



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Dpto. de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente

Modelación de la contaminación del suelo por fugas de tanques subterráneos de combustible. Aplicación a una futura estación de servicio en Barranquilla (Colombia)

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente

AUTOR/A: Mora Cortes, Cristian Enrique

Tutor/a: Rodrigo Ilarri, Javier

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023

Trabajo Fin de Máster

Modelación de la contaminación del suelo por fugas de tanques subterráneos de combustible.
Aplicación a una futura estación de servicio en Barranquilla (Colombia)

Intensificación:
Hidráulica Urbana

Autor:
CRISTIAN MORA CORTES

Tutor:
DR. JAVIER RODRIGO ILARRI

Julio, 2023



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

máster en ingeniería
hidráulica y medio ambiente
mihma

Datos del proyecto	
Alumno: CRISTIAN ENRIQUE MORA CORTES	E-mail: CEMORCOR@POSGRADO.UPV.ES
Título del TFM en español –obligatorio- (máximo 1000 caracteres Tipo oración¹): Modelación de la contaminación del suelo por fugas de tanques subterráneos de combustible. Aplicación a una futura estación de servicio en Barranquilla (Colombia)	
Título del TFM en inglés –obligatorio- (máximo 1000 caracteres Tipo oración¹): Modeling of soil contamination due to leaks from underground fuel tanks. Application to a future service station in Barranquilla (Colombia)	
Título del TFM en Valenciano –obligatorio- (máximo 1000 caracteres Tipo oración¹): Modelació de la contaminació del sòl per fuites de tancs subterranis de combustible. Aplicació a una futura estació de servei a Barranquilla (Colòmbia)	
Tutor²: JAVIER RODRIGO ILARRI	
Cotutor1 UPV³:	
Cotutor2 UPV³:	
Cotutor Externo⁴:	
Director experimental⁵:	
Intensificación cursada: HIDRÁULICA URBANA	
Modalidad⁶: UPV	
Orientación: <input type="checkbox"/> Profesional <input checked="" type="checkbox"/> Investigadora	
Idioma de elaboración: ESPAÑOL	
Resumen español o valenciano –obligatorio- (máximo 5000 caracteres Tipo oración¹): <p>La lixiviación de líquidos peligrosos o contaminantes en el subsuelo es una problemática silenciosa que año tras año va cobrando más importancia debido a su relación directa con los recursos hídricos subterráneos, pudiendo afectar a la calidad del agua generando problemas de salud en las poblaciones que se abastecen de estos recursos. Esto constituye una problemática frecuente en zonas donde los tanques subterráneos de combustible sean antiguos y puedan generar derrames o fugas permanentes. Hoy en día, en Colombia estos temas empiezan a cobrar más importancia y las autoridades ambientales requieren con más frecuencia la realización de estudios previos para la implementación de infraestructuras en las que es necesario establecer medidas de control de la contaminación de forma anticipada.</p> <p>Por ello, la elaboración de este trabajo fin de máster esta principalmente motivada por ser un área poco desarrollada en Colombia y por los efectos negativos que esto supone a los ecosistemas y los recursos hídricos del país, sobre todo para poblaciones rurales e indígenas donde el consumo se hace directo del cuerpo hídrico sin ningún tratamiento previo que, sin embargo, pueden verse afectadas por contaminantes procedentes de actividades cercanas.</p> <p>En este trabajo fin de máster se realiza una evaluación de la contaminación y de los impactos sobre el suelo y las aguas subterráneas procedentes de fugas de tanques subterráneos de</p>	

¹ No se debe escribir todo en mayúsculas

² Podrá ser tutor el profesorado que imparta docencia en el título o la haya impartido en los dos cursos anteriores, o esté adscrito a la ERT.

³ Podrá ser cotutor cualquier miembro del PDI de la UPV. En caso de TFM con orientación investigadora deberá ser doctor.

⁴ Cuando el TFM sea realizado en otra universidad, empresa o institución externa a la UPV, deberá existir obligatoriamente un cotutor externo con relación contractual con la institución o empresa en la que se desarrolle dicho trabajo.

⁵ Adicionalmente, podrá actuar como director Experimental cualquier persona perteneciente o vinculada a la UPV que acredite los conocimientos y la experiencia necesarios para colaborar con el tutor. Contando al director experimental no podrá haber más de 3 tutores y cotutores.

⁶ Para optar a TFM en movilidad el alumno debe estar dado de alta en las bases de datos del SIE u OPI y adjuntar documento acreditativo.



combustible de una futura estación de servicio ubicada en Puerto Colombia, Barranquilla, Atlántico, Colombia. Para ello, se ha utilizado el modelo de lixiviación en zona no saturada VLEACH desarrollado por la USEPA.

Resumen inglés –opcional- (máximo 5000 caracteres Tipo oración¹):

Leaching of dangerous liquids or contaminants in the subsoil is a silent problem that year after year is gaining more importance due to its direct relationship with underground water resources, and can affect the quality of the water, generating health problems in the populations that are supplied. of these resources. This is a frequent problem in areas where the underground fuel tanks are old and can generate spills or permanent leaks. Today, in Colombia, these issues are beginning to gain more importance and the environmental authorities more frequently require prior studies to be carried out for the implementation of infrastructures in which it is necessary to establish pollution control measures in advance.

For this reason, the elaboration of this master's thesis is mainly motivated by being an underdeveloped area in Colombia and by the negative effects that this implies to the ecosystems and water resources of the country, especially for rural and indigenous populations where consumption It is made directly from the body of water without any prior treatment, which, however, may be affected by pollutants from nearby activities.

In this master's thesis, an evaluation of the contamination and the impacts on the soil and groundwater from leaks from underground fuel tanks of a future service station located in Puerto Colombia, Barranquilla, Atlántico, Colombia, is carried out using VLEACH, an unsaturated zone leaching model developed by the USEPA.

Palabras clave español o valenciano –obligatorio- (máximo 5 Tipo oración¹) ⁷: Zona No Saturada, Lixiviación, contaminación, acuífero

Palabras clave inglés –opcional- (máximo 5 Tipo oración¹) ⁷: unsaturated Zone, leachate, pollution, aquifer

Fecha: 22/06/2023

Nota importante: Este impreso se deberá enviar en formato Word al correo electrónico dephma@upv.es por el Tutor del TFM, al menos, 48 horas antes de la reunión de la Comisión Académica del Máster.

Contando al director experimental, no podrá haber más de 3 Tutores y cotutores en un TFM

⁷ Separadas por “;”



ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	2
2.1 Objetivo general	2
2.2 Objetivos específicos	2
3. LOS PROCESOS DE CONTAMINACION EN SUELOS Y AGUAS SUBTERRANEAS	3
3.1 Flujo y Transporte en medio porosos saturados	3
3.1.1 Flujo y Transporte en medios porosos saturados	5
3.1.2 Ecuación del Flujo en Medios Saturados	9
3.1.3 Mecanismos de transporte	12
3.1.4 La ecuación advección-dispersión	16
3.1.5 Soluciones Analíticas ecuación advección-dispersión	18
3.2 El flujo en medios porosos no saturados	19
3.2.1 Grado de saturación y humedad	19
3.2.2 Análisis de procesos (succión e histéresis)	19
3.2.3 La ecuación del flujo en medios porosos no saturados	21
3.3 Transporte de masa en medios no saturados	23
3.3.1 Los procesos de transporte en zona vadosa	23
3.3.2 Coeficientes de partición	26
3.3.3 La ecuación del transporte en medios no saturados	27
3.3.4 El desplazamiento multifase en zona vadosa	28
4. DESCRIPCION DEL MODELO VLEACH	29
4.1 Variables Consideradas	29
4.2 Planteamiento Matemático	33
4.3 Obtención de Resultados	37
5. CARACTERISTICAS DE LOS BTEX COMO CONTAMINANTES DEL SUELO Y LAS AGUAS SUBTERRANEAS	38
5.1 Introducción a los BTEX	39
5.1.1 El funcionamiento de los BTEX	39
5.1.2 Non Aqueous Phase Liquids (NAPLs)	41
5.1.3 Contaminantes orgánicos volátiles (COVs)	42
5.1.4 Producción de Hidrocarburos en Procesos Industriales	45
5.2 Hidrocarburos BTEX	46
5.2.1 Benceno	47
5.2.2 Tolueno	47
5.2.3 Etilbenceno	48
5.2.4 Xileno	49
5.2.5 Productos elaborados con hidrocarburos contaminantes del suelo.	50



6. MARCO LEGAL	53
6.1 Marco Legal en América Latina	53
6.2 Marco Legal en Colombia	53
6.2.1 Marco Legal Colombiana Aplicada a la Contaminación de Suelo	53
6.2.2 Resolución 1582 de 2012:	54
6.2.3 Decreto 1076 de 2015:	55
6.2.4 Resolución 631 de 2015	57
6.3 Marco Legal Municipal de Barraquilla	58
6.3.1 Marco Legal Aplicada en Barraquilla para la Contaminación de Suelo	58
6.3.2 Acuerdo Distrital N 0010 de 200 – Contaminación de Suelo	59
6.3.3 Marco Legal Aplicada en Barraquilla Para Contaminación de Agua Subterránea.	59
6.3.4 Acuerdo Distrital N 0010 de 200 – Agua Subterránea	60
6.4 Valores Límites aplicados en este estudio	60
6.4.1 Concentraciones Máximas en Suelo (Solida)	60
6.4.2 Concentraciones Máximas en el Agua (Líquido)	60
7. CASO DE ESTUDIO	61
7.1 Localización del Proyecto	62
7.2 Caracterización Hidrológica	63
7.3 Hidrogeología Regional Y Local	65
7.4 Información para el modelamiento	68
7.4.1 Análisis Climatológico	68
7.4.2 Análisis Geológico y Litológico	70
7.4.3 Niveles Freáticos	73
7.4.4 Litología y Nivel Freático para Modelamiento	75
7.4.5 Estación de Servicio	75
8. DEFINICION DE ESCENARIOS DE ANÁLISIS	78
9. DATOS DE ENTRADA DEL MODELAMIENTO	80
9.1 Parámetros de Suelo	80
9.1.1 Contenido volumétrico de agua o humedad (θ)	80
9.2 Propiedades de los compuestos volátiles	81
9.2.1 Composición de la Gasolina en Colombia	81
9.3 Parámetros BTEX para VLEACH	82
9.4 Recarga de Concentración en el Modelo (fuga continua)	82
9.5 Valores y Parámetros de Entrada	84
10. RESULTADOS	86
10.1 Concentraciones Máximas en Suelo (Solida)	86



