4.15, y mediante la fórmula $\rho_d=(G_s/(1+e))\rho_w$, se obtuvieron los valores de densidad de cada estrato. Se supuso que el plomo soluble no presenta descomposición. La relación de dispersión se estableció como se muestra en la Tabla 4.19. Los valores del coeficiente de distribución corresponden a los datos presentados por Allan-Freeze y Cherry, (1979) y Fetter et al. (2018), considerando $K_d=0$, $K_d=1$ y $K_d=10$.

Tabla 4.19 Valores de dispersión utilizados para el análisis de flujo de solutos

Estrato	SUCS	Descripción	Dispersión longitudinal	Dispersión transversal	Relación de dispersión
			α_L	α_T	α_L/α_T
			m	m	---
E1	SC	Arena arcillosa	4	2	2
E2	OH	Arcilla orgánica con arena	1	0.5	2
E3	MH	Limo con arena	2	1	2
E4	OH	Arcilla orgánica	1	0.5	2

4.4 Modelación numérica

4.4.1 Consideraciones generales

La modelación numérica, en el análisis de flujo de contaminantes, es una herramienta que permite considerar diversas condiciones de frontera, de geometría y de flujo, simulando problemáticas realistas. En este caso, se simula el flujo de agua y contaminantes con los módulos SEEP/W y CTRAN/W, correspondientes al programa de Geostudio, de la empresa GeoSlope.

El análisis de flujo de agua se realiza en el programa SEEP/W, el cual cuenta con las funciones para simular el flujo de agua en estado saturado y parcialmente saturado. Además, el programa tiene los fundamentos matemáticos para evaluar casos de flujo establecido o transitorio, unidimensionales, bidimensionales y tridimensionales.

En SEEP/W la malla de elementos finitos puede modificarse según el tamaño de elementos que se desee, ya sea una región, una línea o un punto. Los tipos de mallas son: cuadrilátera y triangular no estructurada; triangular no estructurada; cuadrilátera estructurada; y triangular estructurada. Para tener una mayor confiabilidad en los resultados, es importante conocer las propiedades o características de las condiciones de frontera disponibles en el programa, las cuales son: carga hidráulica, presión constante, carga distante, flujo total, flujo unitario, superficie potencial de flujo y condiciones de frontera en regiones infinitas.

De acuerdo con las condiciones del sitio en estudio, el análisis de flujo de agua se considera saturado y, para evaluar la condición más desfavorable, se asume estable. Se usa una malla de elementos finitos tipo triangular no estructurada, ya que se adapta a todas las formas geométricas de la región de flujo, independientemente de que estas sean irregulares.

Las condiciones de frontera de la región se muestran en la Figura 4.14, se componen por líneas equipotenciales, las cuales indican el nivel de aguas arriba (cauce del río) y se representa por una frontera de carga hidráulica constante con un valor de 22 m. El nivel aguas abajo (ribera) se representa con una frontera de carga hidráulica constante con un valor de 20 m. Debido a que es un problema de flujo no confinado, es necesario considerar la frontera suelo infiltrado – aire, que indica la posible zona de descarga de la línea de corriente superior. Ante el desconocimiento de la estratigrafía del sitio, después de 11.5 m de profundidad ($y=8.5$ m), la condición de frontera inferior se supone impermeable.

El análisis de flujo de solutos se realiza en el programa CTRAN/W, el cual permite modelar problemas geoambientales de transferencia de solutos considerando difusión, advección, dispersión, adsorción o descomposición; el programa está formulado para medios saturados o no saturados. En CTRAN/W las configuraciones para la malla de elementos finitos corresponden a las mismas que se utilizan en SEEP/W. Las condiciones de frontera que el programa permite emplear son: concentración de soluto (g m^{-3}), tasa de masa del soluto (g s^{-1}), flujo de la masa del soluto (g s^{-1}), concentración de la masa del soluto (g m^{-3}) y flujo de masa de salida de soluto libre.

En este caso, el análisis de flujo de solutos es dependiente del análisis de flujo de agua, por ello se utiliza el mismo tipo de mallas de elementos finitos; se considera un flujo de solutos de forma transitorio, mediante el proceso de advección – dispersión, para un tiempo de 150 años. Las fronteras utilizadas son: concentración de solutos y salida de soluto libre, las cuales se muestran en la Figura 4.15.

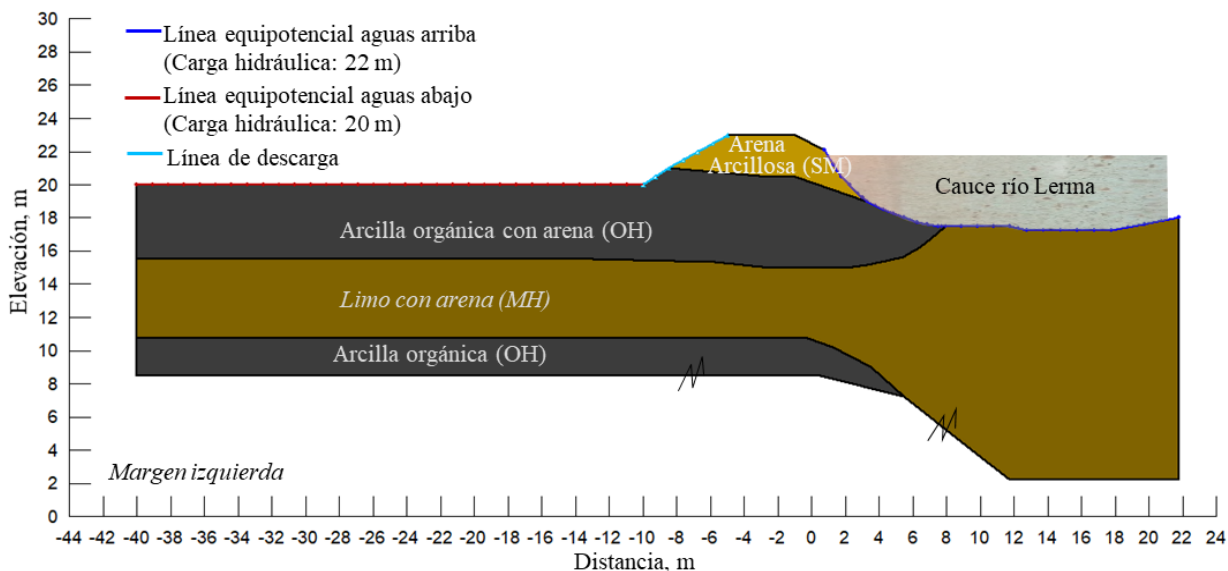


Figura 4.14. Condiciones de frontera aguas arriba y aguas abajo en SEEP/W

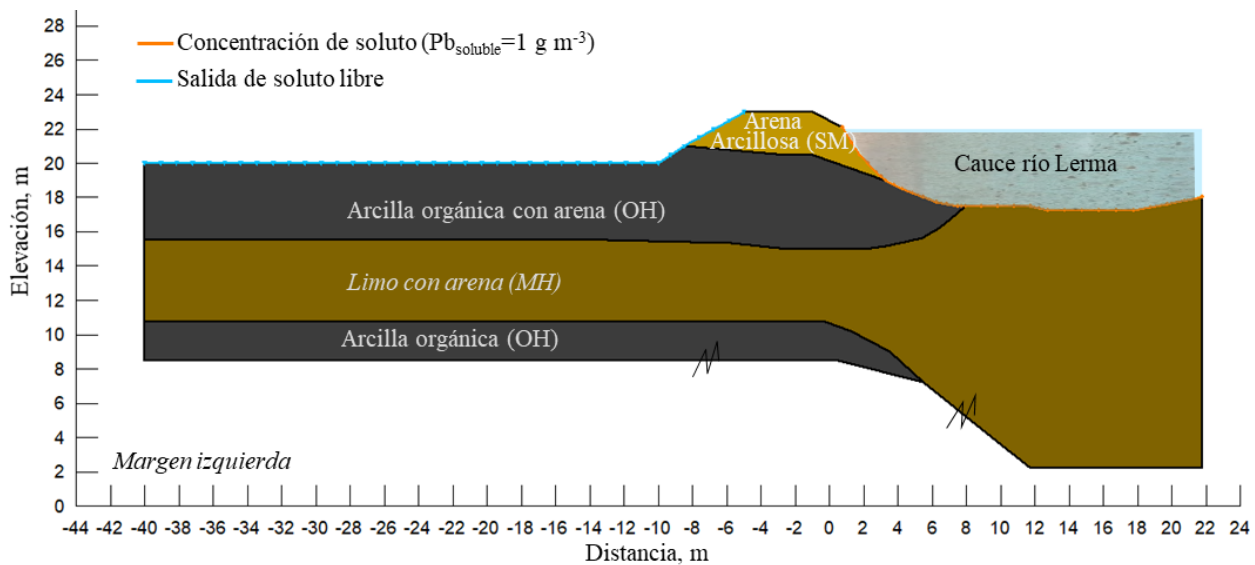


Figura 4.15 Condiciones de frontera en CTRAN/W

Para analizar las concentraciones de solutos en diferentes secciones de la región de estudio, se consideró un corte horizontal en la superficie horizontal de la ribera izquierda y un corte vertical ubicado al pie de la margen izquierda. Este último permite conocer la concentración del soluto respecto a la profundidad. Aunado a ello, para obtener resultados puntuales, se consideraron dos

puntos llamados: ribera e intermedio (entre el cauce del río Lerma y la ribera). La ubicación de los cortes y nodos se muestra en la Figura 4.16.

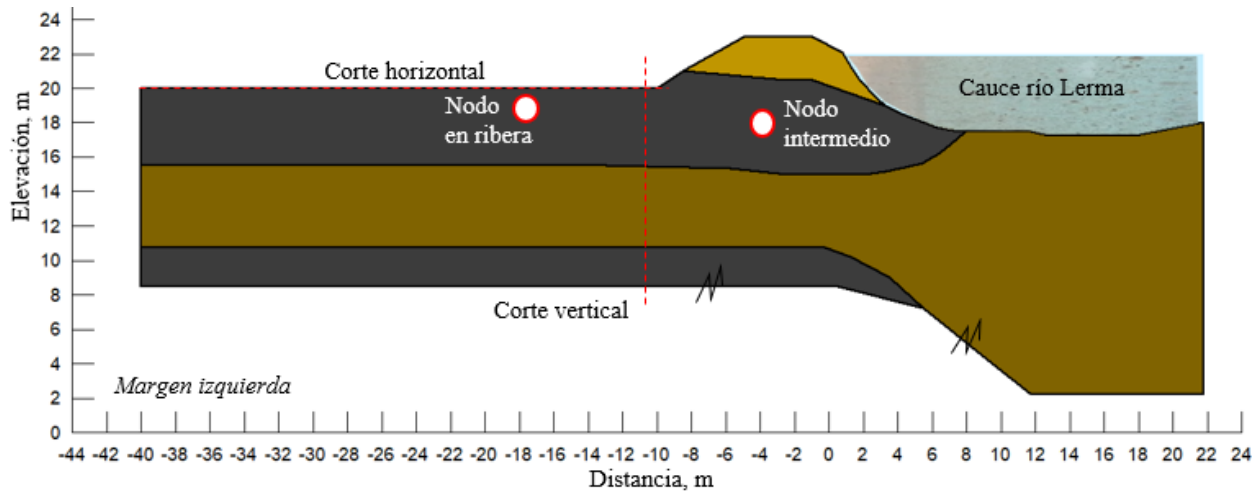


Figura 4.16. Ubicación de nodos en las diferentes secciones de la región de análisis

4.4.2 Desarrollo de los análisis de flujo de solutos

Con la finalidad de comprender la sensibilidad de los parámetros relacionados con el flujo de solutos se evaluaron ocho posibles casos, los cuales se explican a continuación.

Caso I. Contenido de agua gravimétrico mínimo

De acuerdo con resultados de laboratorio que se muestran en la Tabla 4.13, se utilizó el contenido de agua gravimétrico mínimo de cada estrato y se propusieron valores de permeabilidad y gravedad específica según el tipo de suelo y contenido de agua. Así, se obtuvieron valores de relación de vacíos y contenidos de agua volumétricos, los cuales se muestran en la Tabla 4.14. Dichos datos se utilizaron para evaluar el flujo de agua en SEEP/W. En el caso de transporte de solutos en CTRAN/W, los parámetros de entrada se suponen utilizando los valores de dispersión de la Tabla 4.19 y se considera un coeficiente de distribución de $K_d=0$, no existe interacción entre suelo – contaminante. Con este caso se pretende conocer cuáles son las concentraciones de contaminante cuando el suelo presenta contenidos de agua mínimos.

Caso II. Contenido de agua gravimétrico máximo

De acuerdo con resultados de laboratorio que se muestran en la Tabla 4.13, se utilizó el contenido de agua gravimétrico máximo de cada estrato y se propusieron valores de permeabilidad y gravedad específica según el tipo de suelo y contenido de agua. Así, se obtuvieron valores de relación de vacíos y contenidos de agua volumétricos (Tabla 4.15). Dichos datos se utilizaron para evaluar el flujo de agua en SEEP/W. En el caso de transporte de solutos en CTRAN/W, los parámetros de entrada se suponen utilizando los valores de dispersión de la Tabla 4.19, y se considera un coeficiente de distribución de $K_d=0$, no existe interacción entre suelo – contaminante. Con este caso

se pretende conocer cuáles son las concentraciones de contaminante cuando el suelo presenta contenidos de agua máximos y con ello, identificar qué diferencias ocurren respecto al caso I. Cabe resaltar que este caso se tienen valores de permeabilidad menores que en el caso I.

Caso III. Contenido de agua gravimétrico mínimo y coeficiente de distribución $K_d=1$

El Caso I se considera el más desfavorable ya que representa una condición más permeable que el caso II. Por lo tanto, en este caso se suponen los mismos criterios que en el caso I, modificando el valor del coeficiente de adsorción por $K_d=1$ para representar la interacción suelo – contaminante. Con este caso se pretende conocer cómo se modifican las concentraciones de contaminante, cuando se suponen interacciones entre suelo – contaminante.

Caso IV. Contenido de agua gravimétrico mínimo y coeficiente de distribución $K_d=10$

Se consideran los mismos criterios que en el caso I, modificando el valor del coeficiente de adsorción por $K_d=10$ para representar una mayor interacción suelo – contaminante. Con este caso se pretende conocer cómo se modifican las concentraciones de contaminante, cuando se suponen interacciones entre suelo – contaminante y cómo pueden variar dichas concentraciones cuando se considera un coeficiente de distribución mayor.

Caso V. Contenido de agua gravimétrico mínimo y relación de dispersión $\alpha_L/\alpha_T=1$

Al igual que en el Caso III, se utilizó el contenido de agua gravimétrico mínimo de cada estrato y se propusieron valores de permeabilidad y gravedad específica según el tipo de suelo y contenido de agua. Así, se obtuvieron valores de relación de vacíos y contenidos de agua volumétricos, los cuales se muestran en la Tabla 4.14. Dichos datos se utilizaron para evaluar el flujo de agua en SEEP/W. En el caso de transporte de solutos, en CTRAN/W, se considera una relación de dispersión $\alpha_L/\alpha_T=10/10=1$ y un coeficiente de distribución de $K_d=1$. De esta forma se pretende conocer cómo se modifican las concentraciones del contaminante cuando el suelo presenta una menor relación de dispersión (respecto al caso III).

Caso VI. Contenido de agua gravimétrico mínimo y relación de dispersión $\alpha_L/\alpha_T=2$

Se suponen los criterios mencionados en el Caso V, modificando la relación de dispersión a $\alpha_L/\alpha_T=10/5=2$. De esta forma se pretende conocer cómo se modifican las concentraciones del contaminante cuando el suelo presenta una mayor relación de dispersión (respecto al Caso V).

Caso VII. Contenido de agua gravimétrico mínimo y relación de dispersión $\alpha_L/\alpha_T=5$

Se suponen los criterios mencionados en el Caso V, modificando la relación de dispersión a $\alpha_L/\alpha_T=10/2=5$. De esta forma se pretende conocer cómo se modifican las concentraciones del contaminante cuando el suelo presenta una mayor relación de dispersión (respecto al Caso V).

Caso VIII. Contenido de agua gravimétrico mínimo y relación de dispersión $\alpha_L/\alpha_T=20$

Se suponen los criterios mencionados en el Caso V, modificando la relación de dispersión a $\alpha_L/\alpha_T=10/0.5=20$. De esta forma se pretende conocer cómo se modifican las concentraciones del contaminante cuando el suelo presenta una mayor relación de dispersión (respecto al Caso V).

4.4.3 Resumen de resultados y comentarios

En este capítulo se muestra un resumen de los resultados obtenidos en cada caso analizado, se expone la variación de concentración de plomo soluble en: 5 años, 10 años, 20 años y 50 años. Los valores corresponden a los nodos intermedio y ribera; a la sección vertical (en eje “y”: superior e inferior) y a la sección horizontal (en eje “x”: pie de bordo y múltiples distancias en la ribera). Es importante recordar que la concentración de plomo soluble utilizada en el cauce corresponde a una concentración promedio medida en el año 2021, por lo tanto, los resultados para 5 años se asocian al año 2026; para 10 años se relaciona con el año 2031; para 20 años se refieren al año 2041 y 50 años se asocia al año 2071. Los resultados completos de cada caso se encuentran en el ANEXO II.

Los resultados obtenidos se comparan con las concentraciones límites de plomo soluble establecidas por las normas NOM-001-SEMARNAT-2021 (límite permisible de plomo: 0.4 g m^{-3}), NOM-127-SSA1-2021 (límite permisible de plomo: 0.01 g m^{-3}) y NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (límite permisible de plomo: 0.5 g m^{-3}). Por lo tanto, los valores subrayados en las Tablas 4.20, 4.21, 4.22 y 4.23 son los que exceden alguno de los límites permisibles establecidos por la normativa mexicana. En general, se observa que la concentración de plomo soluble aumenta respecto al tiempo. No obstante, no es un crecimiento lineal y varía según sea el caso.

Para el Caso I, a partir de 5 años, en el pie del bordo de la margen izquierda la concentración de plomo soluble es mayor que 0.4 g m^{-3} y 0.5 g m^{-3} , excediendo los límites establecidos por las normas. Lo anterior indica que en ese sitio el suelo está contaminado. En 10 años, la concentración de plomo soluble en la superficie de la ribera (10 m horizontales a partir del pie del bordo) es mayor que 0.01 g m^{-3} , excediendo lo establecido por la norma mexicana para uso y consumo de agua, por lo que no se recomienda extraer agua subterránea en dicha área. La concentración de plomo soluble mayor que 0.01 g m^{-3} alcanza una extensión de 20 m (a partir del pie del bordo) en un tiempo de 20 años. En 50 años, la contaminación del suelo por plomo soluble (concentración mayor que 0.4 g m^{-3}) se extiende hasta 20 m de ribera.

Para el Caso II, a partir de 5 años, en el pie del bordo de la margen izquierda la concentración de plomo soluble es mayor que 0.01 g m^{-3} , excediendo lo establecido por la norma mexicana para uso y consumo de agua, por lo que no se recomienda extraer agua subterránea en dicha área. No obstante, debido a que este caso presenta las permeabilidades más bajas, el flujo de contaminantes no se extiende en la ribera en concentraciones que excedan los límites establecidos por las normas.

Los Casos III y IV tienen condiciones similares que el Caso I, únicamente se variaron los coeficientes de distribución (para el caso I: $K_d=0$; para el caso III: $K_d=1$ y para el caso IV: $K_d=10$) y se observa que los resultados son similares en todos los casos.

Los Casos V, VI, VII y VIII tienen condiciones similares que el Caso III. No obstante, en estos casos se variaron las relaciones de dispersión, considerando: $\alpha_L/\alpha_T=1$ (caso V), $\alpha_L/\alpha_T=2$ (caso VI), $\alpha_L/\alpha_T=5$ (caso VII) y $\alpha_L/\alpha_T=20$ (caso VIII). Los resultados se muestran en la Figura 4.17. Inicialmente se observa que, a menor relación de dispersión se tienen concentraciones de contaminante mayores. Cuando la relación de dispersión es $\alpha_L/\alpha_T=1$ se tiene mayor concentración de plomo soluble que cuando la relación de dispersión es $\alpha_L/\alpha_T=20$. Conforme incrementa el tiempo, la concentración del contaminante tiende a ser estable y se observa un cambio en el comportamiento, a menor relación de dispersión se tienen concentraciones de contaminante menores. Cuando la relación de dispersión es $\alpha_L/\alpha_T=1$ se tiene menor concentración de plomo soluble que cuando la relación de dispersión es $\alpha_L/\alpha_T=20$.