10.2	Concentraciones Máximas en el Agua (Líquido)	86
10.3	Resultados de Contaminación de Suelo por Fuga Continua	88
10.3.1	Resultados en Fase Sólida	88
10.3.2	Resultados en Fase Líquida	92
10.3.3	Resultados en Fase Gas	94
10.3.4	Afección al Nivel freático a 10 metros	96
10.4	Síntesis de resultados	99
11.	CONCLUSIONES Y ANÁLISIS	100
12.	LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN	102
13.	BIBLIOGRAFÍA	103

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Zona no saturada del suelo (zona vadosa)	3
Ilustración 2. Comportamiento hidrogeológico de los materiales.....	4
Ilustración 3. Flujo de agua a través de columna con arena, modelando el flujo en fracturas.	5
Ilustración 4. Rango de validez de la ley de Darcy.	9
Ilustración 5. Volumen de control.....	10
Ilustración 6. Experimento que muestra el efecto de la dispersión.....	13
Ilustración 7. Representación de la tortuosidad.	14
Ilustración 8. Aspectos de los poros que producen dispersión longitudinal.	15
Ilustración 9. Transporte combinado de advección y dispersión.....	15
Ilustración 10. Evolución de contaminantes en aguas subterráneas (“T1, T2-T6” son intervalos de tiempo).....	16
Ilustración 11. Caracterización de succión típicos para diferentes tipos de suelos.....	20
Ilustración 12. Fenómeno de histéresis en la curva de retención. Fuente: (Anria, González, & Quintero, s.f.).....	21
Ilustración 13. Procesos de transporte de contaminantes en la zona vadosa.....	23
Ilustración 14. Fenómeno de adsorción.....	25
Ilustración 15. tipos comunes de isothermas de adsorción.....	26
Ilustración 16. Procesos de transporte en zona no saturada y coeficientes de partición.	26
Ilustración 17. Proceso de transporte en tres fases en el modelo de VLEACH.	29
Ilustración 18. Parámetros de entrada en el modelo de VLEACH.....	30
Ilustración 19. Datos de simulación (izq.) y datos de polígono (der.).....	30
Ilustración 20. Tipos de hidrocarburos.....	38
Ilustración 21. Representación de las plumas de contaminación según LNAPL o DNAPL.	42
Ilustración 22. Ejemplo de smog fotoquímico Bogotá	43
Ilustración 23. Esquema de contaminación por fuga en depósito de gasolina.....	45
Ilustración 24. Estructura química del benceno.....	47
Ilustración 25. Estructura del tolueno.....	48
Ilustración 26. Estructura del Etilbenceno	49
Ilustración 27. Estructura química de las variantes del xileno	49
Ilustración 28. Ubicación general del área de estudio	61
Ilustración 29. Localización de la futura Estación de servicio – Noroeste ciudad de Barranquilla	62
Ilustración 30. Ubicación hidrológica general del sitio de estudio	63
Ilustración 31. Ubicación hidrológica específica del sitio de estudio.....	63
Ilustración 32. Subcuencas de la cuenca Mallorquin	64
Ilustración 33. Vista en planta del sitio de intervención.	65
Ilustración 34. Estructuras de drenaje longitudinal aferentes al sitio de intervención	65
Ilustración 35 Ubicación hidrogeológica del sitio de estudio.....	66
Ilustración 36. Dirección de flujo de agua regional.....	67
Ilustración 37. Estaciones hidroclimatológicas IDEAM.....	68
Ilustración 38. Mapa Geológico de la Plancha 16 - 17 Galerazamba - Barranquilla en la zona de trabajo.	72
Ilustración 39. Ubicación de los Sondeos Realizados por Solgeotec.....	72
Ilustración 40. Columna generalizada de los 3 sondeos realizados.	73
Ilustración 41. Perfil eléctrico Vertical - Sector Barranquilla – Salgar (Perfil 1).	73
Ilustración 42. Perfil Eléctrico Vertical - Sector Barranquilla – Salgar (Perfil 1).	74
Ilustración 43. Perfil geológico obtenido de los sondeos.....	74
Ilustración 44. Perfil estratigráfico de la zona de estudio.	75
Ilustración 45. Tanques Doble Pared	77
Ilustración 46. Medidas del tanque.....	77
Ilustración 47. Información del tanque.....	77

Ilustración 48. Resultados de Modelamiento - Benceno en fase sólida	88
Ilustración 49. Resultados de Modelamiento - Tolueno en fase sólida	89
Ilustración 50. Resultados de Modelamiento - Etilbenceno en fase sólida	90
Ilustración 51. Resultados de Modelamiento - en fase sólida	91
Ilustración 52. Resultados de Modelamiento - Benceno en fase líquida	92
Ilustración 53. Resultados de Modelamiento - Tolueno en fase líquida	92
Ilustración 54. Resultados de Modelamiento – Etilbenceno en fase líquida	93
Ilustración 55. Resultados de Modelamiento – Xileno en fase líquida	93
Ilustración 56. Resultados de Modelamiento – Benceno en fase gas.....	94
Ilustración 57. Resultados de Modelamiento – Tolueno en fase gas.....	95
Ilustración 58. Resultados de Modelamiento – Etilbenceno en fase gas.....	95
Ilustración 59. Resultados de Modelamiento – Xileno en fase gas.....	96
Ilustración 60. Modelamiento Impacto del Benceno al Agua subterránea (Nivel Freático).....	96
Ilustración 61. Modelamiento Impacto del Benceno al Agua subterránea (Nivel Freático).....	97
Ilustración 62. Modelamiento Impacto del Tolueno al Agua subterránea (Nivel Freático).....	97
Ilustración 63. Modelamiento Impacto del Tolueno al Agua subterránea (Nivel Freático).....	98
Ilustración 64. Modelamiento Impacto del Tolueno al Agua subterránea (Nivel Freático).....	98

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Rangos de permeabilidad y conductividad de materiales.....	7
Tabla 2. Grado de saturación y humedad.	19
Tabla 3. Análisis de procesos (succión e histéresis).	20
Tabla 4. Cambio en la conductividad hidráulica y ecuación del flujo.	21
Tabla 5. Mecanismos de desplazamiento en la zona vadosa.....	23
Tabla 6. Coeficientes de partición en la dinámica de traslado en la zona vadosa.	26
Tabla 7. Coeficiente de partición de los compuestos del BTEX.....	27
Tabla 8. Ecuaciones del transporte en medios no saturados.....	28
Tabla 9. Datos de Simulación	31
Tabla 10. Datos del polígono.....	32
Tabla 11. Hipótesis en el modelo de VLEACH.....	33
Tabla 12. Ecuaciones matemáticas en VLEACH.....	34
Tabla 13. Clasificación COV según volatilidad	43
Tabla 14. Clasificación COV según peligrosidad	44
Tabla 15. LMP de contaminantes en suelos, para diferentes hidrocarburos en el suelo según la zona de aplicación y el uso del suelo en Colombia.....	55
Tabla 16. Límites permisibles de hidrocarburos específicos en el agua subterránea de Colombia.....	57
Tabla 17. Máxima concentración en suelo de BTEX en el suelo	60
Tabla 18. Límites permisibles para la concentración de hidrocarburos específicos en el agua subterránea en Colombia.....	60
Tabla 19. Comportamiento hidrogeológico de las unidades aflorantes a nivel regional.....	67
Tabla 20. Estaciones cercanas al sitio de estudio.....	68
Tabla 21. Unidades Litológicas a Nivel Regional	71
Tabla 22. Volumen de hidrocarburos fugados en función del tipo de fuga.....	78
Tabla 23. Escenarios de modelamiento	79
Tabla 24. Parámetros físicos del suelo	80
Tabla 25. Parámetros Hidráulicos del suelo	80
Tabla 26. Conductividad hidráulica	81
Tabla 27. Composición de gasolina USGS.....	82
Tabla 28. Propiedades de los Compuestos BTEX	82
Tabla 29. Escenarios de lluvia sobre la estación de servicio	83



Tabla 30. Volúmenes anuales de agua	83
Tabla 31. Volumen contaminante fugado al año	83
Tabla 32. Concentraciones de contaminante por kg de suelo en la superficie para un accidente puntual	84
Tabla 33. Parámetros introducidos simulación del Benceno	84
Tabla 34. Parámetros introducidos simulación del TOLUENO	85
Tabla 35. Parámetros introducidos simulación del ETILBENCENO.....	85
Tabla 36. Parámetros introducidos simulación del XILENO	85
Tabla 37. Máxima concentración en suelo de BTEX en el suelo	86
Tabla 38. Límites permisibles para la concentración de hidrocarburos específicos en el agua subterránea en Colombia.....	86
Tabla 39. Máxima concentración en fase gas de BTEX en EEUU	87
Tabla 40. Tiempo (años) para actuar en caso de fuga continua, fase sólida	91
Tabla 41. Tiempo (años) para actuar en caso de fuga continua, fase líquida.....	94
Tabla 42. Tiempos para actuar sobre el suelo o para que se contamine el acuífero en fuga continua	99

1. INTRODUCCIÓN

La lixiviación de líquidos peligrosos en el subsuelo ocurre cuando sustancias contaminantes, como hidrocarburos u otros productos químicos, se infiltran en el suelo y se desplazan a través de él, alcanzando las capas freáticas y los acuíferos subterráneos. Este proceso de migración y transporte de contaminantes puede tener consecuencias devastadoras para los ecosistemas locales, afectando tanto la flora como la fauna, así como el estado del agua disponible para el consumo personal.