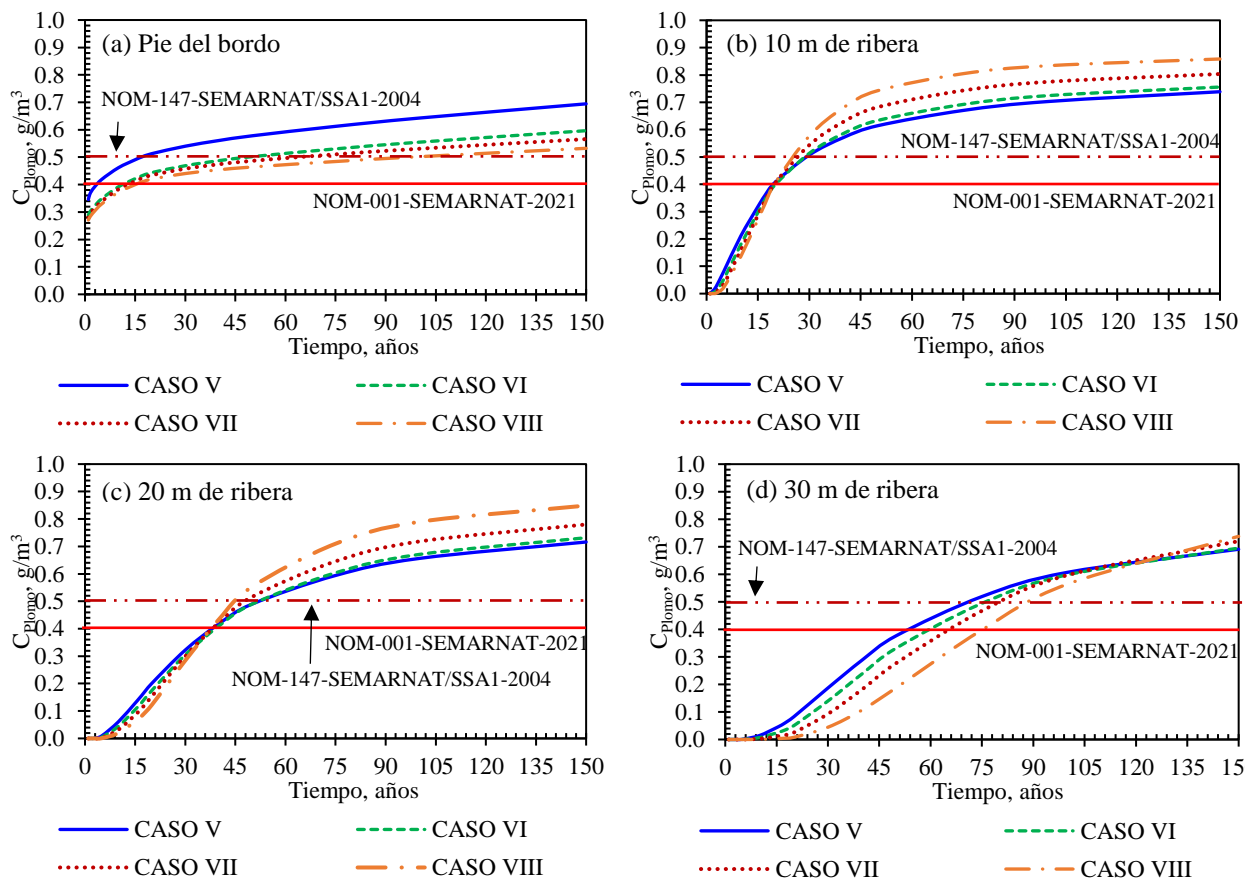


Figura 4.17. Gráficas de concentración de plomo soluble vs tiempo, para $\alpha_L/\alpha_T=1$ (caso V), $\alpha_L/\alpha_T=2$ (caso VI), $\alpha_L/\alpha_T=5$ (caso VII) y $\alpha_L/\alpha_T=20$ (caso VIII), en: a) pie del bordo, b) 10 m de ribera, c) 20 m de ribera y d) 30 m de ribera

En comparación con la normativa mexicana, en la Figura 4.17 se indican con líneas horizontales los límites establecidos por las normas NOM-001-SEMARNAT-2021 y NOM-147-

SEMARNAT/SSA1-2004. Se observa que, en el pie del bordo las concentraciones de plomo soluble exceden las normas en un periodo aproximado de 9 a 12 años, dependiendo del caso. En 10 m de ribera, las concentraciones de plomo soluble son mayores que 0.4 g m^{-3} en 21 años y mayores que 0.5 g m^{-3} en 30 años. En 20 m de ribera, las concentraciones de plomo soluble son mayores que 0.4 g m^{-3} en 40 años y mayores que 0.5 g m^{-3} en 50 años, aproximadamente. Finalmente, en 30 m de ribera las concentraciones de plomo soluble son mayores que 0.4 g m^{-3} en un periodo de 50 a 90 años, dependiendo del caso. Es importante señalar que, la NOM-127-SSA1-2021 establece como límite permisible de plomo en agua para usos y consumo humano de 0.01 g m^{-3} , este valor es relativamente pequeño y por ello no se colocó dicha figura. No obstante, los resultados completos se muestran en el ANEXO II.

Tabla 4.20 Resumen de resultados de la concentración de plomo soluble para un tiempo de 5 años

Caso	Concentración de plomo en 5 años, en g m^{-3}								
	Nodos		Vertical*		Horizontal (coordenada en "x")				
	Intermedio	Ribera	Superior	Inferior	Pie del bordo	Ribera			
			y = 20	y = 8.5		x = -10	x = -15	x = -20	x = -30
I	<u>0.281</u>	0.002	<u>0.044</u>	<u>0.061</u>	<u>0.738</u>	0.009	0.001	0.000	0.000
II	0.002	0.000	0.000	0.000	<u>0.106</u>	0.000	0.000	0.000	0.000
III	<u>0.278</u>	0.002	<u>0.043</u>	<u>0.025</u>	<u>0.104</u>	0.006	0.001	0.000	0.000
IV	<u>0.278</u>	0.002	<u>0.043</u>	<u>0.025</u>	<u>0.103</u>	0.006	0.001	0.000	0.000
V	<u>0.352</u>	<u>0.103</u>	<u>0.236</u>	<u>0.273</u>	<u>0.419</u>	<u>0.186</u>	<u>0.081</u>	0.009	0.001
VI	<u>0.373</u>	<u>0.070</u>	<u>0.216</u>	<u>0.220</u>	<u>0.348</u>	<u>0.134</u>	<u>0.052</u>	0.005	0.000
VII	<u>0.411</u>	<u>0.049</u>	<u>0.211</u>	<u>0.196</u>	<u>0.339</u>	<u>0.103</u>	<u>0.035</u>	0.002	0.000
VIII	<u>0.547</u>	<u>0.034</u>	<u>0.227</u>	<u>0.188</u>	<u>0.330</u>	<u>0.082</u>	<u>0.022</u>	0.001	0.000

*coordenada en "y"

-Los valores subrayados exceden los límites permisibles

Tabla 4.21 Resumen de resultados de la concentración de plomo soluble para un tiempo de 10 años

Caso	Concentración de plomo en 10 años, en g m^{-3}								
	Nodos		Vertical*		Horizontal (coordenada en "x")				
	Intermedio	Ribera	Superior	Inferior	Pie del bordo	Ribera			
			y = 20	y = 8.5		x = -10	x = -15	x = -20	x = -30
I	<u>0.552</u>	<u>0.052</u>	<u>0.225</u>	<u>0.220</u>	<u>1.011</u>	<u>0.093</u>	<u>0.035</u>	0.003	0.000
II	<u>0.018</u>	0.000	0.000	0.003	<u>0.223</u>	0.000	0.000	0.000	0.000
III	<u>0.549</u>	<u>0.051</u>	<u>0.221</u>	<u>0.145</u>	<u>0.200</u>	<u>0.081</u>	<u>0.034</u>	0.003	0.000
IV	<u>0.548</u>	<u>0.051</u>	<u>0.221</u>	<u>0.145</u>	<u>0.198</u>	<u>0.081</u>	<u>0.034</u>	0.003	0.000
V	<u>0.438</u>	<u>0.240</u>	<u>0.387</u>	<u>0.386</u>	<u>0.462</u>	<u>0.320</u>	<u>0.211</u>	<u>0.061</u>	<u>0.014</u>
VI	<u>0.466</u>	<u>0.209</u>	<u>0.377</u>	<u>0.342</u>	<u>0.392</u>	<u>0.282</u>	<u>0.180</u>	<u>0.044</u>	0.007
VII	<u>0.515</u>	<u>0.189</u>	<u>0.383</u>	<u>0.333</u>	<u>0.383</u>	<u>0.267</u>	<u>0.159</u>	<u>0.032</u>	0.003
VIII	<u>0.677</u>	<u>0.169</u>	<u>0.410</u>	<u>0.344</u>	<u>0.372</u>	<u>0.260</u>	<u>0.136</u>	<u>0.020</u>	0.001

*coordenada en "y"

-Los valores subrayados exceden los límites permisibles

Tabla 4.22 Resumen de resultados de la concentración de plomo soluble para un tiempo de 20 años

Caso	Concentración de plomo en 20 años, en g m ⁻³								
	Nodos		Vertical*		Horizontal (coordenada en "x")				
	Intermedio	Ribera	Superior	Inferior	Pie del bordo	Ribera			
			y = 20	y = 8.5		x = -10	x = -15	x = -20	x = -30
I	<u>0.824</u>	<u>0.273</u>	<u>0.566</u>	<u>0.538</u>	<u>1.228</u>	<u>0.374</u>	<u>0.214</u>	<u>0.034</u>	0.001
II	<u>0.073</u>	0.000	0.001	<u>0.014</u>	<u>0.443</u>	0.000	0.000	0.000	0.000
III	<u>0.818</u>	<u>0.270</u>	<u>0.558</u>	<u>0.436</u>	<u>0.373</u>	<u>0.350</u>	<u>0.212</u>	<u>0.034</u>	0.001
IV	<u>0.815</u>	<u>0.270</u>	<u>0.558</u>	<u>0.436</u>	<u>0.369</u>	<u>0.350</u>	<u>0.212</u>	<u>0.034</u>	0.001
V	<u>0.515</u>	<u>0.433</u>	<u>0.549</u>	<u>0.513</u>	<u>0.513</u>	<u>0.486</u>	<u>0.407</u>	<u>0.201</u>	<u>0.082</u>
VI	<u>0.550</u>	<u>0.427</u>	<u>0.552</u>	<u>0.485</u>	<u>0.444</u>	<u>0.477</u>	<u>0.398</u>	<u>0.175</u>	<u>0.050</u>
VII	<u>0.606</u>	<u>0.439</u>	<u>0.571</u>	<u>0.497</u>	<u>0.435</u>	<u>0.501</u>	<u>0.404</u>	<u>0.153</u>	<u>0.025</u>
VIII	<u>0.781</u>	<u>0.449</u>	<u>0.606</u>	<u>0.533</u>	<u>0.420</u>	<u>0.535</u>	<u>0.405</u>	<u>0.122</u>	0.008

*coordenada en "y"

-Los valores subrayados exceden los límites permisibles

Tabla 4.23 Resumen de resultados de la concentración de plomo soluble para un tiempo de 50 años

Caso	Concentración de plomo en 50 años, en g m ⁻³								
	Nodos		Vertical*		Horizontal (coordenada en "x")				
	Intermedio	Ribera	Superior	Inferior	Pie del bordo	Ribera			
			y = 20	y = 8.5		x = -10	x = -15	x = -20	x = -30
I	<u>0.944</u>	<u>0.761</u>	<u>0.854</u>	<u>0.860</u>	<u>1.276</u>	<u>0.810</u>	<u>0.728</u>	<u>0.432</u>	<u>0.104</u>
II	<u>0.304</u>	0.001	<u>0.032</u>	<u>0.076</u>	<u>0.805</u>	0.009	0.000	0.000	0.000
III	<u>0.923</u>	<u>0.754</u>	<u>0.841</u>	<u>0.741</u>	<u>0.525</u>	<u>0.779</u>	<u>0.721</u>	<u>0.429</u>	<u>0.104</u>
IV	<u>0.918</u>	<u>0.753</u>	<u>0.841</u>	<u>0.739</u>	<u>0.512</u>	<u>0.779</u>	<u>0.721</u>	<u>0.428</u>	<u>0.104</u>
V	<u>0.571</u>	<u>0.625</u>	<u>0.674</u>	<u>0.623</u>	<u>0.578</u>	<u>0.633</u>	<u>0.614</u>	<u>0.490</u>	<u>0.377</u>
VI	<u>0.606</u>	<u>0.644</u>	<u>0.683</u>	<u>0.600</u>	<u>0.502</u>	<u>0.643</u>	<u>0.634</u>	<u>0.490</u>	<u>0.332</u>
VII	<u>0.661</u>	<u>0.693</u>	<u>0.702</u>	<u>0.620</u>	<u>0.487</u>	<u>0.692</u>	<u>0.682</u>	<u>0.516</u>	<u>0.278</u>
VIII	<u>0.831</u>	<u>0.752</u>	<u>0.727</u>	<u>0.658</u>	<u>0.464</u>	<u>0.752</u>	<u>0.743</u>	<u>0.553</u>	<u>0.188</u>

*coordenada en "y"

-Los valores subrayados exceden los límites permisibles

Además de comparar los resultados con las normativas mexicanas, se compararon los resultados entre sí para obtener valores cuantitativos (en porcentaje) y de ese modo conocer el impacto que tiene cada parámetro, según el valor que se le asigne (ANEXO III).

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

El objetivo principal de esta tesis fue evaluar si el plomo soluble que se encuentra en el río Lerma se transporta, mediante flujo subterráneo, hacia la ribera izquierda del río, ubicado en el municipio de San Mateo Atenco (Estado de México). Con este fin, esta tesis se dividió en cinco capítulos, iniciando con una breve introducción al tema en el Capítulo 1. En el Capítulo 2 se describió la importancia de la geotecnia ambiental y su aplicación en el aprovechamiento de recursos hídricos. Se expusieron las normas mexicanas vigentes relacionadas con el tema de contaminación del agua y suelo, se especificaron los valores admisibles de contaminantes y los conceptos fundamentales para entender el tema de transporte de contaminantes.

En el Capítulo 3 se presentó la ecuación de transporte de contaminantes en suelos saturados, se explicaron los procesos de transporte en suelos y los procesos de atenuación. Asimismo, se describieron las soluciones analíticas y numéricas; se detallaron los conceptos básicos sobre el flujo en medios saturados y no saturados, confinados o no confinados, transitorios o establecidos. En este capítulo, se mencionaron las diferentes condiciones de frontera utilizadas en el análisis de flujo de contaminantes, las posibles fuentes contaminantes y las consecuencias de la contaminación del agua y suelo.

En el Capítulo 4 se implementó el modelo numérico de transporte de solutos, utilizando el método de advección-dispersión, para determinar la concentración de plomo soluble para un periodo de 150 años en el caso de aplicación. Al inicio del capítulo se planteó la problemática y las condiciones geográficas y geotécnicas del sitio en estudio. Se indicaron los parámetros geotécnicos y geoquímicos necesarios en el análisis de transporte de contaminantes. Posteriormente, se seleccionó el contaminante y el grado de concentración, utilizados en los análisis de esta investigación. Finalmente, se presentan los resultados de la modelación numérica ejecutada con los módulos de GEOSLOPE SEEP/W y CTRAN/W.

Comentarios concluyentes generales

Dada la diferencia de elevaciones que existe entre el cauce y la ribera, sí es posible que ocurra flujo de agua subterránea desde el cauce hasta las riberas del río Lerma. Este flujo es el medio de transporte para los contaminantes solubles del cauce del río Lerma, como el plomo soluble.

Por lo anterior, se plantearon ocho casos (I a VIII) para simular el transporte de plomo soluble en el sitio de estudio y se implementó el método de advección – dispersión para evaluar el flujo del plomo soluble hacia las riberas. Para los Casos I y II se consideraron los contenidos de agua gravimétricos de cada estrato y se propusieron valores de permeabilidad y gravedad específica según el tipo de suelo y su contenido de agua. Además, en la modelación numérica se utilizaron los valores de dispersión asignados para cada estrato y se consideró un coeficiente de distribución de $K_d=0$ (no existe interacción entre suelo – contaminante). Para los Casos III y IV se propusieron criterios similares a los Casos I y II, no obstante, se modificó el valor de $K_d=0$ por $K_d=1$ y $K_d=10$. Para los Casos V, VI, VII y VIII también se consideraron condiciones similares a los Casos I y II, pero ahora modificando la relación de dispersión, asumiendo $\alpha_L/\alpha_T=1$ (caso V), $\alpha_L/\alpha_T=2$ (caso VI), $\alpha_L/\alpha_T=5$ (caso VII) y $\alpha_L/\alpha_T=20$ (caso VIII).

De los escenarios planteados, se considera que el Caso I es el más desfavorable ya que se asumen coeficientes de permeabilidad máximos, además de considerar que no existe interacción suelo – contaminante, en consecuencia, se tiene mayor flujo de plomo soluble. El Caso II es el más favorable porque se consideran permeabilidades mínimas para cada estrato y con ello, se tiene menor flujo de plomo soluble. Sin embargo, se considera que el Caso III es el que simula de forma más aproximada las condiciones reales del caso de estudio ya que se asumen permeabilidades altas, pero se considera la interacción suelo – contaminante. Es importante señalar que, es necesario realizar trabajos de campo y laboratorio para corroborar que los parámetros propuestos en la presente tesis representan las condiciones del sitio.

Comentarios concluyentes sobre la concentración de plomo soluble en las riberas del río Lerma y su relación con la normativa mexicana:

Existen tres normas mexicanas que establecen los límites de plomo soluble en el suelo y agua, estas normas son: a) NOM-001-SEMARNAT-2021: establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales (límite permisible: 0.4 g m^{-3}), b) NOM-127-SSA1-2021: establece los límites permisibles de calidad que debe cumplir el agua para su uso y consumo humano (límite permisible: 0.01 g m^{-3}), y c) NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004: establece los criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados (límite permisible: 0.5 g m^{-3}).

Se encontró la referencia que demuestra que en el año 2021 la concentración promedio de plomo soluble a lo largo del río Lerma era de 1.1 g m^{-3} , específicamente a la altura del municipio de San Mateo Atenco el promedio de plomo soluble en el río era de 1.0 g m^{-3} . Ambos valores son mayores que el límite permisible por las normas mexicanas (0.01 g m^{-3} para uso y consumo humano, y 0.4 g m^{-3} para aguas residuales), lo cual, permite afirmar que el río Lerma está altamente contaminado.

Se estimó que actualmente el nivel de concentración de plomo soluble (derivado de flujos subterráneos) en 30 m de la ribera izquierda del río Lerma se encuentra en el rango de concentración permisible establecido por las normas NOM-001-SEMARNAT-2021 y NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. No obstante, la mayor concentración de plomo soluble se presenta al pie del bordo de la margen izquierda, excediendo el límite establecido por la NOM-127-SSA1-2021 (0.01 g m^{-3} para uso y consumo humano), esto representa riesgos para la salud de los habitantes de la zona aledaña al río.

A partir de los análisis realizados, se encontró que el tiempo promedio necesario para que en 10 m de zona de ribera exista una concentración mayor que 0.01 g m^{-3} es de 10 años, y para que la concentración sea mayor que 0.4 g m^{-3} se requiere un tiempo de 30 años. Asimismo, se evaluó que, en el pie del bordo de la margen izquierda (a 11.5 m de profundidad), la concentración de plomo soluble excede 0.01 g m^{-3} en un tiempo de 5 años y en 20 años la concentración es mayor que 0.4 g m^{-3} .

Comentarios concluyentes sobre la sensibilidad de los parámetros en el transporte de solutos:

Se identificó que, en los estratos de suelo con una permeabilidad mayor, el plomo soluble se transporta con mayor facilidad. Lo anterior, genera una mayor concentración de este contaminante en un tiempo menor que cuando se asumen permeabilidades bajas.

Se demostró que en los estratos de suelo con contenido de agua volumétrico mayor y permeabilidades menores, el plomo soluble se mueve con mayor dificultad, lo cual genera que la pluma de contaminación tenga menor extensión a través del tiempo.

Se determinó que, inicialmente, a menor relación de dispersión (α_L/α_T) se tienen concentraciones mayores de contaminante. Conforme pasa el tiempo y la concentración del contaminante tiende a ser estable, se observa un cambio en el comportamiento en el que a menor relación de dispersión se tienen concentraciones de contaminante menores.

Cuando no se considera interacción suelo-contaminante ($Kd=0$) de forma vertical, inicialmente los resultados son 25% mayores que cuando sí se considera tal interacción ($Kd=1$) posteriormente conforme el tiempo transcurre, esta diferencia se reduce a 5%. De manera horizontal, cuando no hay interacción ($Kd=0$), los resultados son 40% mayores que cuando sí se considera tal interacción ($Kd=1$), después, esta diferencia se reduce a 10%. No obstante, cuando la interacción suelo-contaminante se modifica de $Kd=1$ a $Kd=10$, no se observan diferencias significativas.

Cuando se utiliza la misma relación de dispersión, $\alpha_L/\alpha_T=2$, diferenciando que para el caso VI se establece $\alpha_L/\alpha_T=10/5$ para todos los materiales y, para el caso III se asume según el tipo de suelo. Se observan diferencias significativas, siendo mayores los resultados en el caso VI. Lo anterior, ratifica la importancia de definir los valores de dispersión longitudinal y transversal, en los análisis de transporte de solutos.

5.2 Recomendaciones

En este trabajo se estudió el transporte de contaminantes desde la perspectiva de la geotecnia ambiental, evaluando la posible contaminación de las riberas del río Lerma. Con base en lo anterior, se considera importante realizar investigaciones adicionales que tomen en cuenta lo siguiente:

- Análisis que tomen en cuenta tanto el daño ambiental como la afectación en términos de resistencia del suelo, de acuerdo con la cantidad de contaminante presente en el sitio. Por ejemplo, realizar análisis acoplados de flujo de agua, flujo de solutos y estabilidad de talud para evaluar la estabilidad del bordo del río Lerma.
- Para futuros análisis de transporte de solutos, se sugiere priorizar la obtención de los siguientes parámetros: i) coeficiente de permeabilidad, ii) contenido de agua volumétrico y iii) dispersión de cada estrato. Pues en los análisis realizados demostraron mayor sensibilidad al momento de obtener los resultados.
- Estudiar e implementar técnicas de mitigación y remediación con la finalidad de evitar la propagación del contaminante a lo largo de las riberas de ríos con condiciones similares a las del río estudiado en esta tesis. Asimismo, se recomienda dar importancia al conocimiento de los tiempos de propagación de la contaminación, pues puede ser útil para elaborar planes que alerten a los habitantes de la zona sobre los posibles riesgos de contaminación de los cultivos y daños a la salud de los seres vivos.