Por otro lado, en Colombia, aunque la problemática de la lixiviación en el subsuelo comienza a ganar importancia, se ha prestado poca atención a su estudio y abordaje, especialmente en grandes depósitos de combustible, plantas de tratamiento de aguas residuales, rellenos sanitarios y pequeñas industrias.

La elaboración de esta tesis surge de la necesidad de explorar en el conocimiento y comprensión de los impactos generados por la lixiviación de líquidos peligrosos en el subsuelo, tanto en el contexto colombiano como a nivel global. El objetivo principal es realizar una evaluación exhaustiva de la contaminación e impactos en las aguas subterráneas y el suelo, centrándose en un caso de estudio específico: la futura estación de servicio ubicada en Puerto Colombia, Barranquilla, Atlántico, Colombia.

Para llevar a cabo esta investigación, se recopilará y analizará la legislación relevante, se examinará el comportamiento de los hidrocarburos y se estudiará la dinámica del flujo y transporte de contaminantes en las diferentes zonas del suelo. Además, se utilizará el software VLEACH, desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), un poderoso modelo matemático que permitirá comprender los procesos de lixiviación y evaluar el impacto en los recursos hídricos subterráneos y el suelo.

Con esta investigación, se espera generar conciencia sobre la importancia de abordar adecuadamente la problemática de la lixiviación de líquidos peligrosos en el subsuelo, así como proporcionar información valiosa para la gestión y acción preventiva. Solo a través de un enfoque integral y una comprensión profunda de los procesos involucrados, podremos proteger de manera efectiva nuestros recursos hídricos y preservar la salud de las comunidades que dependen de ellos.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Realizar una evaluación técnica de la contaminación y efectos en las aguas subterráneas y el suelo, generados por una posible fuga del depósito de combustible en una futura estación de combustible ubicada en Barranquilla, Atlántico, Colombia.

2.2 Objetivos específicos

- Recopilar la legislación relevante relacionada con la contaminación del suelo y las aguas subterráneas en Latinoamérica y Colombia.
- Analizar la interacción suelo-hidrocarburos, incluyendo la dinámica del flujo y transporte de contaminantes en zonas saturadas y no saturadas.
- Aplicar el software VLEACH desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) para desarrollar un modelo sencillo para un estudio práctico y evaluar el impacto del traslado y migración de contaminantes orgánicos en la zona vadosa sobre los recursos hídricos subterráneos y el suelo, para un proyecto en Colombia.
- Identificar y analizar si los resultados sobre pasan o están dentro de los límites permisibles de la normativa colombiana y los estándares de la USEPA considerados en este estudio.
- Proporcionar tiempos para la ejecución de acciones preventivas para mitigar y controlar la contaminación en casos similares, con el objetivo de proteger los recursos hídricos y preservar la salud de las comunidades afectadas.

3. LOS PROCESOS DE CONTAMINACION EN SUELOS Y AGUAS SUBTERRANEAS

3.1 Flujo y Transporte en medio porosos saturados

El agua contenida en los suelos recibe el nombre de agua subterránea, Esta agua procede de la infiltración de las partículas acuosas en superficie, a través de los poros del suelo, por efecto de la gravedad. El terreno se divide en dos zonas conforme al caudal de agua que contenga en sus poros: la zona saturada totalmente inundada y zona vadosa o no saturada donde algunos poros no están ocupados por agua-. El nivel freático separa estas dos zonas. La zona vadosa se divide en tres zonas según su profundidad: la zona de raíces superficial y con mayores cambios en la humedad, la zona intermedia con humedades más bajas y la zona capilar más profunda y que limita con la zona saturada.

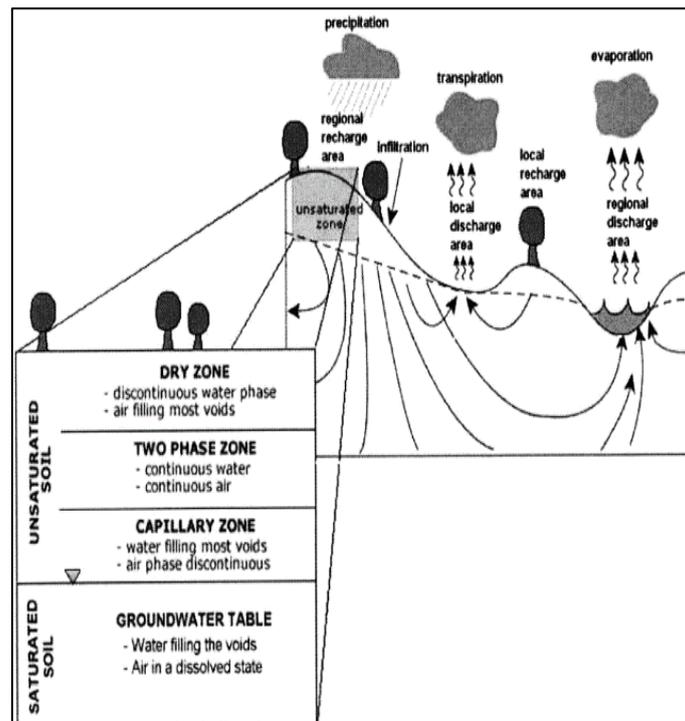


Ilustración 1. Zona no saturada del suelo (zona vadosa)

Fuente: (Osorio, 2010)

Cada medio poroso posee características únicas que lo hacen diferente a otros. Para estudiar la circulación del agua subterránea y el movimiento de sustancias es necesario estar familiarizado con estas características. En Colombia, el término porosidad ϕ [adim] se utiliza para medir la proporción de imperfecciones que existen en un material poroso en relación con su volumen total. Esto permite una mejor comprensión de la permeabilidad del material y sus efectos en el flujo y transporte de líquidos subterráneos.

La porosidad está definida como: ϕ

$$\phi = \frac{V_v}{V_t} \quad (1)$$

Ecuación 1. Ecuación Porosidad

V_v = Volumen huecos [L3] y V_t = Volumen total de material [L3].

El movimiento del agua subterránea dependerá de la conexión que exista entre los huecos del terreno y su capacidad para ser drenados por el efecto de la gravedad. Esto es llamado con el término de porosidad efectiva, ϕ_e , es fundamental para caracterizar el flujo subterráneo, ya que se enfoca en los poros que realmente contribuyen al movimiento del agua.

La porosidad efectiva está definida como: ϕ_e

$$\phi_e = V_{vi} / V_t \quad (2)$$

Ecuación 2. Ecuación Porosidad efectiva.

V_{vi} : volumen de huecos drenados por la gravedad [L3].

La capacidad de un medio saturado para drenar o retener agua se explica a través de los conceptos de rendimiento y retención específicos. El rendimiento específico S_y se define como la proporción entre el volumen que se drena por la influencia de la gravedad y la cantidad total en un medio poroso. Por otro lado, la retención específica S_r se refiere a la cantidad de agua que puede retener un medio poroso en relación con su volumen total. La suma de estos dos conceptos es igual a la porosidad del material.

$$\phi = S_y + S_r \quad (3)$$

Ecuación 3. Despeje

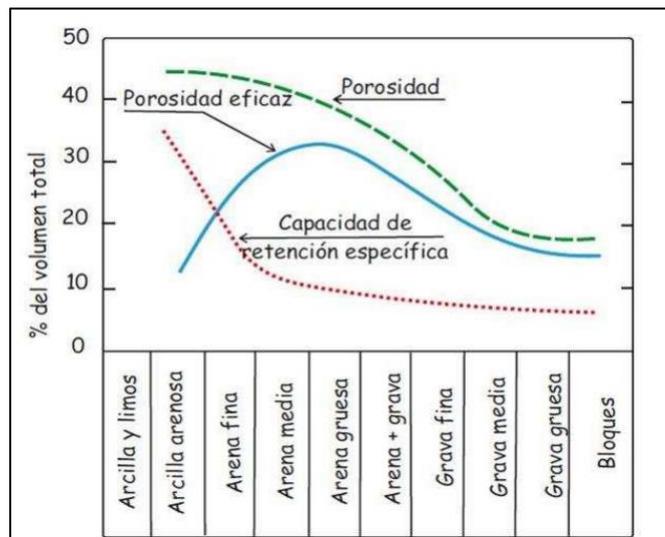


Ilustración 2. Comportamiento hidrogeológico de los materiales.

Fuente: (Antonio Pulido, Universidad Jaime I).

Para medir cuánta agua es absorbida o liberada por un medio saturado en respuesta al cambio de la altura piezométrica en una unidad, es útil emplear el concepto de almacenamiento específico S_s [L-1]. Esta medida se utiliza para evaluar la capacidad que tiene el terreno para almacenar o liberar agua de manera unitaria en función de la altura piezométrica, lo que permite a los expertos en hidrología y recursos hídricos calcular y administrar el agua en distintas zonas y situaciones hidrológicas.