REFERENCIAS

- Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. (1999). *Resumen de Salud Pública Cadmio*. www.atsdr.cdc.gov/es
- Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. (2020). *Plomo -ToxFAQ*. <https://www.cdc.gov/nceh/lead/faqs/lead-faqs.htm>
- Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. (2022). *ToxFAQs -Mercurio*. <https://www.atsdr.cdc.gov/dontmesswithmercury>
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry. (2007). *ToxFAQs™ sobre el arsénico*.
- Agency for toxic substances and disease registry. (2012). *CROMO (CHROMIUM)*. <http://www.atsdr.cdc.gov/es/>
- Alfaro, M. R., Ugarte, O. M., Lima, L. H. V., Silva, J. R., da Silva, F. B. V., da Silva Lins, S. A., y do Nascimento, C. W. A. (2022). Risk assessment of heavy metals in soils and edible parts of vegetables grown on sites contaminated by an abandoned steel plant in Havana. *Environmental Geochemistry and Health*, 44(1), 43–56. <https://doi.org/10.1007/s10653-021-01092-w>
- Allan-Freeze, R., y Cherry, J. A. (1979). *GROUNDWATER*.
- Armienta, M. A., Beltrán, M., Martínez, S., y Labastida, I. (2020). Heavy metal assimilation in maize (*Zea mays* L.) plants growing near mine tailings. *Environmental Geochemistry and Health*, 42(8). <https://doi.org/10.1007/s10653-019-00424-1>
- Asgari, K., y Cornelis, W. M. (2015). Heavy metal accumulation in soils and grains, and health risks associated with use of treated municipal wastewater in subsurface drip irrigation. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187(7). <https://doi.org/10.1007/s10661-015-4565-8>
- Avila-Pérez, P., Zarazúa, G., Carapia, L., Tejeda, S., Barceló-Quintal, I., y Martínez, T. (2011). Concentration of elements in suspended matter discharges to Lerma River, Mexico. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 287(2), 383–391. <https://doi.org/10.1007/s10967-010-0887-8>
- Avila-Pérez, P., Zarazúa, G., Tejeda, S., Barceló-Quintal, I., Díaz-Delgado, C., y Carreño-León, C. (2007). Evaluation of distribution and bioavailability of Cr, Mn, Fe, Cu, Zn and Pb in the waters of the upper course of the Lerma River. *X-Ray Spectrometry*, 36(5), 361–368. <https://doi.org/10.1002/xrs.984>
- Barceló, D., y Kostianoy, A. G. (2017). The Nile Delta. En A. M. Negm (Ed.), *World Geomorphological Landscapes*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-65661-8_6

- Barceló-Quintal, I. D., Salazar-Peláez, M. L., García-Albortante, J., Domínguez-Mariani, E., López-Chuken, U. J., y Gómez-Salazar, S. (2013a). Evaluation of Water Quality Index in Lerma River Upper Basin. *Journal of Environmental Protection*, 04(07), 98–103. <https://doi.org/10.4236/jep.2013.47a012>
- Barceló-Quintal, I. D., Salazar-Peláez, M. L., García-Albortante, J., Domínguez-Mariani, E., López-Chuken, U. J., y Gómez-Salazar, S. (2013b). Evaluation of Water Quality Index in Lerma River Upper Basin. *Journal of Environmental Protection*, 04(07), 98–103. <https://doi.org/10.4236/jep.2013.47a012>
- Briaud, J.-L. (2023). *Geotechnical Engineering unsaturated and saturated soils: Vol. Second edition*.
- Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (2021). *Ley general del equilibrio ecológico y la protección al ambiente*.
- Castro-González, N. P., Moreno-Rojas, R., Calderón-Sánchez, F., Moreno-Ortega, A., y Tamariz-Flores, J. v. (2017). *Heavy metals in milk from cows fed alfalfa produced in soils irrigated with wastewater in Puebla and Tlaxcala, Mexico*. 15. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v9i3.4358>
- Comisión Nacional del Agua, y Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2018). *Diagnóstico de calidad del agua de la Región Hidrológica Lerma Santiago Pacífico*.
- Custodio, M., Peñaloza, R., Cuadrado, W., Ochoa, S., Álvarez, D., y Chanamé, F. (2021). Data on the detection of essential and toxic metals in soil and corn and barley grains by atomic absorption spectrophotometry and their effect on human health. *Chemical Data Collections*.
- de Oca-Jiménez, R. M., Pérez-Rodríguez, J. E., y Rodríguez-Domínguez, M. C. (2022a). Lead levels in water, soil and grass from Valle de Lerma, State of Mexico municipalities, dedicated to livestock. *Terra Latinoamericana*, 40. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.949>
- de Oca-Jiménez, R. M., Pérez-Rodríguez, J. E., y Rodríguez-Domínguez, M. C. (2022b). Lead levels in water, soil and grass from Valle de Lerma, State of Mexico municipalities, dedicated to livestock. *Terra Latinoamericana*, 40. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.949>
- Escobar, J. (2002). La contaminación de los ríos y sus efectos en las áreas costeras y el mar. *Serie recursos naturales e infraestructura*, 50(1680–9017).
- Esteller, V., y Díaz-Delgado, C. (s/f). *Calidad y contaminación del acuífero profundo del Valle de Toluca, Edo. de México. México*.
- Fetter, C. W., Boving, T. B., y Kremer, D. K. (2018). *Contaminant hydrogeology*.
- Flores-Berrones, R. (2000). *Flujo de agua a través de suelos*. Asociación Mexicana de Hidráulica.

- García-Aragón, J. A., Zarazúa-Ortega, G., Díaz-Palomarez, V., Tejeda-Vega, S., y Ávila-Pérez, P. (2012). *Modelo de transporte y disposición de Fe y Mn en el Río LERMA*.
- García-Rocha, G., Rodríguez-González, R., García-Cruz, F., Martínez-Govea, M., y Silva-Zárate, B. (2010). Actualización de la zonificación geotécnica del Valle de Toluca, en el Estado de México. *XXV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, 1*, 387–397.
- Gaxiola-Gómez, S. A., Hernández-Mendoza, C. E., Rojas-González, E., Chávez-Alegría, O., y Pérez-Rea, Ma. de la L. (2019). *Modificación de las propiedades geotécnicas de un suelo fino debido a su contaminación con dos aguas residuales*. 4. <https://doi.org/10.3233/STAL190313>
- GEOSLOPE International. (2021). *Heat and Mass Transfer Modeling with GeoStudio*.
- Gobierno del Estado de México. (2022). *Atlas de riesgos San Mateo Atenco*.
- Gobierno del Estado de México, y Protección Civil. (2018). *Atlas de riesgos San Mateo Atenco*.
- Greenpeace. (2013). *Ríos tóxicos: Lerma y Atoyac la historia de negligencia continúa*. <http://www.greenpeace.to/publications/euincin.pdf>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2010). *Compendio de información geográfica municipal 2010 San Mateo Atenco México*. <http://mapserver.inegi.org.mx/mgn>
- Isaza-Guzmán, G. (2013). Efecto del plomo sobre la imbibición, germinación y crecimiento de *Phaseolus vulgaris* L. y *Zea Mays* L. *Biotecnología Vegetal*.
- Islam, M., Ahmed, W., Rabin, M., Razzaque, A., Hasan, M., Siddika, M., y Zamil, S. (2022). Status and health risk assessment of heavy metals in vegetables grown in industrial areas of Bangladesh. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*. <https://doi.org/10.1080/03067319.2022.2118590>
- Iturbe-Arguelles, R. (2014). *Suelos y acuíferos contaminados evaluación y limpieza*.
- Kabata-Pendias, A., y Mukherjee, A. B. (2007). *Trace elements from soil to human*.
- Lara-Romero, L., Chávez-Aliaga, Z., y Castañeda-Vergara, J. (2019). *El método de diferencias finitas teoría y práctica*.
- Lenntech. (s/f). *Hierro (Fe) Propiedades químicas y efectos sobre la salud y el medio ambiente*. Recuperado el 5 de julio de 2023, de <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/fe.htm#Efectos%20del%20Hierro%20sobre%20la%20salud>
- Londoño Franco, L. F., Londoño Muñoz, P. T., y Muñoz Garcia, F. G. (2016). Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial, 14*(2), 145. [https://doi.org/10.18684/bsaa\(14\)145-153](https://doi.org/10.18684/bsaa(14)145-153)

- López Acosta, N. P. (2017). *Manual de Diseño de Obras Civiles: Capítulo B.2.9 Flujo de agua en suelos*.
- López, R., Hallat, J., Castro, A., Miras, A., y Burgos, P. (2019). Heavy metal pollution in soils and urban-grown organic vegetables in the province of Sevilla, Spain. *Biological Agriculture and Horticulture*, 35(4), 219–237. <https://doi.org/10.1080/01448765.2019.1590234>
- Martínez, E. (1976). 20. Toluca, Edo. de México. *Ingeniería Experimental*.
- Martínez, Y., y Rivero, C. (2005). *Evaluación de diferentes métodos para determinar las fracciones de metales pesados presentes en el suelo*. <http://redalyc.uaemex.mx>
- Méndez-Sánchez, E., Auvinet, G., y García, J. A. (2012). Contribución a la zonificación geotécnica del valle de Toluca. *XXVI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica*.
- Ormazahal, F. J., y Larrañaga, E. (1998). *Investigación de la contaminación del suelo. Análisis de riesgos: Migración y seguimiento de contaminantes en el suelo y en las aguas subterráneas*.
- Orozco-Barrenetxea, C., Pérez-Serrano, A., González-Delgado, M. N., Rodríguez-Vidal, F. J., y Alfayate-Blanco, J. M. (2011). *CONTAMINACION AMBIENTAL Una visión desde la química*.
- Pedraza-Chávez, J. M. (2011). *Detección de metales pesados en agua*. Instituto Nacional de Astrofísica y Óptica y Electrónica.
- Pérez-Díaz, J. P., Ortega-Escobar, H. M., Ramírez-Ayala, C., Flores-Magdaleno, H., Sánchez-Bernal, E. I., Can-Chulim, Á., y Mancilla-Villa, O. R. (2019). Concentración de nitrato, fosfato, boro y cloruro en el agua del río Lerma. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 6(16), 175–182. <https://doi.org/10.19136/era.a6n16.1829>
- Rehman, Z., Junaid, M., Ijaz, N., Khalid, U., y Ijaz, Z. (2023, abril 1). Remediation methods of heavy metal contaminated soils from environmental and geotechnical standpoints. *Science of the Total Environment*, 867. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161468>
- Roque-Martínez, J. (2015). *Estudio comparativo de la electrodeposición de Pb(II) sobre carbón vítreo y acero inoxidable como propuesta para el tratamiento de soluciones complejantes de acetato*.
- Secretaría de Economía. (2016). *NMX-AA-132-SCFI-2016, Muestreo de suelos para la identificación de metales y metaloides, y manejo de la muestra (cancela a la NMX-AA-132-SCFI-2006)*.
- Secretaría de Economía. (2021). *NMX-AA-051-SCFI-2001, Análisis de agua -Determinación de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales tratadas -Método de prueba (cancela a la NMX-AA-051-1981)*.

- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2007). *NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio.*
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2022). *NOM-001-SEMARNAT-2021, que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedades de la nación.*
- Secretaría de Salud. (2021). *NOM-127-SSAI-2021, agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad del agua.*
- Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos. (1991). *Geotecnia y Medio Ambiente.* <https://smig.org.mx/tienda/producto/geotecnica-y-medio-ambiente/>
- Solís-Mendoza, F., Sahagún-Castellanos, J., Villanueva-Verduzco, C., Colinas-León, M. T., y García-Mateos, M. (2012). Distribución de biomasa y acumulación de plomo en calabacita (*Cucurbita pepo* L.) cultivada en suelo contaminado. *Revista Chapingo, Serie Horticultura*, 18(2), 197–205. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2009.12.102>
- Strack, O. D. L. (2017). Analytical Groundwater Mechanics. En *Analytical Groundwater Mechanics*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781316563144>
- Toscana-Aparicio, A., Campos-Vargas, M. M., y Monroy-Gaytán, J. F. (2009). *Inundaciones, protección civil y habitantes de San Mateo Atenco, Estado de México.*
- VADA Ingeniería S.A. de C.V. (2018a). *Estudios y proyectos ejecutivos para las obras de reconstrucción de bordos de protección en tramos dispersos en aproximadamente 1,998 metros de margen izquierda y 1,990 metros de margen derecha del río Lerma, localidades de San Pedro, San Nicolás, San Jua.*
- VADA Ingeniería S.A. de C.V. (2018b). *Estudios y proyectos ejecutivos para las obras de reconstrucción de bordos de protección en tramos dispersos en aproximadamente 1,998 metros de margen izquierda y 1,990 metros de margen derecha del río Lerma, localidades de San Pedro, San Nicolás, San Juan Santiago, San Lucas y Guadalupe, municipio de San Mateo Atenco, Estado de México.*
- Vázquez, J., Sangurima, C., y Alvarez-Vera, M. (2019). Lead (Pb) concentrations in lettuce crops (*Lactuca sativa*) in Azuay, Ecuador. *Scientia Agropecuaria*, 10(3), 423–427. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2019.03.13>
- Xu, X., Luo, P., Li, S., Zhang, Q., y Sun, D. (2022). Distributions of Heavy Metals in Rice and Corn and Their Health Risk Assessment in Guizhou Province. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 108(5), 926–935. <https://doi.org/10.1007/s00128-021-03407-0>

- Yong, R. N. (2000). *Geoenvironmental engineering: contaminated soils, pollutant fate and mitigation*. CRC Press.
- Zahermand, S., Vafaeian, M., y Bazyar, M. H. (2020). Analysis of the physical and chemical properties of soil contaminated with oil (Petroleum) hydrocarbons. *Earth Sciences Research Journal*, 24(2), 164. <https://doi.org/10.15446/esrj.v24n2.76217>
- Zarazúa, G., Ávila-Pérez, P., Tejeda, S., Valdivia-Barrientos, M., Zepeda-Gómez, C., y Macedo-Miranda, G. (2013). *Evaluación de los metales pesados Cr, Mn, Fe, Cu, Zn y Pb en Sombrerillo de Agua (Hydrocotyle ranunculoides) del Curso Alto del Río Lerma, México*.
- Zarazúa, G., Tejeda, S., Ávila-Pérez, P., Carapia, L., Carreño, C., y Balcázar, M. (2011). Metal content and elemental composition of particles in cohesive sediments of the Lerma river, México. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 27(3), 181–190.

ANEXO I. PERFILES ESTRATIGRÁFICOS

En este anexo se presentan los perfiles estratigráficos de la exploración geotécnica del sitio en estudio (VADA Ingeniería S.A. de C.V., 2018a).