Almacenamiento Específico S_s . [L-1]:

$$Ss = \frac{\Delta V}{\Delta h \Delta x \Delta y \Delta z} \quad (4)$$

Ecuación 4. Almacenamiento específico

3.1.1 Flujo y Transporte en medios porosos saturados

La manera en que el agua se mueve a través del terreno fue caracterizada por primera vez por el ingeniero francés Henry Darcy en el siglo XIX. Darcy trabajó en el aprovisionamiento de agua en Dijon y realizó un experimento para mejorar los filtros de arena. En 1856, Darcy condujo agua a través de un cilindro lleno de arena y midió el tiempo que le tomó al agua atravesar la arena usando tubos manómetros en ambos extremos del cilindro. Realizó variaciones en el experimento como cambiar la sección transversal del cilindro, así como la altura de la entrada y salida del agua. Concluyó que a mayor sección transversal del cilindro y a mayor diferencia de alturas entre la entrada y la salida del agua, el caudal de agua que atravesaba el medio poroso era mayor. Sin embargo, a mayor distancia entre las secciones de entrada y salida, menor era el caudal debido a que la cantidad de material tenía que ser atravesada. [L³/T]

En el siglo XIX, el ingeniero francés Henry Darcy realizó un experimento para mejorar los filtros de arena en el suministro de agua de la ciudad de Dijon. Su experimento consistió en hacer pasar una cantidad determinada de agua a través de un cilindro lleno de arena y medir el tiempo que le tomó al agua atravesar haciendo uso de dos tubos manómetros en los extremos del cilindro. Además, Darcy realizó varias variaciones en el experimento, como cambiar la sección transversal del cilindro y la altura de entrada y salida del agua.

Las principales observaciones de Darcy fueron:

- A mayor sección transversal del cilindro, mayor es el caudal de agua que atravesaba el medio poroso.
- A mayor desnivel de altura entre la entrada y la salida del agua, mayor era el caudal de agua medido.
- A mayor distancia entre las secciones de entrada y salida del cilindro, menor era el flujo hídrico debido a que el volumen de material que debía atravesar era mayor.

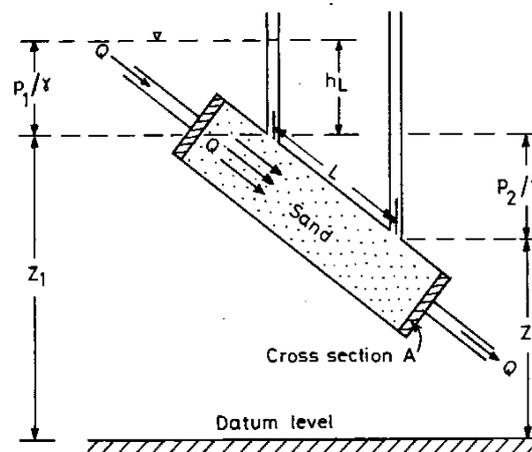


Ilustración 3. Flujo de agua a través de columna con arena, modelando el flujo en fracturas.

Fuente: (Gupta, 1999: p. 127).

Darcy pudo definir que el caudal de agua que atraviesa un material permeable conformado por arenas está en relación directa con la sección transversal del cilindro y la diferencia de altura entre la entrada y salida del agua, es inversamente proporcional a la distancia entre las secciones de entrada y salida del cilindro.

$$Q \propto A \frac{h_1 - h_2}{\Delta l} \quad (5)$$

Ecuación 5. Ecuación de Darcy

Q [L³/T]: caudal de agua que atraviesa el medio poroso,

A [L²]: sección transversal del cilindro,

$h_1 - h_2$ [L]: diferencia de alturas piezométricas entre el punto entrada y de salida del cilindro

Δl [L] es la longitud de extensión de las arenas en el cilindro

Es posible utilizar la ecuación de Bernoulli para determinar la altura piezométrica en un punto dado cuando el agua circula por un material poroso como la arena. En este caso, el término relacionado con la energía cinética se puede ignorar ya que las velocidades del flujo son muy bajas.

$$h = z + \frac{P}{\gamma} \quad (6)$$

Ecuación 6. Ecuación de Bernoulli

Altura de referencia z [L]

Altura piezométrica h [L]

Presión P [M/LT²]

Peso específico del fluido γ [M/L²T²]

Para ampliar este experimento a otros medios porosos, se puede considerar la constante de proporcionalidad de Darcy, también conocida como conductividad hidráulica K [L/T]. Esta constante representa la capacidad del medio poroso para transportar agua y es específica de cada material, así como de los atributos del fluido, incluyendo su densidad y viscosidad. La conductividad hidráulica K se puede obtener mediante la siguiente expresión matemática:

$$K = k + \frac{\rho g}{\mu} \quad (7)$$

Ecuación 7. Conductividad hidráulica

k [L²] la permeabilidad intrínseca,

g [L/T²] la aceleración de la gravedad y como propiedades del fluido

ρ [M/L³] densidad y μ [M/LT] la viscosidad dinámica.

En la siguiente tabla se recogen valores típicos de para la permeabilidad intrínseca y la conductividad hidráulica.

Tabla 1. Rangos de permeabilidad y conductividad de materiales.

Fuente: (Fetter, 2001).

Material	Permeabilidad Intrínseca (darcys)	Conductividad Hidráulica (cm/s)
Arcillas	10-6 – 10-3	10-9 – 10-6
Limos, limos arenosos, arenas arcillosas	10-3 – 10-1	10-6 – 10-4
Arenas limosas, arenas finas	10-2 – 1	10-5 – 10-3
Arenas bien clasificadas	1 – 10 ²	10-3 – 10-1
Gravas bien clasificadas	10 – 10 ³	10-2 – 1

Gracias a la conductividad hidráulica, y teniendo en cuenta que el gradiente hidráulico i en un medio poroso es la diferencia de alturas piezométricas h_1-h_2 entre dos puntos separados por una distancia ΔL , es posible obtener la ley de Darcy mediante la siguiente ecuación.

$$Q = K \left(-\frac{h_1-h_2}{\Delta l} \right) A = -KiA \quad (8)$$

Ecuación 8. Despeje

La convención de utilizar el signo negativo en la ley de Darcy se debe a que el flujo siempre se produce en la dirección de disminución de los niveles piezométricos. La velocidad del flujo en un medio poroso se puede obtener al dividir el caudal obtenido a través de la ley de Darcy por la sección que atraviesa. También se utiliza el concepto de velocidad real del flujo, v , que es la velocidad media en una dirección dentro del medio poroso, y se obtiene dividiendo la velocidad de Darcy por la porosidad efectiva del medio, que tiene en cuenta las conexiones o caminos formados por los poros interconectados. En general, la velocidad real del flujo es mayor que la velocidad de Darcy, y aumenta a medida que disminuye la porosidad efectiva del medio. Esto sucede porque, para un mismo caudal, hay menos sección de poros conectados disponibles.

$$q = \frac{Q}{A} = -Ki \quad (9)$$

Ecuación 9. Despeje

$$v = \frac{q}{\phi_e} = -\frac{Ki}{\phi_e} \quad (10)$$

Ecuación 10. Velocidad real

La ecuación de la ley de Darcy, tal como se presenta en el experimento, es válida en una dirección determinada. Sin embargo, para extrapolar estos resultados a un medio poroso tridimensional real, es necesario considerar que las conductividades hidráulicas y los gradientes pueden cambiar según la dirección del flujo, dado que, por lo general, los medios reales son anisótropos.

$$qx = -Kx \frac{\partial h}{\partial x} ; qy = -Ky \frac{\partial h}{\partial y} ; qz = -Kz \frac{\partial h}{\partial z} \quad (11)$$

Ecuación 11. Despeje

Con el fin de obtener un cálculo aún más preciso, se requiere calcular el flujo específico en cada uno de los planos (x, y, z) desglosado en sus tres componentes individuales. Para tal efecto, es necesario reestructurar las expresiones que contemplan todo lo anterior.

$$\begin{aligned} qX &= -K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} - K_{xy} \frac{\partial h}{\partial y} - K_{xz} \frac{\partial h}{\partial z} \\ qY &= -K_{yx} \frac{\partial h}{\partial x} - K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} - K_{yz} \frac{\partial h}{\partial z} \\ qZ &= -K_{zx} \frac{\partial h}{\partial x} - K_{zy} \frac{\partial h}{\partial y} - K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \end{aligned} \quad (12)$$

Ecuación 12. Despeje

Al analizar estas expresiones, se puede observar que hay 9 componentes de la conductividad hidráulica que se aplican a cualquier medio anisótropo. Estas componentes se pueden representar de manera matricial:

$$\begin{matrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{matrix} \quad (13)$$

Ecuación 13. Despeje

En cuanto a la validez de la ley de Darcy, es importante destacar que se trata de una ley macroscópica que se aplica a un conjunto de poros y no a un poro en particular. Asimismo, la ley de Darcy es válida únicamente en el caso de flujos laminares, es decir, cuando las velocidades del flujo no superan ciertos límites. Es posible determinar si un flujo es laminar calculando el número de Reynolds, el cual depende de la velocidad del flujo, la densidad y la viscosidad dinámica del fluido, así como del diámetro de las partículas sólidas. Si el número de Reynolds es menor que un valor que generalmente se encuentra entre 1 y 10, se considera que el flujo es laminar.

Para que la ley de Darcy sea aplicable, también es necesario que la densidad del fluido sea constante y que el medio esté saturado, es decir, que los poros estén completamente llenos de agua. Estas condiciones son fundamentales para garantizar la validez de la ley de Darcy en la descripción del flujo en medios porosos.