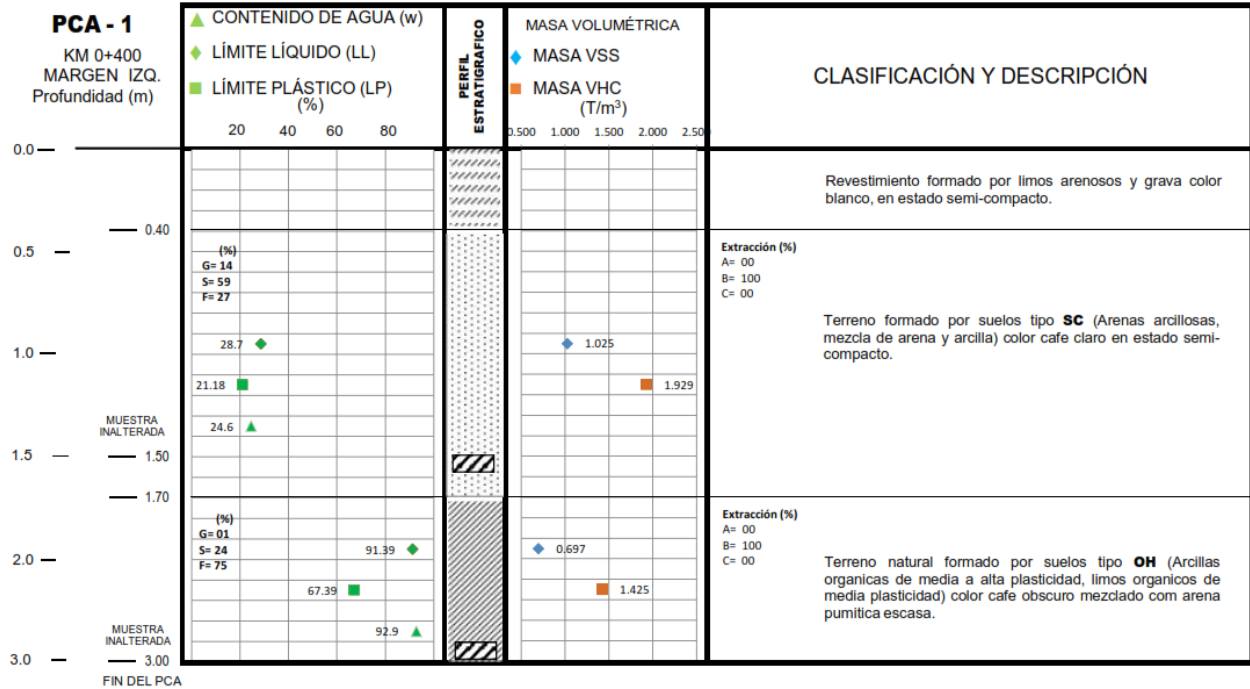


Figura I. 1 Perfil estratigráfico del pozo a cielo abierto PCA-1

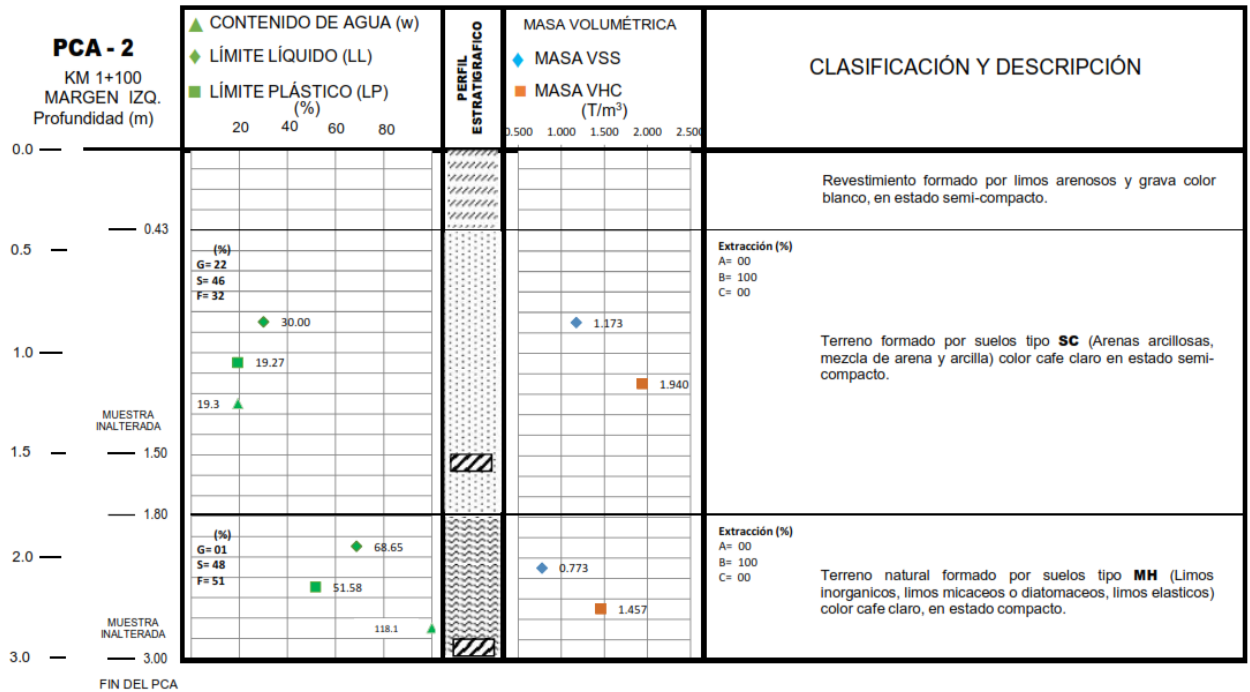


Figura I. 2 Perfil estratigráfico del pozo a cielo abierto PCA-2

0 ANEXO I. PERFILES ESTRATIGRÁFICOS

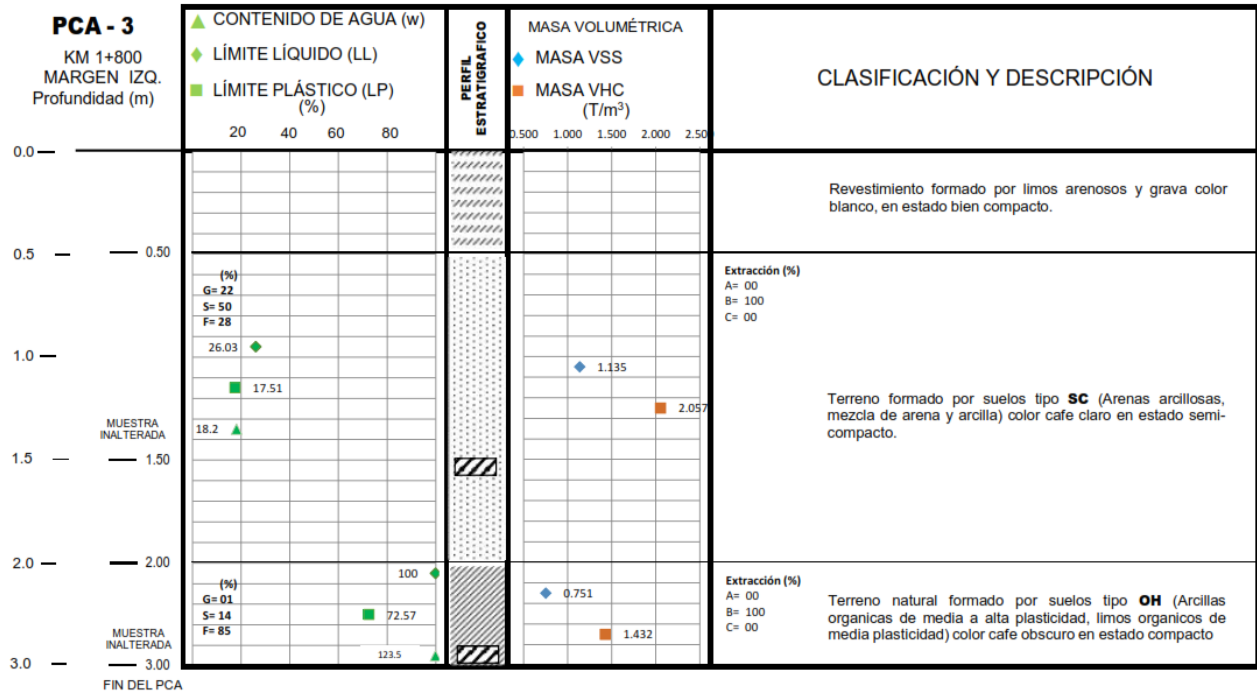


Figura I. 3 Perfil estratigráfico del pozo a cielo abierto PCA-3

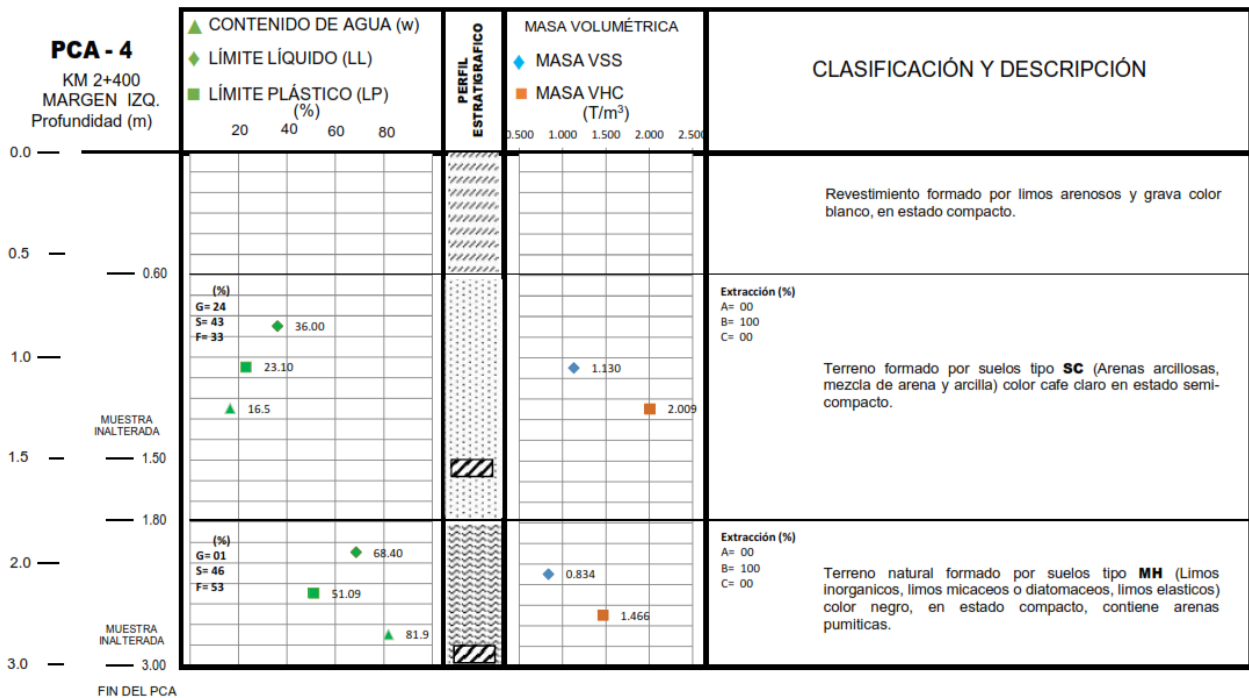


Figura I. 4 Perfil estratigráfico del pozo a cielo abierto PCA-4

EVALUACIÓN DEL TRANSPORTE DE CONTAMINANTES
DESDE EL CAUCE A LAS RIBERAS DEL RÍO LERMA

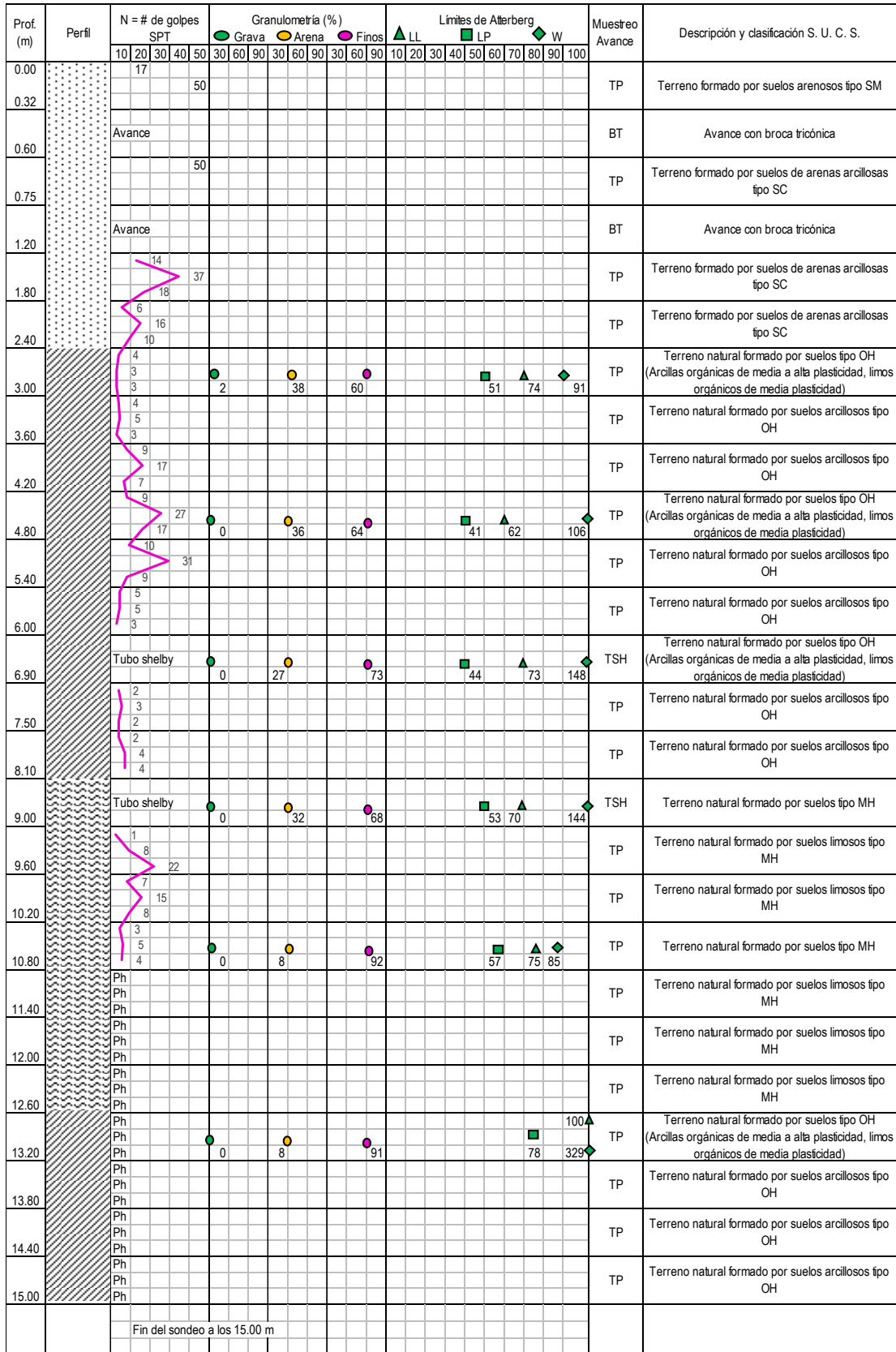


Figura I. 5 Perfil estratigráfico del sondeo SM-1

0 ANEXO I. PERFILES ESTRATIGRÁFICOS

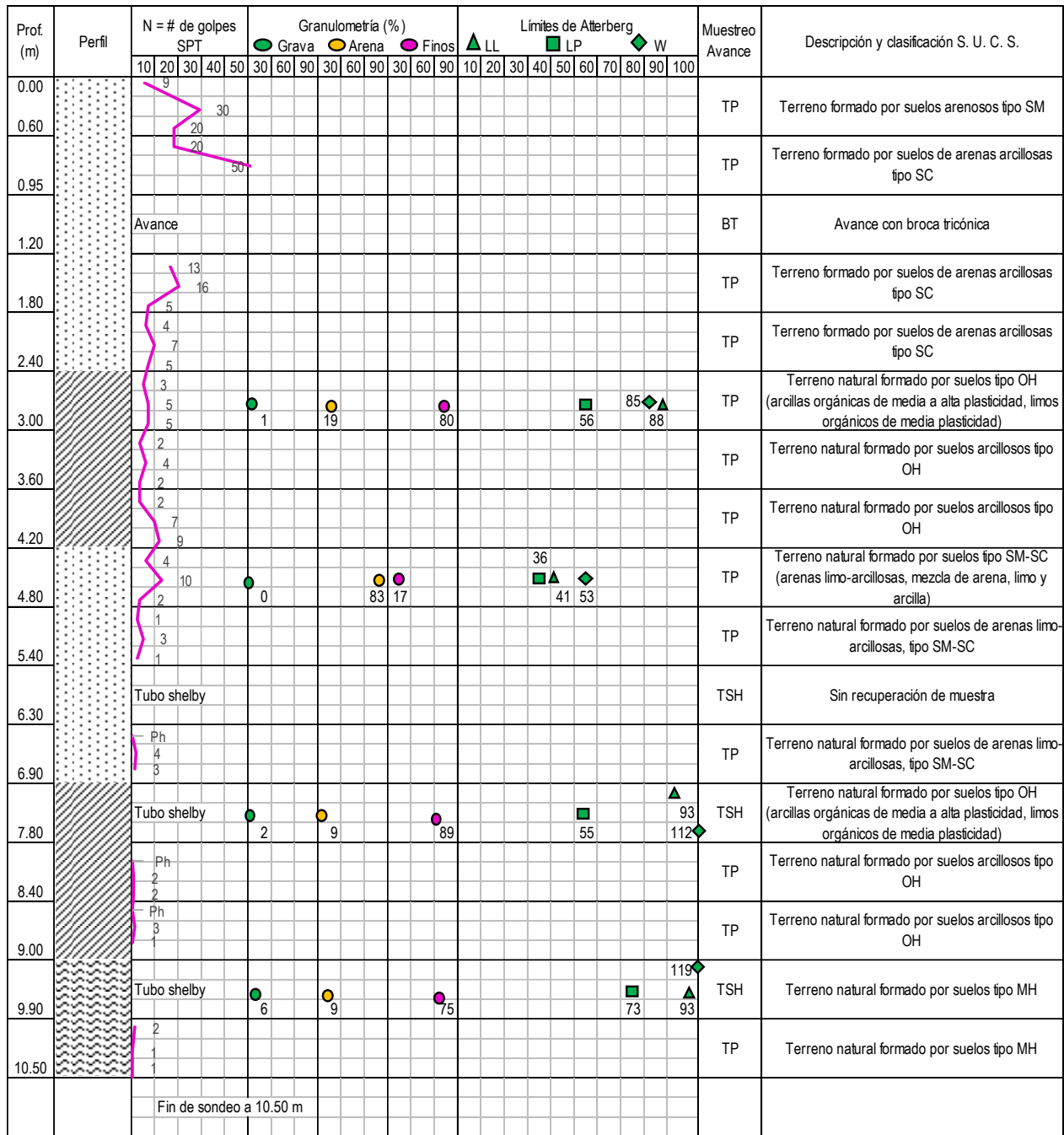


Figura I. 6 Perfil estratigráfico del sondeo SM-2

EVALUACIÓN DEL TRANSPORTE DE CONTAMINANTES
DESDE EL CAUCE A LAS RIBERAS DEL RÍO LERMA

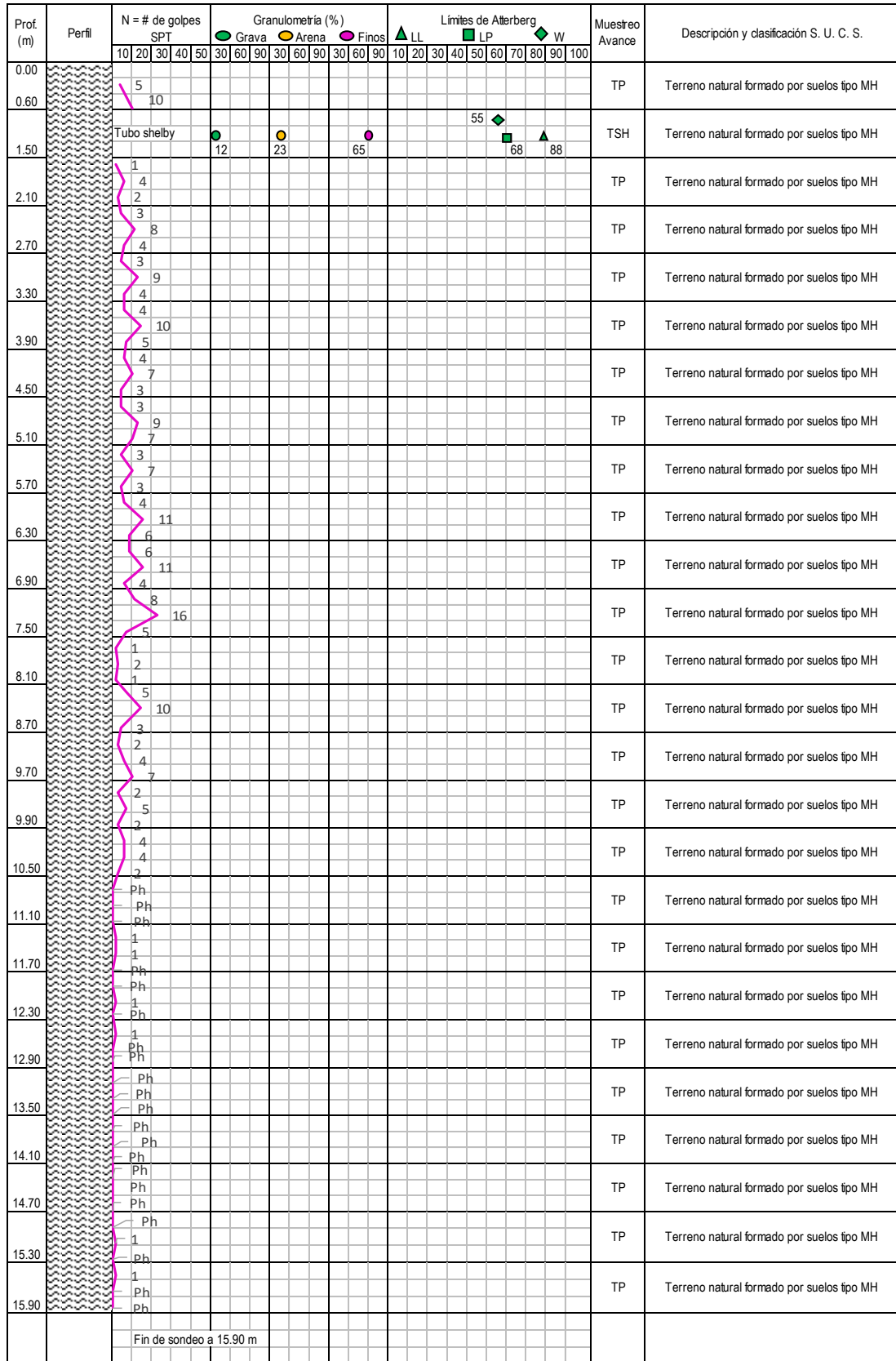


Figura I. 7 Perfil estratigráfico del sondeo SM-3

0 ANEXO I. PERFILES ESTRATIGRÁFICOS

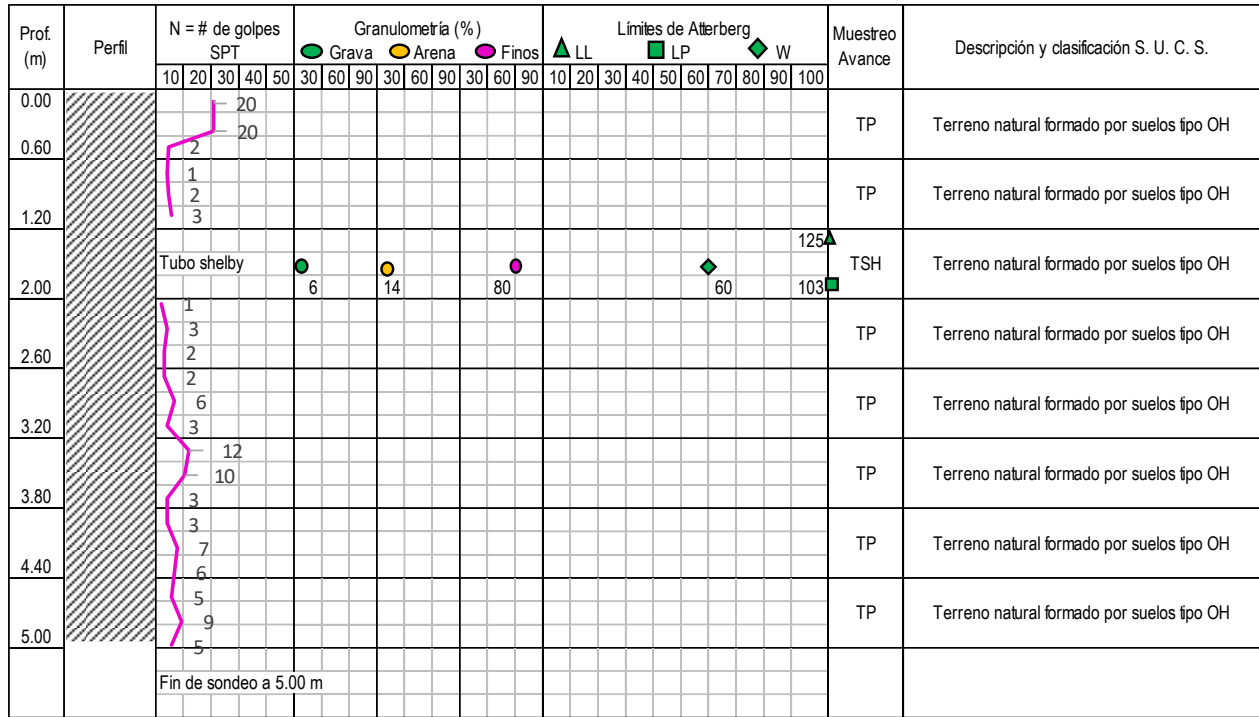


Figura I. 8 Perfil estratigráfico del sondeo SM-4

ANEXO II. DETALLE DE LOS RESULTADOS

En este anexo se presentan las figuras obtenidas con el programa GEOSTUDIO, las cuales representan las plumas o manchas contaminantes del plomo soluble en el subsuelo para periodos de 5 y 50 años. Asimismo, se incluyen tablas donde se indican las concentraciones de plomo soluble en los diferentes nodos y cortes de la región de análisis. Dichos valores están relacionados con el tiempo, desde 1 año hasta 150 años. Los valores subrayados en las tablas indican que se exceden los límites establecidos por la normativa mexicana relacionada con la contaminación de suelo y agua por plomo soluble.

Caso I. Contenido de agua gravimétrico mínimo

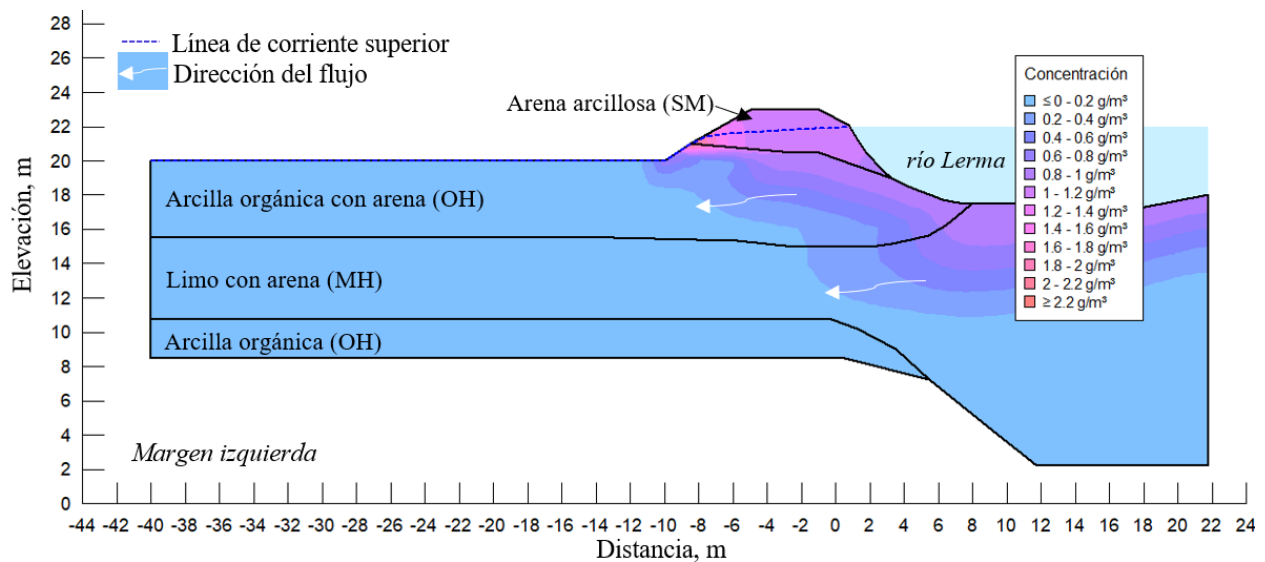


Figura II. 1 Pluma contaminante para un tiempo de 5 años, caso I

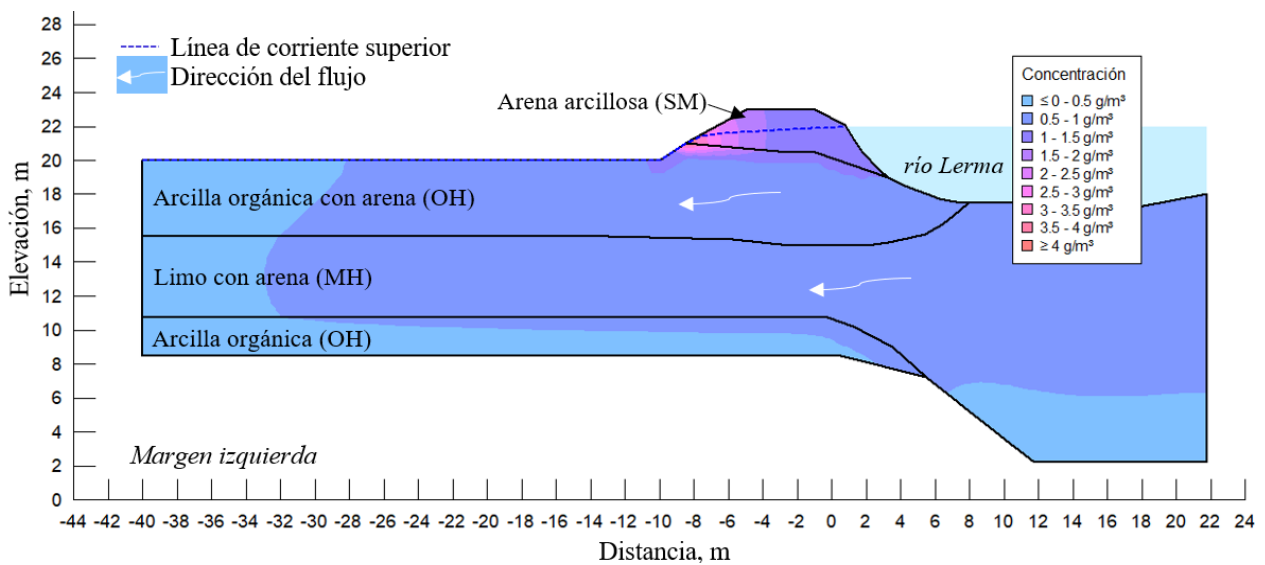


Figura II. 2 Pluma contaminante para un tiempo de 50 años, caso I

Tabla II. 1 Concentración de $Pb_{soluble}$ (en $g\ m^{-3}$) respecto al tiempo, de forma vertical, caso I

Tiempo		Nodos		Distancia vertical (coordenada en "y"), en m						
Años	Días	Intermedio	Ribera	y = 20	y = 18	y = 16	y = 14	y = 12	y = 10	y = 8.5
1	365	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000	0.005	0.000	0.000	0.001
1.4	517	<u>0.023</u>	0.000	0.000	0.000	0.000	<u>0.011</u>	0.000	0.000	0.004
2	722	<u>0.053</u>	0.000	0.001	0.000	0.001	<u>0.021</u>	0.001	0.000	0.008
3	1008	<u>0.107</u>	0.000	0.003	0.002	0.004	<u>0.039</u>	0.004	0.003	<u>0.016</u>
5	1825	<u>0.281</u>	0.002	<u>0.044</u>	<u>0.039</u>	<u>0.048</u>	<u>0.106</u>	<u>0.047</u>	<u>0.044</u>	<u>0.061</u>
10	3650	<u>0.552</u>	<u>0.052</u>	<u>0.225</u>	<u>0.211</u>	<u>0.234</u>	<u>0.276</u>	<u>0.232</u>	<u>0.225</u>	<u>0.220</u>
15	5475	<u>0.717</u>	<u>0.149</u>	<u>0.408</u>	<u>0.389</u>	<u>0.416</u>	<u>0.450</u>	<u>0.415</u>	<u>0.405</u>	<u>0.393</u>
16	5840	<u>0.745</u>	<u>0.170</u>	<u>0.444</u>	<u>0.424</u>	<u>0.452</u>	<u>0.478</u>	<u>0.451</u>	<u>0.441</u>	<u>0.426</u>
17	6205	<u>0.771</u>	<u>0.194</u>	<u>0.479</u>	<u>0.458</u>	<u>0.486</u>	<u>0.503</u>	<u>0.485</u>	<u>0.475</u>	<u>0.457</u>
20	7300	<u>0.824</u>	<u>0.273</u>	<u>0.566</u>	<u>0.544</u>	<u>0.571</u>	<u>0.570</u>	<u>0.571</u>	<u>0.561</u>	<u>0.538</u>
30	10950	<u>0.895</u>	<u>0.503</u>	<u>0.722</u>	<u>0.699</u>	<u>0.721</u>	<u>0.723</u>	<u>0.723</u>	<u>0.713</u>	<u>0.703</u>
40	14600	<u>0.928</u>	<u>0.662</u>	<u>0.805</u>	<u>0.784</u>	<u>0.802</u>	<u>0.821</u>	<u>0.804</u>	<u>0.796</u>	<u>0.801</u>
50	18250	<u>0.944</u>	<u>0.761</u>	<u>0.854</u>	<u>0.835</u>	<u>0.850</u>	<u>0.886</u>	<u>0.852</u>	<u>0.845</u>	<u>0.860</u>
75	27375	<u>0.969</u>	<u>0.866</u>	<u>0.911</u>	<u>0.896</u>	<u>0.907</u>	<u>0.944</u>	<u>0.909</u>	<u>0.903</u>	<u>0.923</u>
100	36500	<u>0.990</u>	<u>0.917</u>	<u>0.943</u>	<u>0.932</u>	<u>0.940</u>	<u>0.973</u>	<u>0.942</u>	<u>0.937</u>	<u>0.955</u>
150	54750	<u>0.997</u>	<u>0.960</u>	<u>0.972</u>	<u>0.965</u>	<u>0.970</u>	<u>1.007</u>	<u>0.971</u>	<u>0.969</u>	<u>0.986</u>

Tabla II. 2 Concentración de $Pb_{soluble}$ (en $g\ m^{-3}$) respecto al tiempo, de forma horizontal, caso I

Tiempo		Pie del bordo	Distancia horizontal (coordenada en "x"), en m					
Años	Días	x = -10 m	x = -15	x = -20	x = -25	x = -30	x = -35	x = -40
1	365	<u>0.165</u>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1.4	517	<u>0.233</u>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	722	<u>0.322</u>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3	1008	<u>0.440</u>	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5	1825	<u>0.738</u>	0.009	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
10	3650	<u>1.011</u>	<u>0.093</u>	<u>0.035</u>	<u>0.012</u>	0.003	0.000	0.000
15	5475	<u>1.227</u>	<u>0.225</u>	<u>0.110</u>	<u>0.046</u>	<u>0.014</u>	0.003	0.000
16	5840	<u>1.227</u>	<u>0.253</u>	<u>0.127</u>	<u>0.054</u>	<u>0.017</u>	0.003	0.000
17	6205	<u>1.227</u>	<u>0.282</u>	<u>0.146</u>	<u>0.063</u>	<u>0.020</u>	0.004	0.001
20	7300	<u>1.228</u>	<u>0.374</u>	<u>0.214</u>	<u>0.101</u>	<u>0.034</u>	0.007	0.001
30	10950	<u>1.239</u>	<u>0.593</u>	<u>0.442</u>	<u>0.285</u>	<u>0.145</u>	<u>0.051</u>	<u>0.015</u>
40	14600	<u>1.255</u>	<u>0.729</u>	<u>0.614</u>	<u>0.464</u>	<u>0.288</u>	<u>0.129</u>	<u>0.049</u>
50	18250	<u>1.276</u>	<u>0.810</u>	<u>0.728</u>	<u>0.606</u>	<u>0.432</u>	<u>0.230</u>	<u>0.104</u>
75	27375	<u>1.340</u>	<u>0.894</u>	<u>0.850</u>	<u>0.784</u>	<u>0.664</u>	<u>0.469</u>	<u>0.302</u>
100	36500	<u>1.405</u>	<u>0.936</u>	<u>0.909</u>	<u>0.871</u>	<u>0.796</u>	<u>0.644</u>	<u>0.488</u>
150	54750	<u>1.561</u>	<u>0.972</u>	<u>0.956</u>	<u>0.938</u>	<u>0.901</u>	<u>0.815</u>	<u>0.713</u>

Caso II. Contenido de agua gravimétrico máximo

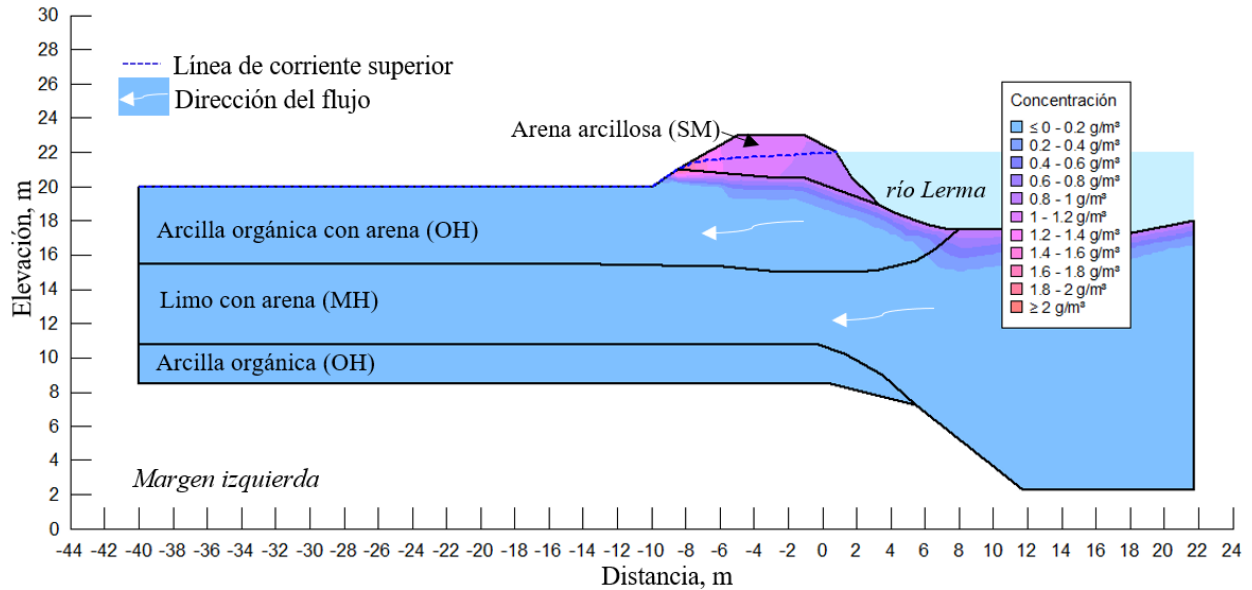


Figura II. 3 Pluma contaminante para un tiempo de 5 años, caso II

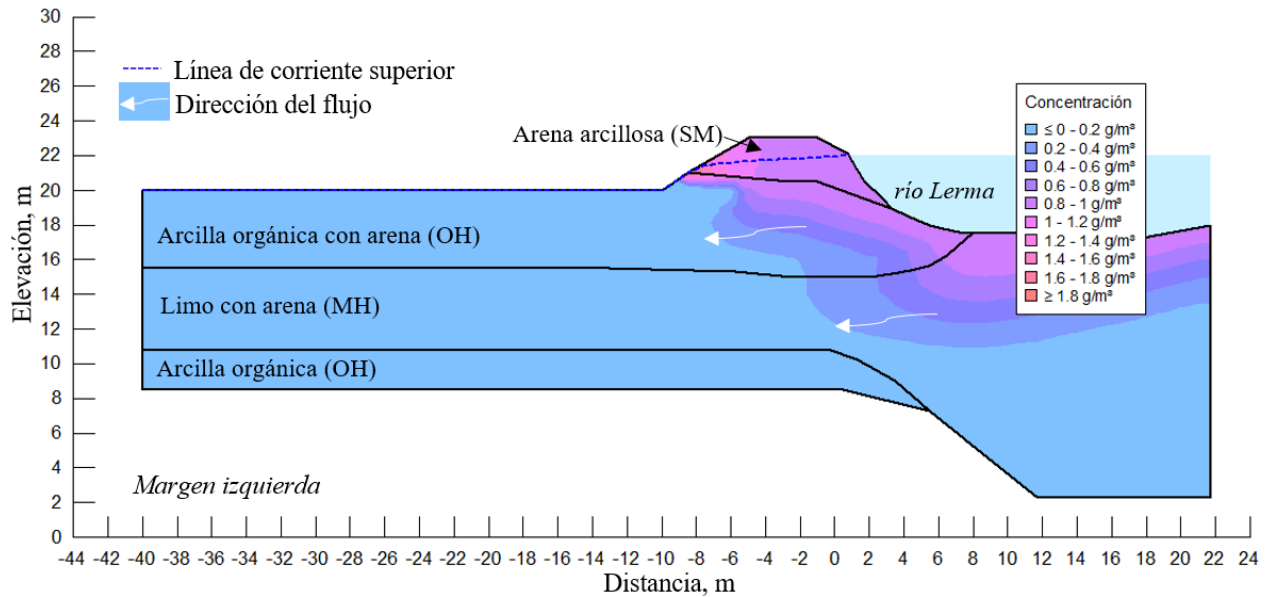


Figura II. 4 Pluma contaminante para un tiempo de 50 años, caso II

Tabla II. 3 Concentración de $Pb_{soluble}$ (en $g\ m^{-3}$) respecto al tiempo, de forma vertical, caso II

Tiempo		Nodos		Distancia vertical (coordenada en "y"), en m						
Años	Días	Intermedio	Ribera	y = 20	y = 18	y = 16	y = 14	y = 12	y = 10	y = 8.5
1	365	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1.4	517	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	722	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3	1008	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5	1825	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000
10	3650	<u>0.018</u>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.009	0.000	0.000	0.003
15	5475	<u>0.042</u>	0.000	0.000	0.000	0.000	<u>0.021</u>	0.000	0.000	0.008
16	5840	<u>0.048</u>	0.000	0.000	0.000	0.000	<u>0.023</u>	0.000	0.000	0.009
17	6205	<u>0.053</u>	0.000	0.001	0.000	0.000	<u>0.026</u>	0.000	0.000	0.010
20	7300	<u>0.073</u>	0.000	0.001	0.000	0.001	<u>0.035</u>	0.001	0.000	<u>0.014</u>
30	10950	<u>0.150</u>	0.000	0.006	0.003	0.005	<u>0.070</u>	0.005	0.004	<u>0.032</u>
40	14600	<u>0.229</u>	0.000	<u>0.016</u>	0.009	<u>0.015</u>	<u>0.104</u>	<u>0.015</u>	<u>0.013</u>	<u>0.053</u>
50	18250	<u>0.304</u>	0.001	<u>0.032</u>	<u>0.021</u>	<u>0.031</u>	<u>0.136</u>	<u>0.032</u>	<u>0.027</u>	<u>0.076</u>
75	27375	<u>0.454</u>	0.008	<u>0.105</u>	<u>0.080</u>	<u>0.105</u>	<u>0.216</u>	<u>0.106</u>	<u>0.096</u>	<u>0.146</u>
100	36500	<u>0.570</u>	<u>0.027</u>	<u>0.195</u>	<u>0.158</u>	<u>0.196</u>	<u>0.301</u>	<u>0.197</u>	<u>0.182</u>	<u>0.227</u>
150	54750	<u>0.716</u>	<u>0.108</u>	<u>0.369</u>	<u>0.318</u>	<u>0.366</u>	<u>0.449</u>	<u>0.369</u>	<u>0.349</u>	<u>0.385</u>

Tabla II. 4 Concentración de $Pb_{soluble}$ (en $g\ m^{-3}$) respecto al tiempo, de forma horizontal, caso II

Tiempo		Pie del bordo	Distancia horizontal (coordenada en "x"), en m					
Años	Días	$x = -10\ m$	$x = -15$	$x = -20$	$x = -25$	$x = -30$	$x = -35$	$x = -40$
1	365	<u>0.015</u>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1.4	517	<u>0.024</u>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	722	<u>0.036</u>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3	1008	<u>0.053</u>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5	1825	<u>0.106</u>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10	3650	<u>0.223</u>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
15	5475	<u>0.335</u>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
16	5840	<u>0.357</u>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
17	6205	<u>0.379</u>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
20	7300	<u>0.443</u>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
30	10950	<u>0.635</u>	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
40	14600	<u>0.734</u>	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
50	18250	<u>0.805</u>	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
75	27375	<u>0.957</u>	<u>0.034</u>	0.004	0.001	0.000	0.000	0.000
100	36500	<u>1.088</u>	<u>0.074</u>	<u>0.015</u>	0.003	0.000	0.000	0.000
150	54750	<u>1.121</u>	<u>0.197</u>	<u>0.076</u>	<u>0.026</u>	0.007	0.001	0.000

Caso III. Contenido de agua gravimétrico mínimo y coeficiente de distribución $K_d=1$

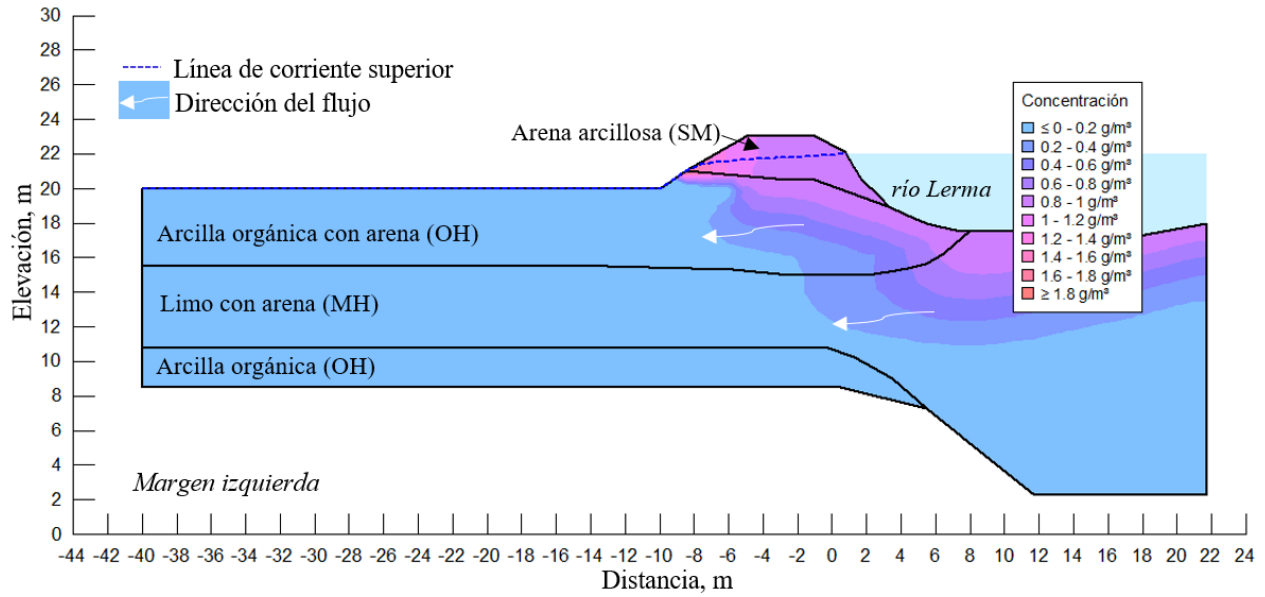


Figura II. 5 Pluma contaminante para un tiempo de 5 años, caso III

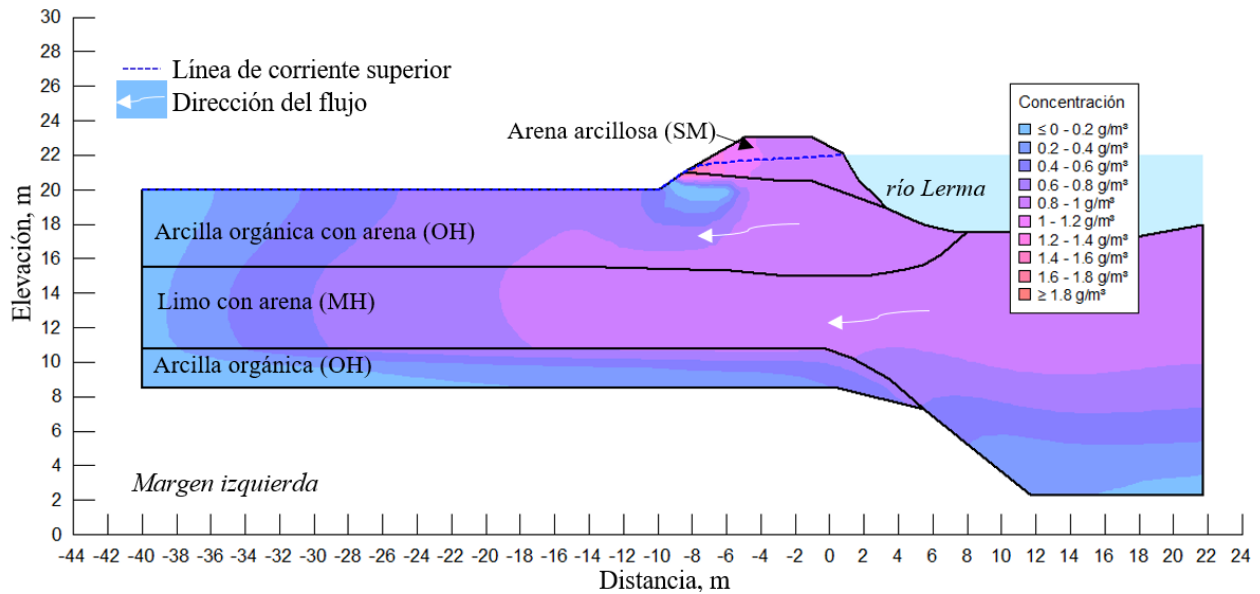


Figura II. 6 Pluma contaminante para un tiempo de 50 años, caso III

Tabla II. 5 Concentración de $Pb_{soluble}$ (en $g\ m^{-3}$) respecto al tiempo, de forma vertical, caso III

Tiempo		Nodos		Distancia vertical (coordenada en "y"), en m						
Años	Días	Intermedio	Ribera	y = 20	y = 18	y = 16	y = 14	y = 12	y = 10	y = 8.5
1	365	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.001
1.4	517	<u>0.023</u>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004	0.000	0.000	0.001
2	722	<u>0.052</u>	0.000	0.001	0.000	0.001	0.006	0.001	0.000	0.002
3	1008	<u>0.106</u>	0.000	0.003	0.002	0.004	0.009	0.003	0.003	0.004
5	1825	<u>0.278</u>	0.002	<u>0.043</u>	<u>0.039</u>	<u>0.048</u>	<u>0.028</u>	<u>0.046</u>	<u>0.044</u>	<u>0.025</u>
10	3650	<u>0.549</u>	<u>0.051</u>	<u>0.221</u>	<u>0.210</u>	<u>0.233</u>	<u>0.135</u>	<u>0.230</u>	<u>0.224</u>	<u>0.145</u>
15	5475	<u>0.713</u>	<u>0.147</u>	<u>0.402</u>	<u>0.387</u>	<u>0.414</u>	<u>0.268</u>	<u>0.412</u>	<u>0.404</u>	<u>0.293</u>
16	5840	<u>0.742</u>	<u>0.168</u>	<u>0.437</u>	<u>0.422</u>	<u>0.449</u>	<u>0.295</u>	<u>0.447</u>	<u>0.439</u>	<u>0.323</u>
17	6205	<u>0.767</u>	<u>0.191</u>	<u>0.472</u>	<u>0.456</u>	<u>0.483</u>	<u>0.323</u>	<u>0.482</u>	<u>0.473</u>	<u>0.353</u>
20	7300	<u>0.818</u>	<u>0.270</u>	<u>0.558</u>	<u>0.542</u>	<u>0.568</u>	<u>0.402</u>	<u>0.567</u>	<u>0.559</u>	<u>0.436</u>
30	10950	<u>0.884</u>	<u>0.498</u>	<u>0.712</u>	<u>0.697</u>	<u>0.718</u>	<u>0.561</u>	<u>0.718</u>	<u>0.710</u>	<u>0.601</u>
40	14600	<u>0.911</u>	<u>0.655</u>	<u>0.794</u>	<u>0.781</u>	<u>0.798</u>	<u>0.650</u>	<u>0.798</u>	<u>0.793</u>	<u>0.691</u>
50	18250	<u>0.923</u>	<u>0.754</u>	<u>0.841</u>	<u>0.832</u>	<u>0.845</u>	<u>0.700</u>	<u>0.846</u>	<u>0.841</u>	<u>0.741</u>
75	27375	<u>0.934</u>	<u>0.856</u>	<u>0.896</u>	<u>0.891</u>	<u>0.901</u>	<u>0.751</u>	<u>0.900</u>	<u>0.898</u>	<u>0.794</u>
100	36500	<u>0.939</u>	<u>0.906</u>	<u>0.926</u>	<u>0.926</u>	<u>0.932</u>	<u>0.778</u>	<u>0.931</u>	<u>0.931</u>	<u>0.822</u>
150	54750	<u>0.943</u>	<u>0.947</u>	<u>0.954</u>	<u>0.959</u>	<u>0.962</u>	<u>0.803</u>	<u>0.960</u>	<u>0.961</u>	<u>0.848</u>

Tabla II. 6 Concentración de $Pb_{soluble}$ (en $g\ m^{-3}$) respecto al tiempo, de forma horizontal, caso III

Tiempo		Pie del bordo	Distancia horizontal (coordenada en "x"), en m					
Años	Días	x = -10 m	x = -15	x = -20	x = -25	x = -30	x = -35	x = -40
1	365	<u>0.047</u>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1.4	517	<u>0.053</u>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	722	<u>0.060</u>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3	1008	<u>0.069</u>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5	1825	<u>0.104</u>	0.006	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
10	3650	<u>0.200</u>	<u>0.081</u>	<u>0.034</u>	<u>0.011</u>	0.003	0.000	0.000
15	5475	<u>0.292</u>	<u>0.206</u>	<u>0.109</u>	<u>0.045</u>	<u>0.014</u>	0.003	0.000
16	5840	<u>0.311</u>	<u>0.233</u>	<u>0.126</u>	<u>0.053</u>	<u>0.016</u>	0.003	0.000
17	6205	<u>0.328</u>	<u>0.261</u>	<u>0.144</u>	<u>0.062</u>	<u>0.019</u>	0.004	0.001
20	7300	<u>0.373</u>	<u>0.350</u>	<u>0.212</u>	<u>0.100</u>	<u>0.034</u>	0.007	0.001
30	10950	<u>0.456</u>	<u>0.567</u>	<u>0.438</u>	<u>0.283</u>	<u>0.144</u>	<u>0.051</u>	<u>0.015</u>
40	14600	<u>0.500</u>	<u>0.701</u>	<u>0.608</u>	<u>0.460</u>	<u>0.286</u>	<u>0.128</u>	<u>0.048</u>
50	18250	<u>0.525</u>	<u>0.779</u>	<u>0.721</u>	<u>0.602</u>	<u>0.429</u>	<u>0.228</u>	<u>0.104</u>
75	27375	<u>0.554</u>	<u>0.859</u>	<u>0.842</u>	<u>0.777</u>	<u>0.659</u>	<u>0.465</u>	<u>0.300</u>
100	36500	<u>0.572</u>	<u>0.899</u>	<u>0.898</u>	<u>0.863</u>	<u>0.789</u>	<u>0.638</u>	<u>0.484</u>
150	54750	<u>0.596</u>	<u>0.933</u>	<u>0.944</u>	<u>0.928</u>	<u>0.892</u>	<u>0.806</u>	<u>0.706</u>