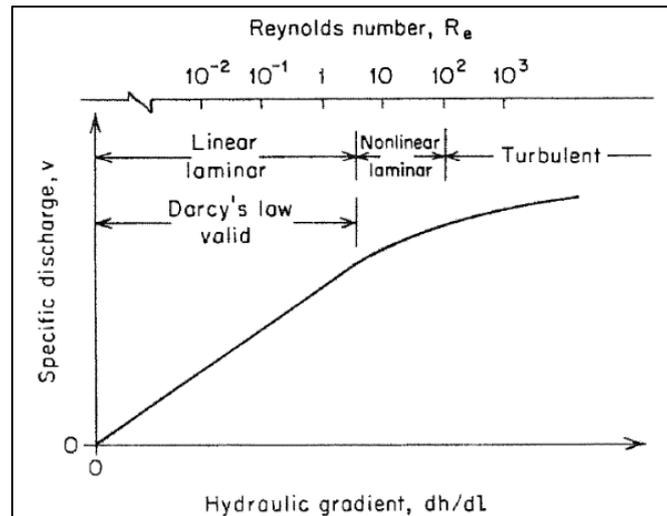


Ilustración 4. Rango de validez de la ley de Darcy.

Fuente: (Freeze y Cherry, 1979).

3.1.2 Ecuación del Flujo en Medios Saturados

La ecuación que describe el flujo en un medio saturado se deriva de la combinación de dos conceptos fundamentales: la ley de Darcy y la ecuación de balance de masa del fluido.

La ley de Darcy establece que el flujo de agua a través de un medio poroso saturado es proporcional al gradiente de presión. En otras palabras, la velocidad del flujo es directamente proporcional a la diferencia de presión y a la conductividad hidráulica del medio. Esta ley proporciona una relación cuantitativa entre el flujo y los parámetros físicos del medio poroso.

Por otro lado, la ecuación de balance de masa del fluido se utiliza para caracterizar los flujos entrantes y salientes en un volumen específico de material poroso. Esta ecuación de conservación establece que el cambio en la masa almacenada en ese volumen, en un intervalo de tiempo determinado, es igual a la diferencia entre la masa fluida que ingresa y la masa fluida que sale del volumen en ese mismo intervalo de tiempo.

Al combinar la ley de Darcy con la ecuación de balance de masa del fluido, se obtiene una ecuación que describe el flujo en un medio saturado. Esta ecuación es fundamental para comprender y predecir el comportamiento de los flujos de agua en medios porosos, y es ampliamente utilizada en la hidrología y la ingeniería hidráulica. Permite analizar el intercambio de masa y el movimiento del agua en el subsuelo, así como evaluar el efecto de las actividades humanas en los recursos hídricos subterráneos.

$$\text{Almacenamiento} = \text{Masa Entrante} - \text{Masa Saliente} \quad (14)$$

Ecuación 14. Ecuación del flujo

$[\Delta \text{ Almacenamiento}] = \text{Cambio en la masa almacenada en ese volumen},$

$$[\text{Masa entrante de fluido}] = \text{Masa de fluido que ingresa al volumen} \quad (15)$$

$[\text{Masa saliente de fluido}] = \text{Masa de fluido que sale del volumen}$

Ecuación 15. Despeje

Teniendo en cuenta un cubo lleno de material poroso con lados Δx , Δy , Δz en función del eje al que sean paralelos, se obtendrá la ecuación de balance de masa fluida dentro del mismo. Es importante que este cubo sea representativo en un nivel macroscópico y no exceda ciertas dimensiones para evitar que se produzcan cambios en la altura piezométrica. Además, es necesario que el cubo se encuentre saturado.

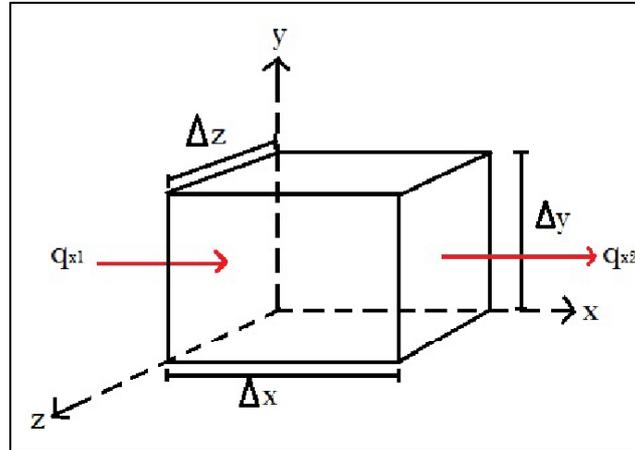


Ilustración 5. Volumen de control.

Fuente: (Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Ingeniería de Minas., 2011).

La masa que entra en el sistema es igual al producto del flujo volumétrico que ingresa por unidad de área y la densidad del agua ρ_w [M/L³]. Al dividir este flujo según las tres componentes de un sistema cartesiano, se obtiene:

$$\rho_w q_x \Delta y \Delta z + \rho_w q_y \Delta x \Delta z + \rho_w q_z \Delta x \Delta y \quad (16)$$

Ecuación 16. Despeje

La masa que sale por unidad de tiempo es igual a la suma de la masa que entra más cierta cantidad de masa fluida que ya estaba contenida dentro.

$$\left[\rho_w q_x + \frac{\partial(\rho_w q_x) \Delta x}{\partial x} \right] \Delta y \Delta z + \left[\rho_w q_y + \frac{\partial(\rho_w q_y) \Delta y}{\partial y} \right] \Delta x \Delta z + \left[\rho_w q_z + \frac{\partial(\rho_w q_z) \Delta z}{\partial z} \right] \Delta x \Delta y \quad (17)$$

Ecuación 17. Despeje

La masa neta que sale es equivalente a la variación entre la masa de entrada y la masa fluida previamente existente en el sistema.

$$- \left[\frac{\partial(\rho_w q_x) \Delta x}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_w q_y) \Delta y}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_w q_z) \Delta z}{\partial z} \right] \Delta x \Delta y \Delta z \quad (18)$$

Ecuación 18. Despeje

La variación en la cantidad de masa almacenada en un volumen en relación con el tiempo se puede expresar de la siguiente forma:

$$\frac{\partial(\rho_w \phi_e) \Delta x}{\partial t} \Delta x \Delta y \Delta z \quad (19)$$

Ecuación 19. Despeje

Igualando las dos expresiones anteriores, se obtiene la ecuación del balance formulada en términos de volumen:

$$-\left[\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z}\right] = \frac{1}{\rho_w} \frac{\partial(\rho_w \phi_e)}{\partial t} \quad (20)$$

Ecuación 20. Despeje

El lado derecho del balance, siendo un cambio en volumen en un tiempo dado, puede ser reemplazado por el coeficiente de almacenamiento específico S_s .

$$\frac{1}{\rho_w} \frac{\partial(\rho_w \phi_e)}{\partial t} = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (21)$$

Ecuación 21. Despeje

Al sustituir los flujos específicos del lado izquierdo del balance por la expresión de la ley de Darcy en términos de la conductividad y los gradientes (los cambios de altura piezométrica en una sección), se puede obtener la ecuación del flujo en un medio saturado.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (22)$$

Ecuación 22. Flujo en un medio saturado

Si estamos estudiando la variación de volumen como fuente o sumidero, habrá que agregar el término "W" que representa estos casos, donde (si $W > 0$ es fuente, en caso contrario, es sumidero).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (23)$$

Ecuación 23. Flujo en un medio saturado

Las dos ecuaciones anteriores corresponden al flujo en un medio anisótropo, cuyo sistema de coordenadas se orienta siguiendo los principales ejes de anisotropía. Sin embargo, siendo la ecuación del flujo una ecuación diferencial, ésta presenta infinitas soluciones. Para hacerla aplicable en un caso real, se deben definir ciertas condiciones como condiciones iniciales y de contorno. La condición inicial se refiere a la altura piezométrica en el instante inicial para una serie de puntos. Cuantos más datos se dispongan, mayor será la precisión de la solución obtenida. Por lo tanto, es importante establecer valores precisos de la altura piezométrica.

Las condiciones de contorno son las relaciones establecidas entre el espacio a analizar y su exterior y se pueden clasificar en tres tipos:

- La condición de tipo Dirichlet establece la altura piezométrica en los bordes, como se utiliza cuando el medio estudiado limita con un cuerpo hídrico superficial.
- La condición de tipo Neumann fija el gradiente o el flujo en los bordes, y se utiliza cuando existe un borde impermeable.

- La condición de tipo Cauchy resulta de la combinación de las dos anteriores.

3.1.3 Mecanismos de transporte

El transporte de sustancias, como los hidrocarburos en estudio en este TFM, puede ocurrir en el agua al fluir a través de medios porosos. Existen múltiples mecanismos que pueden llevar a cabo este transporte

3.1.3.1 Advección

El mecanismo de transporte de sustancias disueltas en el agua conocido como advección se debe únicamente al flujo del agua y del soluto en una dirección específica. Es por eso que el flujo y la advección están estrechamente relacionados.

En la mayoría de los casos reales, el agua subterránea y la fracción disuelta de otras sustancias se desplazan a la misma velocidad y en la misma dirección. Solo en algunos casos puede haber una diferencia entre el flujo del agua subterránea y el del soluto, por ejemplo, cuando las sustancias externas no han sido completamente disueltas o cuando tienen una densidad muy diferente a la del agua no contaminada.

La ecuación de Darcy define la velocidad a la que se mueve el conjunto agua-soluto.

$$v = \frac{K}{\phi_e} \frac{\partial h}{\partial l} \quad (24)$$

Ecuación 24. Velocidad

El flujo másico, F , de sustancias disueltas transportado por advección, es igual a la velocidad real del flujo de agua-soluto, multiplicado por la concentración de soluto C [M/L³] presente en el agua. Las unidades del flujo másico F son [M/T/L²].

$$F = v\phi_e C \quad (25)$$

Ecuación 25. Flujo Másico

Es factible calcular la masa del flujo de una sola sustancia disuelta usando esta ecuación, sin embargo, no es adecuada para calcular el flujo másico de varias sustancias disueltas.