Caso IV. Contenido de agua gravimétrico mínimo y coeficiente de distribución $K_d=10$

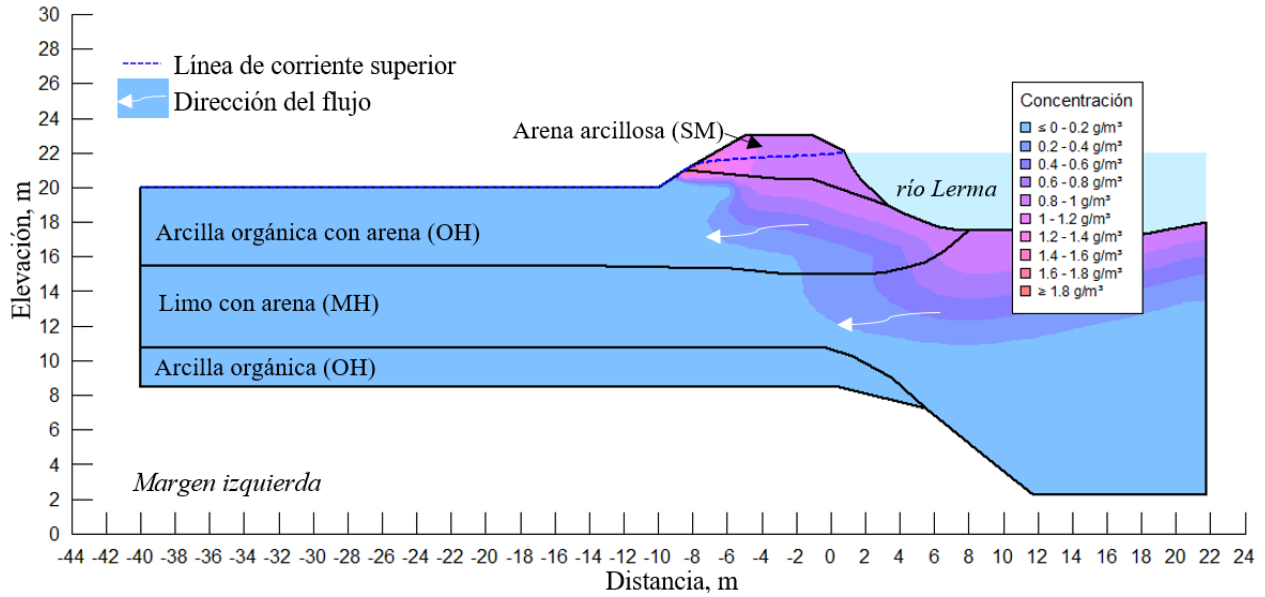


Figura II. 7 Pluma contaminante para un tiempo de 5 años, caso IV

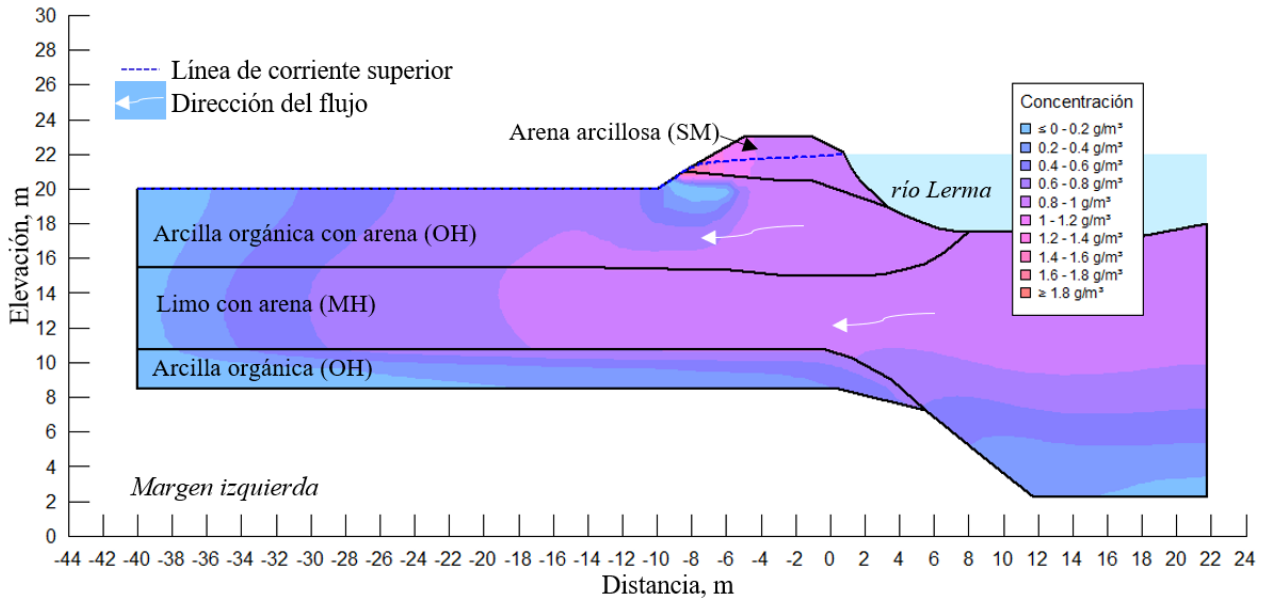


Figura II. 8 Pluma contaminante para un tiempo de 50 años, caso IV

Tabla II. 7 Concentración de $Pb_{soluble}$ (en $g\ m^{-3}$) respecto al tiempo, de forma vertical, caso IV

Tiempo		Nodos		Distancia vertical (coordenada en "y"), en m						
Años	Días	Intermedio	Ribera	y = 20	y = 18	y = 16	y = 14	y = 12	y = 10	y = 8.5
1	365	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.001
1.4	517	<u>0.023</u>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004	0.000	0.000	0.001
2	722	<u>0.052</u>	0.000	0.001	0.000	0.001	0.006	0.001	0.000	0.002
3	1008	<u>0.106</u>	0.000	0.003	0.002	0.004	0.009	0.003	0.003	0.004
5	1825	<u>0.278</u>	0.002	<u>0.043</u>	<u>0.039</u>	<u>0.048</u>	<u>0.028</u>	<u>0.046</u>	<u>0.044</u>	<u>0.025</u>
10	3650	<u>0.548</u>	<u>0.051</u>	<u>0.221</u>	<u>0.210</u>	<u>0.232</u>	<u>0.134</u>	<u>0.230</u>	<u>0.224</u>	<u>0.145</u>
15	5475	<u>0.711</u>	<u>0.147</u>	<u>0.401</u>	<u>0.387</u>	<u>0.414</u>	<u>0.267</u>	<u>0.412</u>	<u>0.404</u>	<u>0.292</u>
16	5840	<u>0.740</u>	<u>0.168</u>	<u>0.437</u>	<u>0.422</u>	<u>0.449</u>	<u>0.295</u>	<u>0.447</u>	<u>0.439</u>	<u>0.322</u>
17	6205	<u>0.765</u>	<u>0.191</u>	<u>0.471</u>	<u>0.456</u>	<u>0.483</u>	<u>0.322</u>	<u>0.481</u>	<u>0.473</u>	<u>0.352</u>
20	7300	<u>0.815</u>	<u>0.270</u>	<u>0.558</u>	<u>0.542</u>	<u>0.568</u>	<u>0.401</u>	<u>0.567</u>	<u>0.558</u>	<u>0.436</u>
30	10950	<u>0.880</u>	<u>0.497</u>	<u>0.711</u>	<u>0.697</u>	<u>0.717</u>	<u>0.560</u>	<u>0.717</u>	<u>0.710</u>	<u>0.600</u>
40	14600	<u>0.906</u>	<u>0.654</u>	<u>0.793</u>	<u>0.781</u>	<u>0.798</u>	<u>0.648</u>	<u>0.798</u>	<u>0.792</u>	<u>0.689</u>
50	18250	<u>0.918</u>	<u>0.753</u>	<u>0.841</u>	<u>0.831</u>	<u>0.845</u>	<u>0.697</u>	<u>0.845</u>	<u>0.841</u>	<u>0.739</u>
75	27375	<u>0.927</u>	<u>0.856</u>	<u>0.895</u>	<u>0.891</u>	<u>0.900</u>	<u>0.747</u>	<u>0.900</u>	<u>0.897</u>	<u>0.791</u>
100	36500	<u>0.932</u>	<u>0.905</u>	<u>0.925</u>	<u>0.925</u>	<u>0.931</u>	<u>0.772</u>	<u>0.930</u>	<u>0.930</u>	<u>0.819</u>
150	54750	<u>0.936</u>	<u>0.946</u>	<u>0.953</u>	<u>0.958</u>	<u>0.961</u>	<u>0.795</u>	<u>0.959</u>	<u>0.961</u>	<u>0.843</u>

Tabla II. 8 Concentración de $Pb_{soluble}$ (en $g\ m^{-3}$) respecto al tiempo, de forma horizontal, caso IV

Tiempo		Pie del bordo		Distancia horizontal (coordenada en "x"), en m					
Años	Días	x = -10 m	x = -15	x = -20	x = -25	x = -30	x = -35	x = -40	
1	365	<u>0.047</u>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
1.4	517	<u>0.053</u>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
2	722	<u>0.059</u>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
3	1008	<u>0.069</u>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
5	1825	<u>0.103</u>	0.006	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	
10	3650	<u>0.198</u>	<u>0.081</u>	<u>0.034</u>	<u>0.011</u>	0.003	0.000	0.000	
15	5475	<u>0.289</u>	<u>0.206</u>	<u>0.109</u>	<u>0.045</u>	<u>0.014</u>	0.003	0.000	
16	5840	<u>0.307</u>	<u>0.233</u>	<u>0.126</u>	<u>0.053</u>	<u>0.016</u>	0.003	0.000	
17	6205	<u>0.324</u>	<u>0.261</u>	<u>0.144</u>	<u>0.062</u>	<u>0.019</u>	0.004	0.001	
20	7300	<u>0.369</u>	<u>0.350</u>	<u>0.212</u>	<u>0.100</u>	<u>0.034</u>	0.007	0.001	
30	10950	<u>0.449</u>	<u>0.567</u>	<u>0.438</u>	<u>0.283</u>	<u>0.144</u>	<u>0.051</u>	<u>0.015</u>	
40	14600	<u>0.490</u>	<u>0.700</u>	<u>0.608</u>	<u>0.460</u>	<u>0.286</u>	<u>0.128</u>	<u>0.048</u>	
50	18250	<u>0.512</u>	<u>0.779</u>	<u>0.721</u>	<u>0.601</u>	<u>0.428</u>	<u>0.228</u>	<u>0.104</u>	
75	27375	<u>0.535</u>	<u>0.858</u>	<u>0.841</u>	<u>0.777</u>	<u>0.659</u>	<u>0.465</u>	<u>0.300</u>	
100	36500	<u>0.547</u>	<u>0.897</u>	<u>0.898</u>	<u>0.862</u>	<u>0.788</u>	<u>0.638</u>	<u>0.484</u>	
150	54750	<u>0.558</u>	<u>0.931</u>	<u>0.943</u>	<u>0.927</u>	<u>0.892</u>	<u>0.806</u>	<u>0.706</u>	

Caso V. Contenido de agua gravimétrico mínimo y relación de dispersión $\alpha_L/\alpha_T = 1$

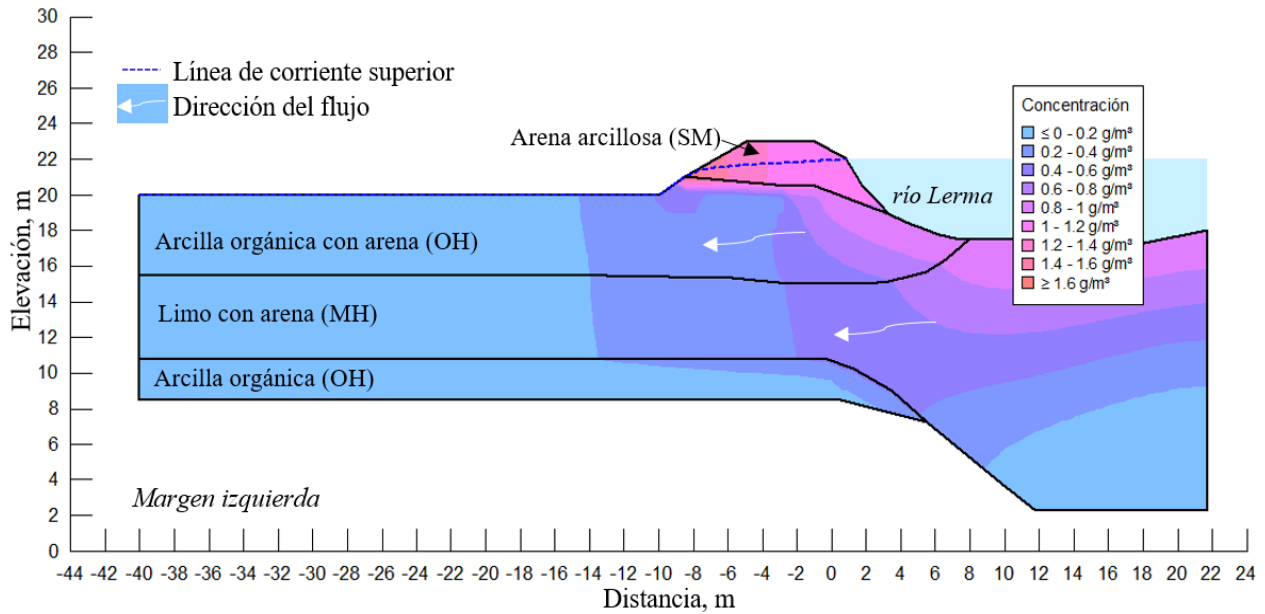


Figura II. 9 Pluma contaminante para un tiempo de 5 años, caso V

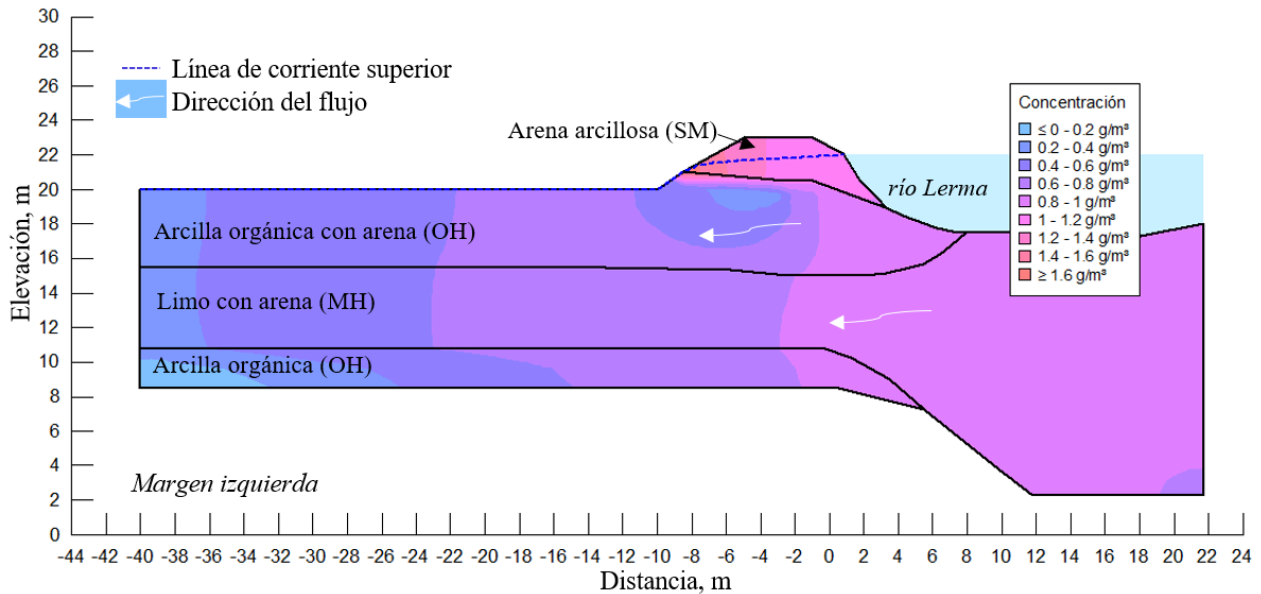


Figura II. 10 Pluma contaminante para un tiempo de 50 años, caso V

Tabla II. 9 Concentración de $Pb_{soluble}$ (en $g\ m^{-3}$) respecto al tiempo, de forma vertical, caso V

Tiempo		Nodos		Distancia vertical (coordenada en "y"), en m						
Años	Días	Intermedio	Ribera	y = 20	y = 18	y = 16	y = 14	y = 12	y = 10	y = 8.5
1	365	<u>0.139</u>	0.004	<u>0.034</u>	<u>0.015</u>	<u>0.021</u>	<u>0.156</u>	<u>0.024</u>	<u>0.018</u>	<u>0.113</u>
1.4	517	<u>0.182</u>	<u>0.010</u>	<u>0.055</u>	<u>0.033</u>	<u>0.041</u>	<u>0.183</u>	<u>0.044</u>	<u>0.036</u>	<u>0.140</u>
2	722	<u>0.227</u>	<u>0.020</u>	<u>0.085</u>	<u>0.062</u>	<u>0.072</u>	<u>0.208</u>	<u>0.074</u>	<u>0.066</u>	<u>0.167</u>
3	1008	<u>0.273</u>	<u>0.038</u>	<u>0.129</u>	<u>0.107</u>	<u>0.118</u>	<u>0.236</u>	<u>0.119</u>	<u>0.111</u>	<u>0.198</u>
5	1825	<u>0.352</u>	<u>0.103</u>	<u>0.236</u>	<u>0.221</u>	<u>0.232</u>	<u>0.300</u>	<u>0.231</u>	<u>0.225</u>	<u>0.273</u>
10	3650	<u>0.438</u>	<u>0.240</u>	<u>0.387</u>	<u>0.382</u>	<u>0.391</u>	<u>0.397</u>	<u>0.388</u>	<u>0.385</u>	<u>0.386</u>
15	5475	<u>0.485</u>	<u>0.347</u>	<u>0.482</u>	<u>0.483</u>	<u>0.489</u>	<u>0.462</u>	<u>0.485</u>	<u>0.485</u>	<u>0.459</u>
16	5840	<u>0.493</u>	<u>0.368</u>	<u>0.499</u>	<u>0.501</u>	<u>0.507</u>	<u>0.473</u>	<u>0.502</u>	<u>0.502</u>	<u>0.473</u>
17	6205	<u>0.500</u>	<u>0.387</u>	<u>0.514</u>	<u>0.517</u>	<u>0.522</u>	<u>0.484</u>	<u>0.518</u>	<u>0.518</u>	<u>0.485</u>
20	7300	<u>0.515</u>	<u>0.433</u>	<u>0.549</u>	<u>0.554</u>	<u>0.558</u>	<u>0.509</u>	<u>0.554</u>	<u>0.555</u>	<u>0.513</u>
30	10950	<u>0.543</u>	<u>0.526</u>	<u>0.612</u>	<u>0.622</u>	<u>0.623</u>	<u>0.557</u>	<u>0.619</u>	<u>0.621</u>	<u>0.567</u>
40	14600	<u>0.559</u>	<u>0.585</u>	<u>0.650</u>	<u>0.662</u>	<u>0.662</u>	<u>0.589</u>	<u>0.657</u>	<u>0.661</u>	<u>0.600</u>
50	18250	<u>0.571</u>	<u>0.625</u>	<u>0.674</u>	<u>0.688</u>	<u>0.687</u>	<u>0.611</u>	<u>0.682</u>	<u>0.686</u>	<u>0.623</u>
75	27375	<u>0.587</u>	<u>0.676</u>	<u>0.706</u>	<u>0.720</u>	<u>0.718</u>	<u>0.645</u>	<u>0.714</u>	<u>0.719</u>	<u>0.657</u>
100	36500	<u>0.598</u>	<u>0.706</u>	<u>0.726</u>	<u>0.739</u>	<u>0.737</u>	<u>0.670</u>	<u>0.733</u>	<u>0.738</u>	<u>0.681</u>
150	54750	<u>0.614</u>	<u>0.740</u>	<u>0.751</u>	<u>0.763</u>	<u>0.760</u>	<u>0.708</u>	<u>0.757</u>	<u>0.761</u>	<u>0.715</u>

Tabla II. 10 Concentración de $Pb_{soluble}$ (en $g\ m^{-3}$) respecto al tiempo, de forma horizontal, caso V

Tiempo		Pie del bordo	Distancia horizontal (coordenada en "x"), en m					
Años	Días	x = -10 m	x = -15	x = -20	x = -25	x = -30	x = -35	x = -40
1	365	<u>0.346</u>	<u>0.038</u>	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000
1.4	517	<u>0.364</u>	<u>0.056</u>	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000
2	722	<u>0.377</u>	<u>0.079</u>	<u>0.012</u>	0.001	0.000	0.000	0.000
3	1008	<u>0.390</u>	<u>0.108</u>	<u>0.025</u>	0.004	0.001	0.000	0.000
5	1825	<u>0.419</u>	<u>0.186</u>	<u>0.081</u>	<u>0.030</u>	0.009	0.002	0.001
10	3650	<u>0.462</u>	<u>0.320</u>	<u>0.211</u>	<u>0.123</u>	<u>0.061</u>	<u>0.026</u>	<u>0.014</u>
15	5475	<u>0.491</u>	<u>0.415</u>	<u>0.318</u>	<u>0.217</u>	<u>0.129</u>	<u>0.066</u>	<u>0.043</u>
16	5840	<u>0.496</u>	<u>0.432</u>	<u>0.339</u>	<u>0.236</u>	<u>0.143</u>	<u>0.075</u>	<u>0.049</u>
17	6205	<u>0.501</u>	<u>0.448</u>	<u>0.358</u>	<u>0.255</u>	<u>0.157</u>	<u>0.084</u>	<u>0.056</u>
20	7300	<u>0.513</u>	<u>0.486</u>	<u>0.407</u>	<u>0.305</u>	<u>0.201</u>	<u>0.116</u>	<u>0.082</u>
30	10950	<u>0.540</u>	<u>0.558</u>	<u>0.507</u>	<u>0.423</u>	<u>0.322</u>	<u>0.229</u>	<u>0.187</u>
40	14600	<u>0.561</u>	<u>0.603</u>	<u>0.571</u>	<u>0.505</u>	<u>0.417</u>	<u>0.329</u>	<u>0.288</u>
50	18250	<u>0.578</u>	<u>0.633</u>	<u>0.614</u>	<u>0.562</u>	<u>0.490</u>	<u>0.414</u>	<u>0.377</u>
75	27375	<u>0.612</u>	<u>0.673</u>	<u>0.670</u>	<u>0.640</u>	<u>0.594</u>	<u>0.544</u>	<u>0.519</u>
100	36500	<u>0.643</u>	<u>0.699</u>	<u>0.703</u>	<u>0.685</u>	<u>0.656</u>	<u>0.623</u>	<u>0.607</u>
150	54750	<u>0.694</u>	<u>0.731</u>	<u>0.739</u>	<u>0.731</u>	<u>0.716</u>	<u>0.699</u>	<u>0.691</u>

Caso VI. Contenido de agua gravimétrico mínimo y relación de dispersión $\alpha_L/\alpha_T=2$

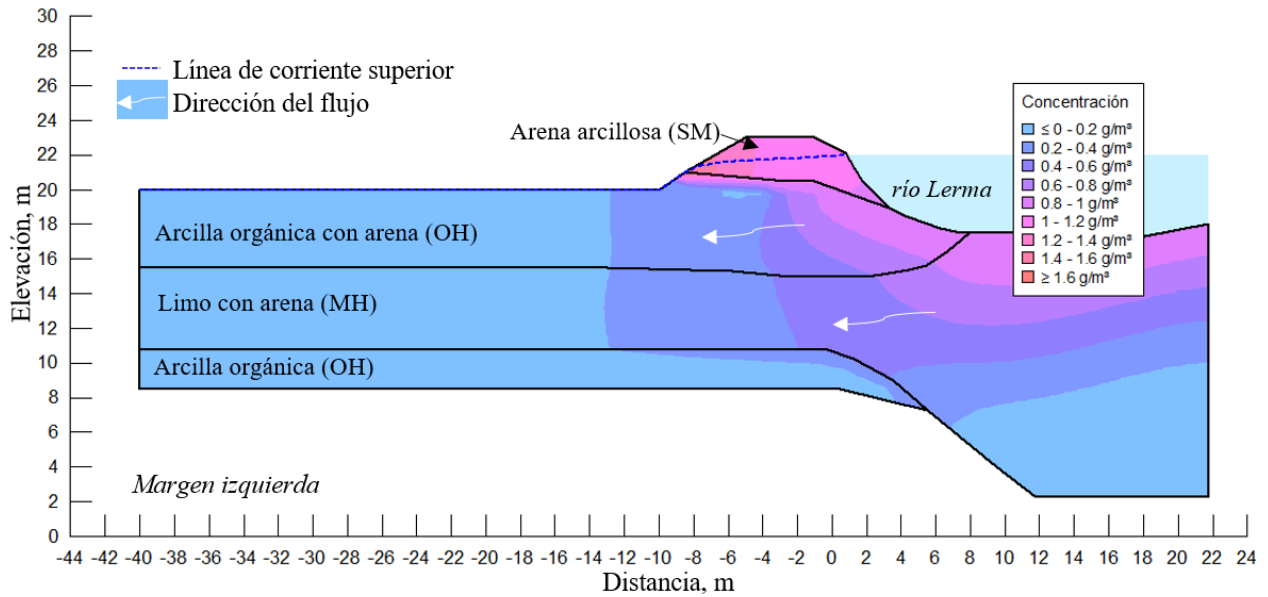


Figura II. 11 Pluma contaminante para un tiempo de 5 años, caso VI

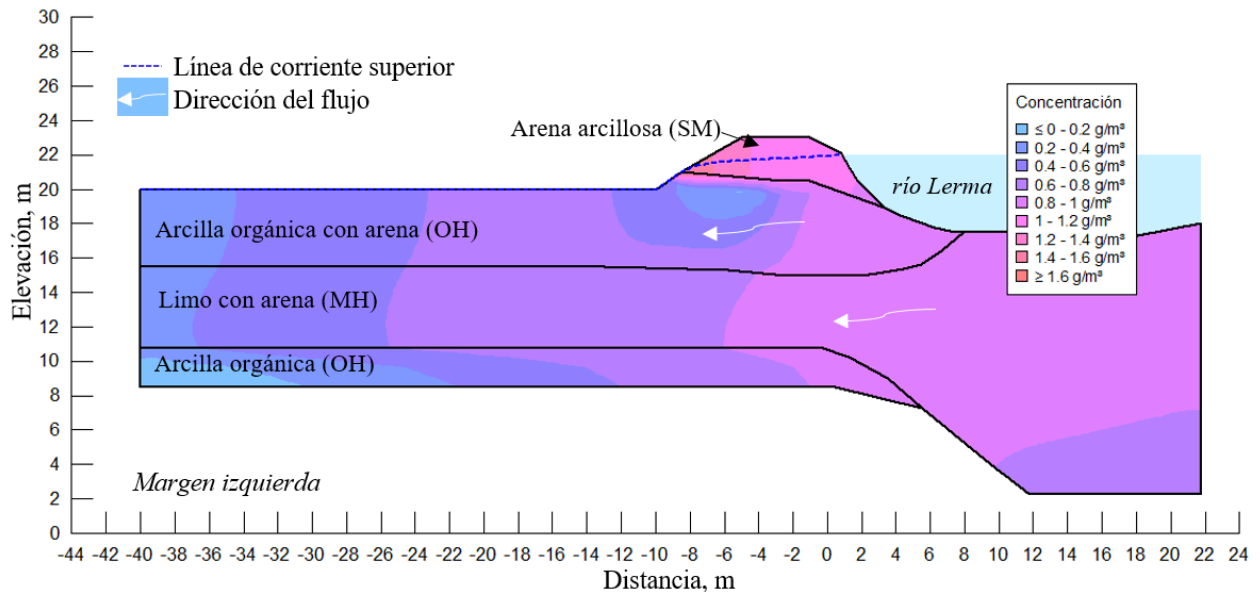


Figura II. 12 Pluma contaminante para un tiempo de 50 años, caso VI

Tabla II. 11 Concentración de $Pb_{soluble}$ (en $g\ m^{-3}$) respecto al tiempo, de forma vertical, caso VI

Tiempo		Nodos		Distancia vertical (coordenada en "y"), en m						
Años	Días	Intermedio	Ribera	y = 20	y = 18	y = 16	y = 14	y = 12	y = 10	y = 8.5
1	365	<u>0.120</u>	0.001	<u>0.026</u>	0.007	<u>0.012</u>	<u>0.099</u>	<u>0.015</u>	0.009	<u>0.078</u>
1.4	517	<u>0.176</u>	0.003	<u>0.042</u>	<u>0.019</u>	<u>0.027</u>	<u>0.119</u>	<u>0.030</u>	<u>0.023</u>	<u>0.097</u>
2	722	<u>0.232</u>	0.007	<u>0.068</u>	<u>0.044</u>	<u>0.054</u>	<u>0.139</u>	<u>0.057</u>	<u>0.049</u>	<u>0.118</u>
3	1008	<u>0.286</u>	<u>0.017</u>	<u>0.107</u>	<u>0.087</u>	<u>0.099</u>	<u>0.164</u>	<u>0.100</u>	<u>0.093</u>	<u>0.145</u>
5	1825	<u>0.373</u>	<u>0.070</u>	<u>0.216</u>	<u>0.210</u>	<u>0.222</u>	<u>0.230</u>	<u>0.218</u>	<u>0.216</u>	<u>0.220</u>
10	3650	<u>0.466</u>	<u>0.209</u>	<u>0.377</u>	<u>0.392</u>	<u>0.399</u>	<u>0.342</u>	<u>0.391</u>	<u>0.395</u>	<u>0.342</u>
15	5475	<u>0.517</u>	<u>0.328</u>	<u>0.480</u>	<u>0.505</u>	<u>0.509</u>	<u>0.418</u>	<u>0.499</u>	<u>0.506</u>	<u>0.425</u>
16	5840	<u>0.526</u>	<u>0.351</u>	<u>0.498</u>	<u>0.525</u>	<u>0.529</u>	<u>0.432</u>	<u>0.519</u>	<u>0.526</u>	<u>0.440</u>
17	6205	<u>0.533</u>	<u>0.372</u>	<u>0.515</u>	<u>0.544</u>	<u>0.546</u>	<u>0.444</u>	<u>0.536</u>	<u>0.544</u>	<u>0.453</u>
20	7300	<u>0.550</u>	<u>0.427</u>	<u>0.552</u>	<u>0.585</u>	<u>0.586</u>	<u>0.474</u>	<u>0.575</u>	<u>0.585</u>	<u>0.485</u>
30	10950	<u>0.578</u>	<u>0.534</u>	<u>0.619</u>	<u>0.658</u>	<u>0.655</u>	<u>0.528</u>	<u>0.644</u>	<u>0.656</u>	<u>0.542</u>
40	14600	<u>0.595</u>	<u>0.601</u>	<u>0.658</u>	<u>0.701</u>	<u>0.696</u>	<u>0.561</u>	<u>0.685</u>	<u>0.698</u>	<u>0.577</u>
50	18250	<u>0.606</u>	<u>0.644</u>	<u>0.683</u>	<u>0.728</u>	<u>0.722</u>	<u>0.583</u>	<u>0.710</u>	<u>0.725</u>	<u>0.600</u>
75	27375	<u>0.622</u>	<u>0.697</u>	<u>0.714</u>	<u>0.762</u>	<u>0.754</u>	<u>0.615</u>	<u>0.742</u>	<u>0.757</u>	<u>0.632</u>
100	36500	<u>0.633</u>	<u>0.726</u>	<u>0.733</u>	<u>0.780</u>	<u>0.771</u>	<u>0.636</u>	<u>0.760</u>	<u>0.775</u>	<u>0.653</u>
150	54750	<u>0.648</u>	<u>0.755</u>	<u>0.754</u>	<u>0.799</u>	<u>0.790</u>	<u>0.665</u>	<u>0.779</u>	<u>0.794</u>	<u>0.680</u>

Tabla II. 12 Concentración de $Pb_{soluble}$ (en $g\ m^{-3}$) respecto al tiempo, de forma horizontal, caso VI

Tiempo		Pie del bordo	Distancia horizontal (coordenada en "x"), en m					
Años	Días	x = -10 m	x = -15	x = -20	x = -25	x = -30	x = -35	x = -40
1	365	<u>0.289</u>	<u>0.014</u>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1.4	517	<u>0.299</u>	<u>0.024</u>	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
2	722	<u>0.309</u>	<u>0.038</u>	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000
3	1008	<u>0.321</u>	<u>0.060</u>	0.010	0.001	0.000	0.000	0.000
5	1825	<u>0.348</u>	<u>0.134</u>	<u>0.052</u>	<u>0.017</u>	0.005	0.001	0.000
10	3650	<u>0.392</u>	<u>0.282</u>	<u>0.180</u>	<u>0.098</u>	<u>0.044</u>	<u>0.016</u>	0.007
15	5475	<u>0.422</u>	<u>0.392</u>	<u>0.297</u>	<u>0.193</u>	<u>0.105</u>	<u>0.046</u>	<u>0.024</u>
16	5840	<u>0.427</u>	<u>0.413</u>	<u>0.320</u>	<u>0.212</u>	<u>0.118</u>	<u>0.053</u>	<u>0.028</u>
17	6205	<u>0.432</u>	<u>0.432</u>	<u>0.341</u>	<u>0.231</u>	<u>0.131</u>	<u>0.060</u>	<u>0.032</u>
20	7300	<u>0.444</u>	<u>0.477</u>	<u>0.398</u>	<u>0.287</u>	<u>0.175</u>	<u>0.087</u>	<u>0.050</u>
30	10950	<u>0.469</u>	<u>0.561</u>	<u>0.513</u>	<u>0.420</u>	<u>0.305</u>	<u>0.194</u>	<u>0.140</u>
40	14600	<u>0.487</u>	<u>0.611</u>	<u>0.586</u>	<u>0.512</u>	<u>0.409</u>	<u>0.297</u>	<u>0.239</u>
50	18250	<u>0.502</u>	<u>0.643</u>	<u>0.634</u>	<u>0.576</u>	<u>0.490</u>	<u>0.388</u>	<u>0.332</u>
75	27375	<u>0.530</u>	<u>0.684</u>	<u>0.692</u>	<u>0.660</u>	<u>0.604</u>	<u>0.534</u>	<u>0.494</u>
100	36500	<u>0.555</u>	<u>0.707</u>	<u>0.725</u>	<u>0.706</u>	<u>0.671</u>	<u>0.625</u>	<u>0.598</u>
150	54750	<u>0.597</u>	<u>0.734</u>	<u>0.756</u>	<u>0.749</u>	<u>0.732</u>	<u>0.708</u>	<u>0.695</u>

Caso VII. Contenido de agua gravimétrico mínimo y relación de dispersión $\alpha_L/\alpha_T=5$

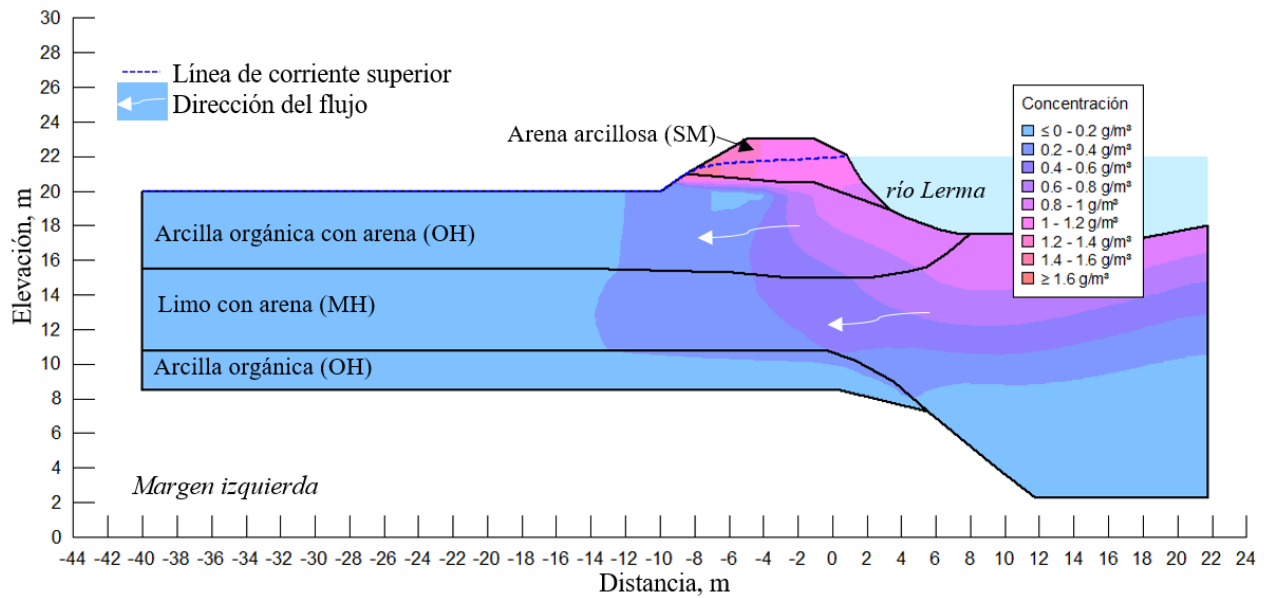


Figura II. 13 Pluma contaminante para un tiempo de 5 años, caso VII

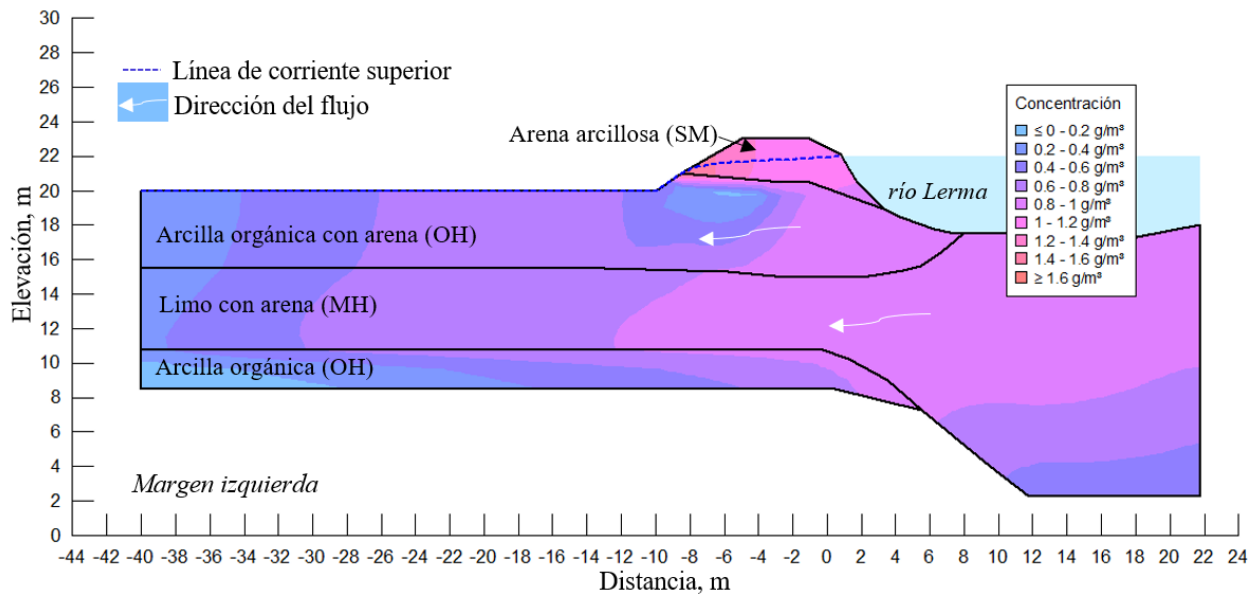


Figura II. 14 Pluma contaminante para un tiempo de 50 años, caso VII

Tabla II. 13 Concentración de Pb_{soluble} (en $g\ m^{-3}$) respecto al tiempo, de forma vertical, caso VII

Tiempo		Nodos		Distancia vertical (coordenada en "y"), en m						
Años	Días	Intermedio	Ribera	y = 20	y = 18	y = 16	y = 14	y = 12	y = 10	y = 8.5
1	365	<u>0.111</u>	0.000	<u>0.023</u>	0.003	0.007	<u>0.061</u>	0.010	0.005	<u>0.053</u>
1.4	517	<u>0.177</u>	0.001	<u>0.038</u>	<u>0.012</u>	<u>0.020</u>	<u>0.080</u>	<u>0.024</u>	<u>0.017</u>	<u>0.071</u>
2	722	<u>0.244</u>	0.002	<u>0.062</u>	<u>0.033</u>	<u>0.047</u>	<u>0.100</u>	<u>0.051</u>	<u>0.042</u>	<u>0.092</u>
3	1008	<u>0.310</u>	0.008	<u>0.100</u>	<u>0.076</u>	<u>0.095</u>	<u>0.126</u>	<u>0.097</u>	<u>0.087</u>	<u>0.119</u>
5	1825	<u>0.411</u>	<u>0.049</u>	<u>0.211</u>	<u>0.212</u>	<u>0.233</u>	<u>0.198</u>	<u>0.228</u>	<u>0.225</u>	<u>0.196</u>
10	3650	<u>0.515</u>	<u>0.189</u>	<u>0.383</u>	<u>0.425</u>	<u>0.437</u>	<u>0.329</u>	<u>0.424</u>	<u>0.433</u>	<u>0.333</u>
15	5475	<u>0.570</u>	<u>0.323</u>	<u>0.493</u>	<u>0.558</u>	<u>0.564</u>	<u>0.420</u>	<u>0.547</u>	<u>0.563</u>	<u>0.428</u>
16	5840	<u>0.580</u>	<u>0.349</u>	<u>0.513</u>	<u>0.582</u>	<u>0.586</u>	<u>0.437</u>	<u>0.569</u>	<u>0.586</u>	<u>0.445</u>
17	6205	<u>0.588</u>	<u>0.374</u>	<u>0.531</u>	<u>0.603</u>	<u>0.606</u>	<u>0.453</u>	<u>0.588</u>	<u>0.607</u>	<u>0.461</u>
20	7300	<u>0.606</u>	<u>0.439</u>	<u>0.571</u>	<u>0.650</u>	<u>0.650</u>	<u>0.488</u>	<u>0.631</u>	<u>0.652</u>	<u>0.497</u>
30	10950	<u>0.634</u>	<u>0.568</u>	<u>0.640</u>	<u>0.729</u>	<u>0.724</u>	<u>0.550</u>	<u>0.704</u>	<u>0.728</u>	<u>0.561</u>
40	14600	<u>0.650</u>	<u>0.645</u>	<u>0.678</u>	<u>0.774</u>	<u>0.766</u>	<u>0.585</u>	<u>0.744</u>	<u>0.771</u>	<u>0.597</u>
50	18250	<u>0.661</u>	<u>0.693</u>	<u>0.702</u>	<u>0.802</u>	<u>0.791</u>	<u>0.608</u>	<u>0.769</u>	<u>0.798</u>	<u>0.620</u>
75	27375	<u>0.675</u>	<u>0.747</u>	<u>0.730</u>	<u>0.835</u>	<u>0.821</u>	<u>0.637</u>	<u>0.799</u>	<u>0.829</u>	<u>0.649</u>
100	36500	<u>0.685</u>	<u>0.776</u>	<u>0.747</u>	<u>0.854</u>	<u>0.838</u>	<u>0.655</u>	<u>0.815</u>	<u>0.846</u>	<u>0.667</u>
150	54750	<u>0.698</u>	<u>0.802</u>	<u>0.766</u>	<u>0.871</u>	<u>0.854</u>	<u>0.679</u>	<u>0.832</u>	<u>0.863</u>	<u>0.690</u>

Tabla II. 14 Concentración de Pb_{soluble} (en $g\ m^{-3}$) respecto al tiempo, de forma horizontal, caso VII

Tiempo		Pie del bordo	Distancia horizontal (coordenada en "x"), en m					
Años	Días	x = -10 m	x = -15	x = -20	x = -25	x = -30	x = -35	x = -40
1	365	<u>0.279</u>	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1.4	517	<u>0.291</u>	0.007	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	722	<u>0.301</u>	<u>0.016</u>	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
3	1008	<u>0.312</u>	<u>0.032</u>	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000
5	1825	<u>0.339</u>	<u>0.103</u>	<u>0.035</u>	<u>0.010</u>	0.002	0.000	0.000
10	3650	<u>0.383</u>	<u>0.267</u>	<u>0.159</u>	<u>0.079</u>	<u>0.032</u>	0.009	0.003
15	5475	<u>0.413</u>	<u>0.398</u>	<u>0.287</u>	<u>0.174</u>	<u>0.086</u>	<u>0.031</u>	<u>0.011</u>
16	5840	<u>0.418</u>	<u>0.422</u>	<u>0.312</u>	<u>0.194</u>	<u>0.097</u>	<u>0.036</u>	<u>0.013</u>
17	6205	<u>0.423</u>	<u>0.445</u>	<u>0.337</u>	<u>0.214</u>	<u>0.110</u>	<u>0.041</u>	<u>0.015</u>
20	7300	<u>0.435</u>	<u>0.501</u>	<u>0.404</u>	<u>0.276</u>	<u>0.153</u>	<u>0.063</u>	<u>0.025</u>
30	10950	<u>0.458</u>	<u>0.601</u>	<u>0.543</u>	<u>0.433</u>	<u>0.299</u>	<u>0.165</u>	<u>0.093</u>
40	14600	<u>0.474</u>	<u>0.658</u>	<u>0.629</u>	<u>0.544</u>	<u>0.421</u>	<u>0.274</u>	<u>0.182</u>
50	18250	<u>0.487</u>	<u>0.692</u>	<u>0.682</u>	<u>0.619</u>	<u>0.516</u>	<u>0.375</u>	<u>0.278</u>
75	27375	<u>0.510</u>	<u>0.732</u>	<u>0.743</u>	<u>0.710</u>	<u>0.646</u>	<u>0.544</u>	<u>0.467</u>
100	36500	<u>0.531</u>	<u>0.754</u>	<u>0.775</u>	<u>0.758</u>	<u>0.718</u>	<u>0.650</u>	<u>0.597</u>
150	54750	<u>0.566</u>	<u>0.777</u>	<u>0.803</u>	<u>0.799</u>	<u>0.780</u>	<u>0.747</u>	<u>0.720</u>