La forma de obtener el flujo total F_T causado por el mecanismo de advección es multiplicando el flujo másico por la sección transversal que ha sido atravesada

$$F_T = FA \quad (26)$$

Ecuación 26. Flujo Total

Según Fetter (1999), la heterogeneidad de los materiales geológicos significa que cuando la advección abarca diferentes estratos de materiales, es posible que el frente de contaminación presente concentraciones de soluto diferentes en cada estrato.

3.1.3.2 Dispersión hidrodinámica

La dispersión hidrodinámica es la responsable de que el soluto se propague en direcciones distintas al flujo de agua subterránea, incluso en sentido inverso. Un experimento con un tubo lleno de un medio poroso similar al utilizado en el experimento de Darcy para demostrar su ecuación homónima, se utiliza con un trazador situado en el extremo de entrada del caudal de agua que va expulsando una sustancia colorante a un ritmo constante, manteniendo una concentración relativa constante en el agua. En el extremo de salida se miden las concentraciones relativas de sustancia colorante en el agua. Después de un tiempo registrado, las concentraciones relativas empiezan a crecer gradualmente, lo cual no ocurriría si el único mecanismo de transporte fuese la advección. Al llegar a la concentración máxima, ya solo domina el mecanismo de advección. Es importante resaltar que cuanto más lento es el flujo de agua subterránea, mayor es la relevancia de la dispersión hidrodinámica, dado que el mecanismo de advección se reduce considerablemente. La dispersión hidrodinámica está caracterizada por dos mecanismos: dispersión mecánica y difusión molecular.

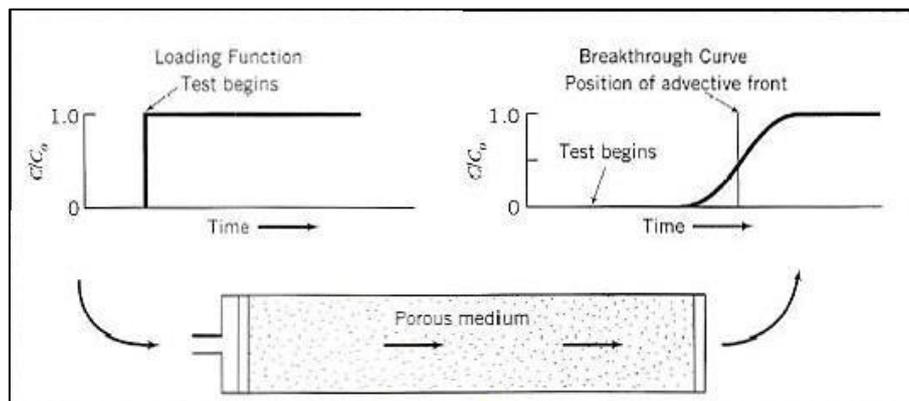


Ilustración 6. Experimento que muestra el efecto de la dispersión.

Fuente: (Domenico y Schwartz, 1990)

3.1.3.3 Difusión molecular

El proceso de difusión molecular describe el movimiento de un soluto en agua desde áreas de mayor concentración a áreas de menor concentración, logrando el equilibrio en todo el espacio de concentraciones, al igual que ocurre con el gradiente que se produce entre diferentes áreas de un mismo acuífero con diferencia de altura piezométrica del agua. La ley que caracteriza este proceso, llamada "primera ley de Fick", es similar a la ley de Darcy, pero en este caso describe el flujo de masa del soluto en lugar del flujo volumétrico del agua que describe la ley de Darcy. La primera ley de Fick se expresa como:

$$F = -D_d \frac{\partial C}{\partial l} \quad (27)$$

Ecuación 27. Ley de Fick

La fórmula dada expresa que el flujo másico de soluto por unidad de área y tiempo [M/T/L²], F, está compuesto por el coeficiente de difusión [L²/T], D_d, multiplicado por el gradiente de concentración [M/L³/L], ∂C/∂l. Debido a que el flujo másico de soluto se dirige desde zonas con mayor concentración hacia zonas de menor concentración, la fórmula incluye un signo negativo.

El flujo másico se produce de manera independiente al flujo volumétrico, lo que significa que el proceso de difusión molecular puede ocurrir incluso si el líquido está en reposo. Además, el soluto se expande en las tres dimensiones. Para aplicar la primera ley de Fick correctamente en un medio poroso, la formulación debe incluir la porosidad efectiva (para considerar la estructura del medio) y una versión modificada del coeficiente de difusión que tenga en cuenta dicha estructura, conocido como el coeficiente de difusión efectiva D^* [L²/T].

$$F = -\phi_e D * \frac{\partial C}{\partial l} \quad (28)$$

Ecuación 28. Despeje

El coeficiente de difusión efectiva se calcula al multiplicar el coeficiente de difusión por un coeficiente empírico adimensional llamado tortuosidad τ [adim].

$$D * = \tau D_d \quad (29)$$

Ecuación 29. Coeficiente de difusión efectiva

La tortuosidad es la medida del camino que una partícula de fluido tiene que recorrer para ir de un punto a otro a través del medio poroso, que no es una línea recta, lo que significa que la difusión molecular es menor en dicho medio. La tortuosidad se calcula dividiendo la distancia en línea recta entre dos puntos entre la distancia recorrida dentro del medio poroso para llegar de un punto a otro. Calcular la tortuosidad utilizando este método no es viable a nivel macroscópico, por lo que se utiliza una técnica simplificada en la que se toma la raíz cúbica de la porosidad efectiva.

$$\tau = \sqrt[3]{\phi_e} \quad (30)$$

Ecuación 30. Ecuación tortuosidad

La definición de la tortuosidad implica que su valor siempre debe ser inferior a la unidad.

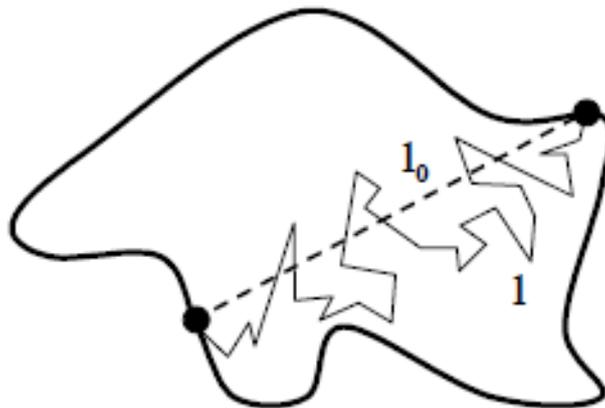


Ilustración 7. Representación de la tortuosidad.

Fuente: (Horacio, 2004)

La dispersión mecánica es un mecanismo de transporte que ocurre debido a la heterogeneidad del medio. En el nivel macroscópico, puede parecer que el transporte solo sigue la dirección del flujo de agua. Sin embargo, al analizar la situación a nivel microscópico, el transporte se produce a través de los caminos formados por los poros (relacionados con la tortuosidad mencionada previamente), los cuales no siguen un trayecto recto. Las partículas se mueven a diferentes velocidades según la ruta que sigan, lo que hace que el soluto se

mueva en múltiples direcciones y se mezcla con el agua que no se encontraba en la dirección del flujo y que no tenía soluto diluido.

Este proceso puede dividirse en dos subprocesos: la dispersión longitudinal (que ocurre en la dirección del flujo de agua subterránea) y la dispersión transversal (que ocurre en una dirección perpendicular al flujo debido a las trayectorias diferentes a una línea recta).

Varios aspectos de los granos que componen el medio causan la dispersión longitudinal. Las variabilidades en la longitud y tamaño de los granos hacen que las partículas fluidas recorran diferentes trayectos. Además, las partículas fluidas fluyen a velocidades mayores cuando se mueven por el centro de los huecos, donde existe menos fricción con las partículas sólidas.

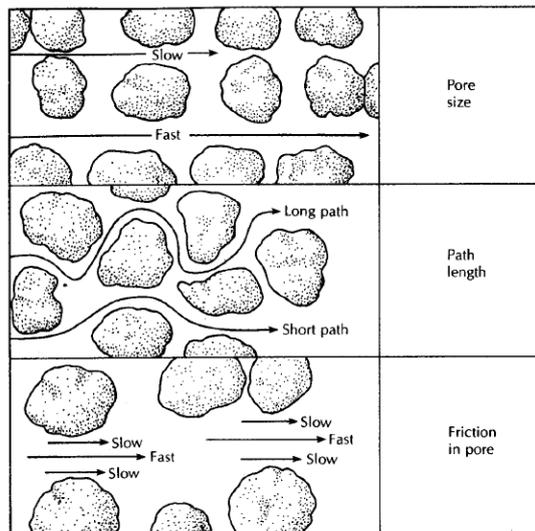


Ilustración 8. Aspectos de los poros que producen dispersión longitudinal.

Fuente: (Fetter, 2001)

Hay coeficientes llamados dispersividad longitudinal α_L y dispersividad transversal α_T que se usan para representar estos procesos, y sus unidades son [L]. Por lo general, se considera que la dispersión longitudinal es de un orden de magnitud mayor que la transversal.

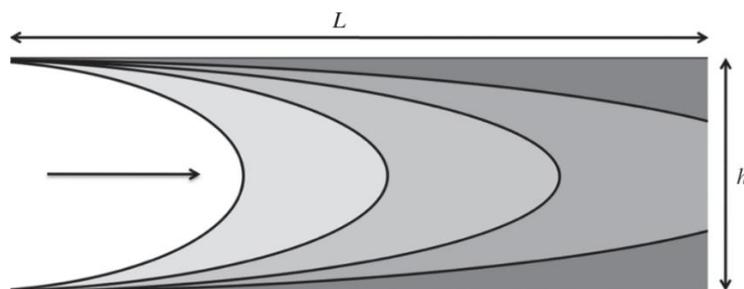


Ilustración 9. Transporte combinado de advección y dispersión.

Fuente: (APPLICATIONS, FLOW IN POROUS ROCKS ENERGY AND ENVIRONMENTAL PP. 70 – 91 , 2014).

Dados los procesos de difusión molecular y dispersión mecánica, se pueden establecer fórmulas para calcular la dispersión hidrodinámica longitudinal D_L y la dispersión hidrodinámica transversal D_T , sumando las componentes de cada mecanismo.

$$D_L = \alpha_L v + D^*$$

$$D_T = \alpha_L v + D^* \quad (31)$$

Ecuación 31. Dispersión hidrodinámica longitudinal y transversal

La velocidad lineal media del agua subterránea en la dirección del flujo se representa por "v". Las unidades de la dispersión hidrodinámica longitudinal y transversal son [L²/T]. Por lo tanto, el flujo másico "F" transportado por dispersión hidrodinámica se puede calcular mediante la siguiente expresión. Al igual que en el caso de la advección, al multiplicar por el área atravesada se obtendría el flujo total "FT".

$$F = \phi_e D \frac{\partial C}{\partial l} \quad (32)$$

Ecuación 32. Despeje

El coeficiente de dispersión hidrodinámica ya sea longitudinal o transversal, se representa por "D" con unidades [L²/T].

Dependiendo de cómo se emitan los contaminantes desde la fuente, su forma puede variar. Si la emisión es continua, se formará un penacho de contaminación, mientras que, si se trata de una emisión puntual, se formará una mancha que se desplazará y aumentará en tamaño con el tiempo. Conforme la mancha se expanda y la fuente de contaminación aporte menos cantidad de contaminantes, la concentración disminuirá.

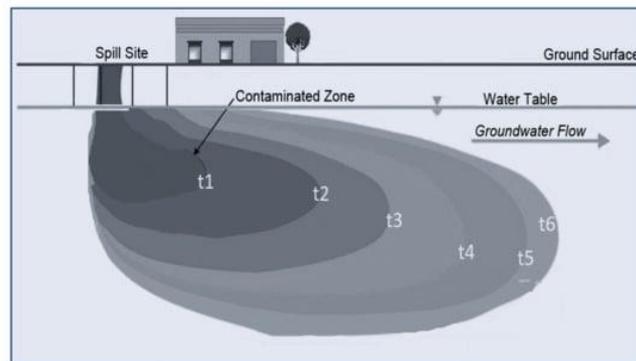


Ilustración 10. Evolución de contaminantes en aguas subterráneas ("T1, T2-T6" son intervalos de tiempo).

Fuente: (Moléculas, 26(19), 5913, 2021)

3.1.4 La ecuación advección-dispersión

Para obtener una ecuación que describa el transporte de soluto a través del material poroso, se debe plantear un balance de masa de la concentración del soluto, de manera similar a como se ha hecho para el flujo.

$$\begin{aligned} & [\Delta \text{ Almacenamiento }] \\ & = [\text{Masa entrante de soluto}] - [\text{Masa saliente de soluto}] \\ & \pm [\text{Ganancia o pérdida de masa de soluto debido a reacciones}] \end{aligned} \quad (33)$$

Ecuación 33. Ecuación advección -dispersión

La ecuación que se va a obtener se basa en la ley de conservación de masa y se deriva de los desarrollos realizados por Ogata (1970) y Bear (1972), que son mencionados en Freeze y Cherry (1979).

Las asunciones tomadas son las siguientes: el medio poroso es homogéneo, isotrópico y está saturado; el flujo es estacionario; y se aplica la ley de Darcy cumpliendo el rango de validez de esta. Se consideran los mecanismos de transporte de advección y dispersión hidrodinámica, pero no se tienen en cuenta procesos de retardo como la adsorción, las reacciones químicas, la biodegradación o la descomposición reactiva, los cuales podrían modificar la ecuación del transporte. Para aplicar el balance de masa de soluto, se define un volumen diferencial en forma de cubo, relleno de material poroso totalmente saturado, cuyos lados miden Δx , Δy , Δz , de manera similar a cómo se obtuvo el balance de volumen para la ecuación del flujo (ver Figura 18). Sumando los términos de flujo másico debidos al mecanismo de transporte de advección y al mecanismo de dispersión hidrodinámica obtenidos anteriormente, se puede calcular el flujo másico entrante para una cara específica del cubo. Cabe destacar que el término correspondiente a la dispersión hidrodinámica es negativo, lo que indica que representa el transporte de sustancia desde zonas de mayor concentración hacia zonas de menor concentración.

$$\begin{aligned} F_x &= v_x \phi_e C - \phi_e D_x \frac{\partial C}{\partial x} \\ F_y &= v_y \phi_e C - \phi_e D_y \frac{\partial C}{\partial y} \\ F_z &= v_z \phi_e C - \phi_e D_z \frac{\partial C}{\partial z} \end{aligned} \quad (34)$$

Ecuación 34. Despeje

El flujo total de masa de soluto entrante se calcula multiplicando cada componente por el área atravesada

$$F_x \Delta y \Delta z + F_y \Delta x \Delta z + F_z \Delta x \Delta y \quad (35)$$

Ecuación 35. Despeje

La estructura de la masa total de soluto que sale del volumen diferencial es similar a lo que se observó en la ecuación del flujo, pero en este caso se sustituye la masa de agua por la masa de soluto.

$$\left[F_x + \frac{\partial(F_x)\Delta x}{\partial x} \right] \Delta y \Delta z + \left[F_y + \frac{\partial(F_y)\Delta y}{\partial y} \right] \Delta x \Delta z + \left[F_z + \frac{\partial(F_z)\Delta z}{\partial z} \right] \Delta x \Delta y \quad (36)$$

Ecuación 36. Despeje

La expresión que describe la diferencia entre la masa total de soluto saliente y entrante es la siguiente:

$$-\phi_e \frac{\partial C}{\partial t} \Delta x \Delta y \Delta z \quad (37)$$

Ecuación 37. Despeje

Considerando que la sustancia disuelta no es reactiva, se obtiene la ecuación completa del balance de masa al igualar las dos ecuaciones anteriores y cancelar los términos del diferencial de volumen.

$$\left(\frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} + \frac{\partial F_z}{\partial z} \right) = -\phi_e \frac{\partial C}{\partial t} \quad (38)$$

Ecuación 38. Despeje

Al reemplazar [#1] en [#2] y eliminar los términos de la porosidad efectiva en ambos lados de la igualdad, obtenemos la ecuación para el transporte debido a procesos de advección-dispersión hidrodinámicos.

$$\left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \right] - \left[\frac{\partial(v_x C)}{\partial x} + \frac{\partial(v_y C)}{\partial y} + \frac{\partial(v_z C)}{\partial z} \right] = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (39)$$

Ecuación 39. Despeje

A partir de esta ecuación, es posible llegar a ecuaciones más simples en ciertas situaciones. Por ejemplo, si se supone un medio homogéneo con flujo uniforme y estacionario, y coeficientes de dispersión constantes en todo el espacio, tanto los coeficientes de dispersión como las velocidades pueden ser tratados como constantes que se encuentran fuera de las derivadas parciales.

$$\left[D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right] - \left[v_x \frac{\partial C}{\partial x} + v_y \frac{\partial C}{\partial y} + v_z \frac{\partial C}{\partial z} \right] = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (40)$$

Ecuación 40. Despeje

Si se supone que el flujo ocurre únicamente en una dimensión, es decir, que es unidimensional, la ecuación de transporte de soluto por advección-dispersión hidrodinámica se simplifica a:

$$D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v_x \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (41)$$

Ecuación 41. Ecuación de transporte de soluto por advección-dispersión hidrodinámica

El coeficiente de dispersión es directamente el coeficiente longitudinal en esta expresión debido a la naturaleza unidimensional del sistema. El motivo de presentar el caso unidimensional en este análisis es porque así trabaja el programa VLEACH, que se analizará en este trabajo.

3.1.5 Soluciones Analíticas ecuación advección-dispersión

La resolución de la ecuación del transporte por advección-dispersión hidrodinámica es compleja al tratarse de una ecuación diferencial. En este contexto, las soluciones analíticas son valiosas ya que brindan una aproximación precisa y se pueden calcular de forma sencilla sin necesidad de programas informáticos. Para hallar las soluciones analíticas, es necesario definir condiciones iniciales y de contorno. Cabe mencionar que estas soluciones solo son aplicables en medios porosos homogéneos con geometrías simples. En relación con el transporte de masa, las condiciones iniciales definen la concentración en el instante inicial del análisis, mientras que las condiciones de contorno definen la relación entre lo que sucede en el ámbito de estudio y lo que ocurre fuera del mismo. Dentro de las condiciones de contorno, se pueden encontrar la concentración y el gradiente fijos. A continuación, se presentan algunos ejemplos de soluciones analíticas.

3.2 El flujo en medios porosos no saturados

La razón para distinguir entre flujo saturado y no saturado radica en que los procesos que lo controlan difieren según la saturación del medio. En un medio saturado, los poros están completamente ocupados por agua y los movimientos son causados por diferencias en la altura piezométrica. Por otro lado, en un medio no saturado, además del agua, también hay aire presente en los poros, lo que implica que además de los movimientos generados por gradientes hidráulicos, se producen otros fenómenos como la presión de succión y la influencia de la gravedad.