Caso VIII. Contenido de agua gravimétrico mínimo y relación de dispersión $\alpha_L/\alpha_T=20$

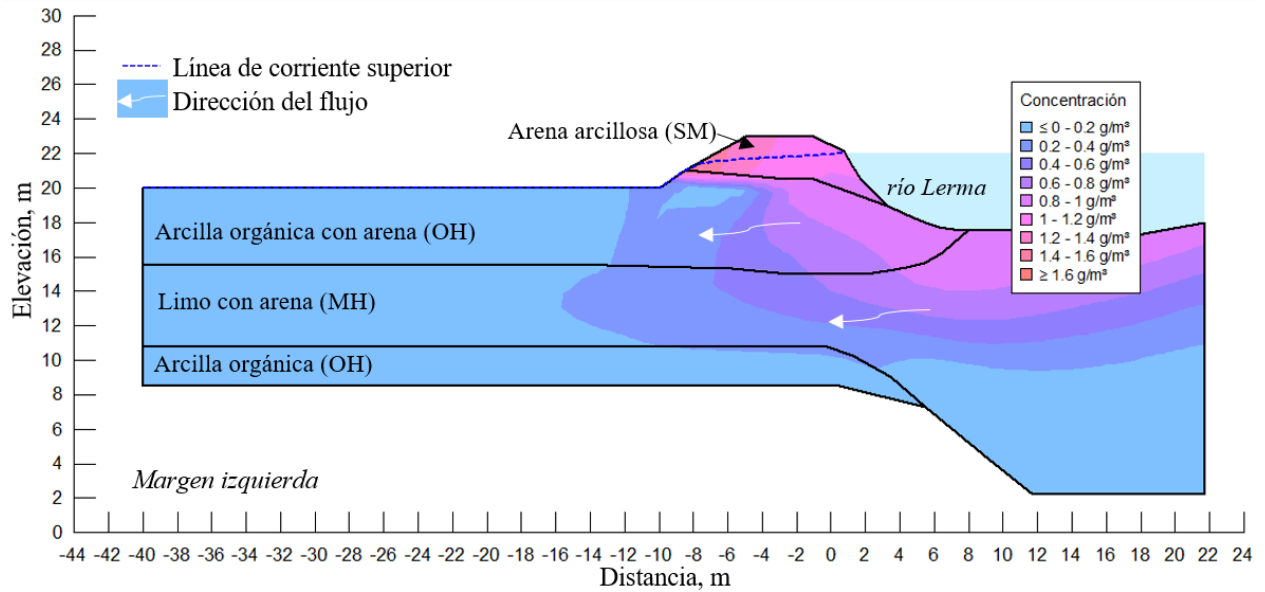


Figura II. 15 Pluma contaminante para un tiempo de 5 años, caso VIII

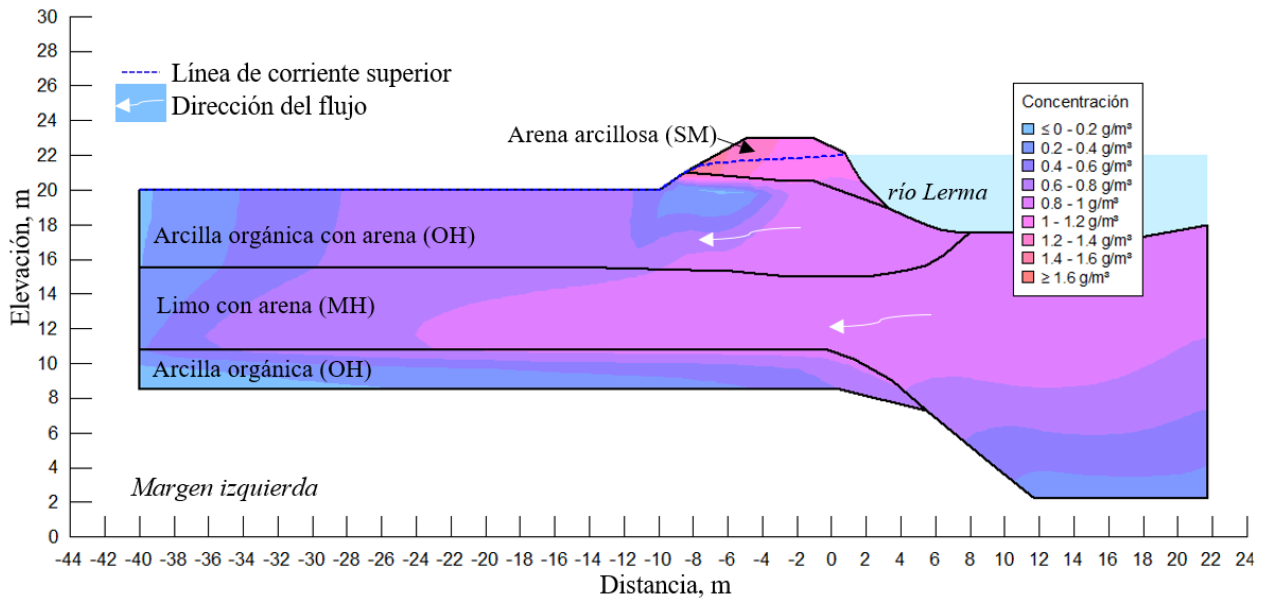


Figura II. 16 Pluma contaminante para un tiempo de 50 años, caso VIII

Tabla II. 15 Concentración de $Pb_{soluble}$ (en $g\ m^{-3}$) respecto al tiempo, de forma vertical, caso VIII

Tiempo		Nodos		Distancia vertical (coordenada en "y"), en m						
Años	Días	Intermedio	Ribera	y = 20	y = 18	y = 16	y = 14	y = 12	y = 10	y = 8.5
1	365	<u>0.152</u>	0.000	<u>0.021</u>	0.001	0.006	<u>0.035</u>	0.008	0.004	<u>0.034</u>
1.4	517	<u>0.235</u>	0.000	<u>0.037</u>	0.005	<u>0.021</u>	<u>0.052</u>	<u>0.025</u>	<u>0.015</u>	<u>0.051</u>
2	722	<u>0.322</u>	0.001	<u>0.064</u>	<u>0.018</u>	<u>0.051</u>	<u>0.072</u>	<u>0.058</u>	<u>0.039</u>	<u>0.072</u>
3	1008	<u>0.410</u>	0.004	<u>0.107</u>	<u>0.048</u>	<u>0.105</u>	<u>0.100</u>	<u>0.116</u>	<u>0.085</u>	<u>0.100</u>
5	1825	<u>0.547</u>	<u>0.034</u>	<u>0.227</u>	<u>0.175</u>	<u>0.262</u>	<u>0.184</u>	<u>0.274</u>	<u>0.232</u>	<u>0.188</u>
10	3650	<u>0.677</u>	<u>0.169</u>	<u>0.410</u>	<u>0.412</u>	<u>0.497</u>	<u>0.338</u>	<u>0.501</u>	<u>0.469</u>	<u>0.344</u>
15	5475	<u>0.742</u>	<u>0.314</u>	<u>0.526</u>	<u>0.574</u>	<u>0.643</u>	<u>0.446</u>	<u>0.640</u>	<u>0.622</u>	<u>0.453</u>
16	5840	<u>0.753</u>	<u>0.343</u>	<u>0.547</u>	<u>0.604</u>	<u>0.669</u>	<u>0.466</u>	<u>0.664</u>	<u>0.649</u>	<u>0.473</u>
17	6205	<u>0.762</u>	<u>0.371</u>	<u>0.565</u>	<u>0.630</u>	<u>0.692</u>	<u>0.484</u>	<u>0.686</u>	<u>0.674</u>	<u>0.491</u>
20	7300	<u>0.781</u>	<u>0.449</u>	<u>0.606</u>	<u>0.690</u>	<u>0.743</u>	<u>0.525</u>	<u>0.733</u>	<u>0.728</u>	<u>0.533</u>
30	10950	<u>0.809</u>	<u>0.607</u>	<u>0.673</u>	<u>0.788</u>	<u>0.825</u>	<u>0.594</u>	<u>0.808</u>	<u>0.816</u>	<u>0.601</u>
40	14600	<u>0.823</u>	<u>0.699</u>	<u>0.707</u>	<u>0.842</u>	<u>0.868</u>	<u>0.631</u>	<u>0.848</u>	<u>0.863</u>	<u>0.637</u>
50	18250	<u>0.831</u>	<u>0.752</u>	<u>0.727</u>	<u>0.875</u>	<u>0.893</u>	<u>0.652</u>	<u>0.870</u>	<u>0.891</u>	<u>0.658</u>
75	27375	<u>0.841</u>	<u>0.806</u>	<u>0.750</u>	<u>0.913</u>	<u>0.921</u>	<u>0.677</u>	<u>0.896</u>	<u>0.922</u>	<u>0.683</u>
100	36500	<u>0.846</u>	<u>0.832</u>	<u>0.763</u>	<u>0.935</u>	<u>0.936</u>	<u>0.692</u>	<u>0.910</u>	<u>0.940</u>	<u>0.698</u>
150	54750	<u>0.854</u>	<u>0.854</u>	<u>0.778</u>	<u>0.955</u>	<u>0.951</u>	<u>0.711</u>	<u>0.923</u>	<u>0.956</u>	<u>0.717</u>

Tabla II. 16 Concentración de $Pb_{soluble}$ (en $g\ m^{-3}$) respecto al tiempo, de forma horizontal, caso VIII

Tiempo		Pie del bordo	Distancia horizontal (coordenada en "x"), en m					
Años	Días	x = -10 m	x = -15	x = -20	x = -25	x = -30	x = -35	x = -40
1	365	<u>0.271</u>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1.4	517	<u>0.281</u>	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	722	<u>0.291</u>	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3	1008	<u>0.302</u>	<u>0.016</u>	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000
5	1825	<u>0.330</u>	<u>0.082</u>	<u>0.022</u>	0.005	0.001	0.000	0.000
10	3650	<u>0.372</u>	<u>0.260</u>	<u>0.136</u>	<u>0.058</u>	<u>0.020</u>	0.004	0.001
15	5475	<u>0.400</u>	<u>0.412</u>	<u>0.271</u>	<u>0.147</u>	<u>0.062</u>	<u>0.018</u>	0.003
16	5840	<u>0.405</u>	<u>0.441</u>	<u>0.299</u>	<u>0.165</u>	<u>0.072</u>	<u>0.021</u>	0.004
17	6205	<u>0.410</u>	<u>0.468</u>	<u>0.326</u>	<u>0.186</u>	<u>0.082</u>	<u>0.024</u>	0.004
20	7300	<u>0.420</u>	<u>0.535</u>	<u>0.405</u>	<u>0.251</u>	<u>0.122</u>	<u>0.039</u>	0.008
30	10950	<u>0.440</u>	<u>0.653</u>	<u>0.576</u>	<u>0.442</u>	<u>0.284</u>	<u>0.134</u>	<u>0.044</u>
40	14600	<u>0.454</u>	<u>0.717</u>	<u>0.681</u>	<u>0.581</u>	<u>0.433</u>	<u>0.250</u>	<u>0.107</u>
50	18250	<u>0.464</u>	<u>0.752</u>	<u>0.743</u>	<u>0.675</u>	<u>0.553</u>	<u>0.366</u>	<u>0.188</u>
75	27375	<u>0.484</u>	<u>0.789</u>	<u>0.805</u>	<u>0.778</u>	<u>0.710</u>	<u>0.571</u>	<u>0.398</u>
100	36500	<u>0.502</u>	<u>0.808</u>	<u>0.834</u>	<u>0.826</u>	<u>0.789</u>	<u>0.699</u>	<u>0.564</u>
150	54750	<u>0.532</u>	<u>0.826</u>	<u>0.858</u>	<u>0.862</u>	<u>0.849</u>	<u>0.807</u>	<u>0.738</u>

ANEXO III. COMPARACIÓN DE RESULTADOS (EN PORCENTAJE)

En este anexo se muestra la comparación de los resultados de cada caso estudiado. Para ello, en la Tabla III. 1 se explica de forma breve en qué consiste cada caso.

Tabla III. 1 Resumen de casos estudiados

Caso	Contenido de agua	Permeabilidad	Coefficiente de distribución	Relación de dispersión
	w	k	K_d	α_L/α_T
I	▼	▲	0	2
II	▲	▼	0	2
III	▼	▲	1	2
IV	▼	▲	10	2
V	▼	▲	1	1
VI	▼	▲	1	2
VII	▼	▲	1	5
VIII	▼	▲	1	20

Nota: ▼ Mínimos ▲ Máximos

Se compararon los siguientes casos:

- Caso I y caso II: Se cuantifica la diferencia en porcentaje de los resultados que se obtienen al utilizar valores de permeabilidad mayores (caso I) y menores (caso II).
- Caso I y caso III: Se cuantifica la diferencia en porcentaje de los resultados que se obtienen al no considerar interacción suelo-contaminante, $K_d=0$ (caso I) y cuando sí se considera tal interacción, $K_d=1$ (caso III).
- Caso III y caso IV: Se cuantifica la diferencia en porcentaje de los resultados que se obtienen al considerar interacción suelo-contaminante, $K_d=1$ (caso III) y $K_d=10$ (caso IV). Tal como se observa, no existe diferencia en los resultados (0%).
- Caso V y caso VI: Se cuantifica la diferencia en porcentaje de los resultados que se obtienen al utilizar diferentes relaciones de dispersión, $\alpha_L/\alpha_T=1$ (caso V) y $\alpha_L/\alpha_T=2$ (caso VI).
- Caso V y caso VII: Se cuantifica la diferencia en porcentaje de los resultados que se obtienen al utilizar diferentes relaciones de dispersión, $\alpha_L/\alpha_T=1$ (caso V) y $\alpha_L/\alpha_T=5$ (caso VII).
- Caso V y caso VIII: Se cuantifica la diferencia en porcentaje de los resultados al utilizar diferentes relaciones de dispersión, $\alpha_L/\alpha_T=1$ (caso V) y $\alpha_L/\alpha_T=20$ (caso VIII).
- Caso VI y caso III: Se cuantifica la diferencia en porcentaje de los resultados al utilizar la misma relación de dispersión, $\alpha_L/\alpha_T=2$, diferenciando que para el caso VI se establece $\alpha_L/\alpha_T=10/5$ para todos los materiales y, para el caso III se asume según el tipo de suelo.

Para obtener la diferencia en porcentaje de los casos comparados, por ejemplo, el caso I y el caso II, de forma vertical, se utilizó la siguiente expresión:

$$Diferencia\ promedio\% = \left(\frac{C_{Ii} - C_{IIi}}{C_{Ii}} + \frac{C_{Ir} - C_{IIr}}{C_{Ir}} + \frac{C_{Iy} - C_{IIy}}{C_{Iy}} \right) \times \frac{100}{n} \quad \text{II. 1}$$

donde C_{Ii} se refiere a la concentración del caso I, en el nodo intermedio, en el tiempo de interés; C_{IIi} se refiere a la concentración del caso II, en el nodo intermedio, en el tiempo de interés; C_{Ir} se refiere a la concentración del caso I, en el nodo de ribera, en el tiempo de interés; C_{IIr} se refiere a la concentración del caso II, en el nodo de ribera, en el tiempo de interés; C_{Iy} se refiere a la concentración del caso I, cuando $y=20, y=18, y=16, y=14, y=12, y=8.5$, en el tiempo de interés; C_{IIy} se refiere a la concentración del caso II, cuando $y=20, y=18, y=16, y=14, y=12, y=8.5$, en el tiempo de interés; n significa el número de datos, para obtener el promedio.

Por ejemplo, para un tiempo de 150 años:

$$\% = \left(\frac{0.997 - 0.716}{0.997} + \frac{0.960 - 0.108}{0.960} + \frac{0.972 - 0.369}{0.972} + \frac{0.965 - 0.318}{0.965} + \frac{0.970 - 0.366}{0.970} + \frac{1.007 - 0.449}{1.007} + \frac{0.971 - 0.369}{0.971} + \frac{0.969 - 0.349}{0.969} + \frac{0.986 - 0.385}{0.986} \right) \times \frac{100}{9} \quad \text{II. 2}$$

$$\% = (0.282 + 0.888 + 0.620 + 0.670 + 0.623 + 0.554 + 0.620 + 0.640 + 0.610) \times \frac{100}{9} \quad \text{II. 3}$$

$$Diferencia\ caso\ I\ y\ caso\ II = 61\ \% \text{ para } 150\ \text{años} \quad \text{II. 4}$$

Significa que cuando se utiliza mayor permeabilidad, los resultados para un tiempo de 150 años, en relación con la profundidad (eje y), en promedio, son 61% mayores que cuando se utiliza una permeabilidad menor.

De manera horizontal:

$$Diferencia\ promedio\% = \left(\frac{C_{Ix} - C_{IIx}}{C_{Ix}} \right) \times \frac{100}{n} \quad \text{II. 5}$$

donde C_{Ix} se refiere a la concentración del caso I, cuando $x=-10, x=-15, x=-20, x=-25, x=-30, x=-35, x=-40$, en el tiempo de interés; C_{IIx} se refiere a la concentración del caso II, cuando $x=-10, x=-15, x=-20, x=-25, x=-30, x=-35, x=-40$, en el tiempo de interés; n significa el número de datos, para obtener el promedio.

Para un tiempo de 150 años:

$$\% = \left(\frac{1.561 - 1.121}{1.561} + \frac{0.972 - 0.197}{0.972} + \frac{0.956 - 0.076}{0.956} + \frac{0.938 - 0.026}{0.938} + \frac{0.901 - 0.007}{0.901} + \frac{0.815 - 0.001}{0.815} + \frac{0.713 - 0.000}{0.713} \right) \times \frac{100}{7} \quad \text{II. 6}$$

$$\% = (0.281 + 0.800 + 0.920 + 0.972 + 0.992 + 0.999 + 1.000) \times \frac{100}{7} \quad \text{II. 7}$$

Diferencia caso I y caso II = 85 % para 150 años II. 8

Significa que cuando se utiliza mayor permeabilidad, los resultados para un tiempo de 150 años, a lo largo de la ribera (eje x), en promedio, son 85% mayores que cuando se utiliza una permeabilidad menor.

Es importante recordar que las concentraciones utilizadas en las ecuaciones II.1 y II.5 son las mostradas en el Anexo I. Asimismo, los resultados de porcentaje promedio de cada comparación que se realizó, para tiempos desde 1 año hasta 150 años, se muestran en la Tabla III. 2 (de forma vertical) y en la Tabla III. 3 (de forma horizontal).

Tabla III. 2 Diferencia de resultados entre casos, de forma vertical (profundidad)

Tiempo		I vs II	I vs III	III vs IV	V vs VI	V vs VII	V vs VIII	VI vs III
Años	Días							
1	365	100	25	0	42	60	65	99
1.4	517	100	23	0	35	50	52	98
2	722	100	21	0	28	39	40	96
3	1008	100	20	0	21	29	29	93
5	1825	100	16	0	11	13	8	78
10	3650	99	10	0	3	-1	-10	43
15	5475	99	8	0	0	-6	-18	20
16	5840	98	8	0	0	-7	-19	16
17	6205	98	7	0	-1	-8	-20	13
20	7300	98	6	0	-1	-9	-22	3
30	10950	96	5	0	-2	-10	-23	-13
40	14600	94	5	0	-2	-10	-23	-19
50	18250	92	5	0	-3	-10	-22	-22
75	27375	84	5	0	-2	-9	-21	-25
100	36500	76	5	0	-2	-9	-19	-26
150	54750	61	5	0	-1	-7	-17	-25

Nota: Los resultados mostrados son en porcentaje.

Tabla III. 3 Diferencia de resultados entre casos, de forma horizontal (ribera)

Tiempo		I vs II	I vs III	III vs IV	V vs VI	V vs VII	V vs VIII	VI vs III
Años	Días							
1	365	99	40	0	78	87	89	98
1.4	517	99	33	0	74	85	88	97
2	722	98	29	0	69	83	88	97
3	1008	98	26	0	63	79	85	97
5	1825	98	18	0	44	64	75	95
10	3650	97	14	0	26	41	53	83
15	5475	96	13	0	19	30	41	71
16	5840	96	12	0	18	29	39	69
17	6205	96	12	0	17	28	37	67
20	7300	95	11	0	15	23	32	61
30	10950	93	10	0	8	12	16	38
40	14600	92	10	0	5	6	7	22
50	18250	91	9	0	3	2	1	11
75	27375	89	10	1	1	-2	-6	-4
100	36500	88	10	1	1	-3	-8	-11
150	54750	85	10	1	1	-4	-9	-16

Nota: Los resultados mostrados son en porcentaje.

De lo anterior, se observa lo siguiente:

- Cuando no se considera interacción suelo-contaminante, $K_d=0$, de forma vertical, inicialmente los resultados son 25% mayores que cuando sí se considera tal interacción, $K_d=1$; posteriormente conforme el tiempo pasa, esta diferencia se reduce a 5%. De manera horizontal, cuando no hay interacción ($K_d=0$), los resultados son 40% mayores que cuando sí se considera tal interacción, ($K_d=1$), seguidamente, esta diferencia se reduce a 10%.
- Cuando se evalúa la interacción suelo-contaminante, modificando $K_d= 1$ a $K_d=10$, se obtiene nula diferencia en los resultados.
- Cuando la relación de dispersión aumenta, también aumenta la diferencia en los resultados. No obstante, conforme el tiempo pasa, esta diferencia disminuye significativamente.
- Cuando se utiliza la misma relación de dispersión, $\alpha_L/\alpha_T=2$, diferenciando que para el caso VI se establece $\alpha_L/\alpha_T=10/5$ para todos los materiales y, para el caso III se asume según el tipo de suelo. Se observan diferencias significativas, siendo mayores los resultados del caso VI. Esto demuestra la importancia de definir los valores de dispersión longitudinal y transversal, en los análisis de transporte de solutos.