3.2.1 Grado de saturación y humedad

Tabla 2. Grado de saturación y humedad.

Fuente: Adaptado de (VLEACH, 1997)

Concepto	Descripción	Ecuación
Grado de saturación y humedad	Los medios no saturados son aquellos en los que no todos los huecos o poros están rellenos de agua. Por tanto, se define una variable denominada grado de saturación la cuál relaciona el volumen del agua respecto al volumen total.	$S_w = \frac{V_w}{V_V} \quad (51)$ <p>Dónde, S_w = grado de saturación [adim] V_w = volumen de agua presente en el suelo [L3] V_V = volumen total de huecos existentes en el medio [L3]</p>
	En la zona vadosa el grado de saturación es menor de la unidad, es decir, no está saturada. La humedad o contenido volumétrico de agua en un suelo es el volumen de agua contenida en un suelo dividido entre el volumen total de suelo. Cuando un suelo está saturado, todos los espacios porosos se encuentran completamente llenos de agua, y en esta condición, la humedad es igual a la porosidad.	$\theta = \frac{V_w}{V_T} \quad (52)$ <p>Dónde, θ = humedad o contenido volumétrico de agua en un suelo [adim] V_T = volumen total de suelo VT [L3]</p>

3.2.2 Análisis de procesos (succión e histéresis)

En la zona vadosa, se produce una mezcla de agua y aire en los espacios porosos del suelo, esta zona se encuentra por encima del nivel freático, Dónde la presión del agua es igual a la presión atmosférica. Por lo tanto, el agua presente en la zona no saturada, al estar por encima del nivel freático, experimenta una presión negativa. Esta presión negativa, también conocida como succión, es necesaria para contrarrestar la fuerza gravitacional que intentaría llevar el agua hacia la zona saturada del suelo.

La succión está estrechamente vinculada al nivel de saturación y a la humedad presente en la zona no saturada, este fenómeno es resultado de la tensión superficial que se genera entre

las paredes de los capilares, el agua y el aire. A medida que el grado de saturación o la humedad disminuyen, la succión aumenta gradualmente hasta alcanzar un límite específico.

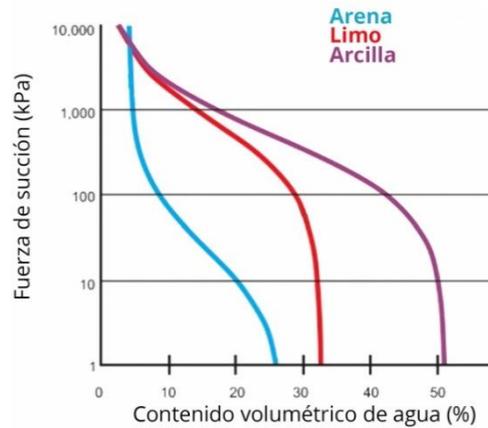


Ilustración 11. Caracterización de succión típicos para diferentes tipos de suelos.

Fuente: (TERRACOTTEM, 2021)

En Ilustración 13 se exhiben las correlaciones promedio entre la humedad y la succión para diversos tipos de suelos, a medida que el tamaño de grano del material disminuye, se genera una succión más elevada debido al menor tamaño de los poros.

Tabla 3. Análisis de procesos (succión e histéresis).

Fuente: Adaptado de (VLEACH, 1997)

Concepto	Descripción	Ecuación
Succión e histéresis	Las fuerzas que generan la succión en la zona no saturada se denominan fuerzas o potencial capilares, ya que se producen en los capilares o pequeños conductos presentes en los espacios porosos del suelo. Estas fuerzas se manifiestan a través de la elevación de una parte del fluido por encima del nivel freático en la zona saturada. La relación entre la succión y la humedad no es constante en un suelo específico debido al fenómeno de histéresis.	$\varphi = \psi(\theta) + Z \quad (53)$ <p>Dónde, θ = potencial de humedad total en la zona no saturada de un suelo φ = potencial capilar o succión Z = potencial gravitacional</p>

El fenómeno de la histéresis se caracteriza por cambios en la curva de relación entre la humedad y la succión, dependiendo de si se está incrementando o disminuyendo la humedad en ese momento. Según Hillel (1980), se han identificado algunas causas de la histéresis, como se muestra en la Ilustración 2; en el proceso de humectación, el ángulo de contacto entre el agua y la superficie del material es mayor en comparación con el proceso de secado. Además, durante la humectación, es posible que se quede atrapado aire en los poros del suelo.

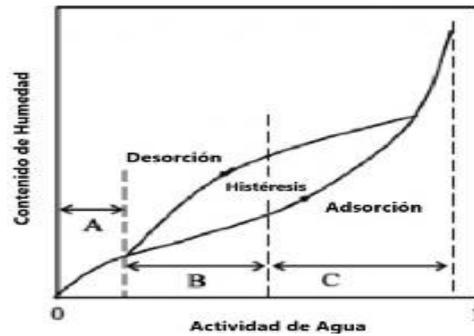


Ilustración 12. Fenómeno de histéresis en la curva de retención. Fuente: (Anria, González, & Quintero, s.f.)

3.2.3 La ecuación del flujo en medios porosos no saturados

Las variaciones en la humedad en la zona no saturada tienen un impacto en el potencial y en la conductividad hidráulica, esto se debe a que cuando el suelo está saturado, con todos los poros ocupados por agua, existe una mayor capacidad para la transmisión de agua debido a los cambios en la altura piezométrica. Por otro lado, en un suelo no saturado, muchos poros están ocupados por aire, lo que impide que se produzca este fenómeno y el flujo de agua se vea afectado.

Tabla 4. Cambio en la conductividad hidráulica y ecuación del flujo.

Fuente: Adaptado de (VLEACH, 1997)

Concepto	Descripción	Ecuación
Cambio en la conductividad hidráulica	La conductividad hidráulica depende de la humedad.	$K(\theta) = \frac{kr(\theta)k\rho_w g}{\mu_w} \quad (54)$ <p>Dónde, $kr(\theta)$ = conductividad relativa o proporción entre la conductividad no saturada y la conductividad saturada a determinada humedad k = permeabilidad intrínseca del material ρ_w = densidad el agua a determinada temperatura g = aceleración de la gravedad μ_w = viscosidad dinámica del agua a determinada temperatura.</p>
	Van Genuchten (1980) propuso una ecuación para relacionar la conductividad hidráulica con la humedad y el potencial de humedad.	$K(\theta) = K_s \sqrt{S_e} \left[-\left(1 - \sqrt[m]{S_e}\right)^m \right]^2 \quad (55)$ <p>Dónde, S_e = saturación efectiva K_s = conductividad hidráulica en saturación m = parámetro de Van Genuchten propio de cada suelo</p>
	La saturación efectiva relaciona el contenido volumétrico de agua	$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (56)$

	para un suelo determinado y en saturación.	Dónde, θ = contenido volumétrico de agua θ_r = contenido volumétrico mínimo de agua para un suelo determinado θ_s = contenido volumétrico de agua en saturación
Ecuación del flujo	Ecuación que permite calcular el flujo en un medio no saturado. Utilizando la ley de Darcy como punto de partida, pero teniendo en cuenta que la conductividad hidráulica no es constante y que la altura piezométrica está influenciada por la succión y la posición vertical z	$q = -K(\theta)i$ $= -K(\theta) \frac{\partial}{\partial z} (-\psi + Z) \quad (57)$ $= -K(\theta) \left(1 - \frac{\partial \psi}{\partial z} \right)$
	La succión o potencial capilar depende únicamente de la humedad del suelo	$\frac{\partial \psi}{\partial z} = \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad (58)$ $q = -K(\theta) \left(1 - \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) \quad (59)$
	En 1928, Richards formalizó la teoría de Buckingham sobre el flujo en un medio no saturado	$q = -K(\psi) \nabla(\phi) \quad (60)$ <p>Dónde; $K(\psi)$ = conductividad hidráulica en medio no saturado para un potencial ψ $\nabla(\phi)$ = gradiente del potencial</p>
	Considerando que la ecuación de continuidad (en el contexto de un medio no saturado) en un volumen de control puede expresarse como la igualdad entre las entradas y salidas, y el cambio en el contenido de humedad en función del tiempo.	$\frac{\partial \theta}{\partial z} = - \left(\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial q_z}{\partial t} \right) \quad (61)$ $= -\nabla q$
	Combinando la teoría de Buckingham y la ecuación de continuidad se llega a la ecuación de Richards	$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla [K(\psi) \nabla(\phi)] \quad (62)$
	Considerando la relación $\phi = \psi + Z$ y tomando en cuenta que el gradiente de la elevación z es cero en las direcciones x e y, mientras que en la dirección z es igual a uno. *	$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial z} \right] - \frac{\partial K(\psi)}{\partial z} \quad (63)$

*Nota: La zona no saturada exhibe una notable heterogeneidad, lo que implica que esta ecuación es una aproximación de los procesos reales que ocurren en ella. En el caso de que la zona no saturada consista en un medio rocoso altamente fracturado, puede surgir el fenómeno del

flujo preferente. Esto implica que el flujo tiende a ocurrir predominantemente a través de las zonas fracturadas, lo cual significa que la estimación obtenida mediante la ecuación de Richards no sería una aproximación precisa.

3.3 Transporte de masa en medios no saturados

El transporte de masa en medios no saturados implica un transporte en fase mixta que involucra sólido, agua, aire y NAPL (líquidos no acuosos).

3.3.1 Los procesos de transporte en zona vadosa

En el desplazamiento de solutos en una zona vadosa, aparte de la dispersión hidrodinámica y la advección, hay tres procesos esenciales. Además, existen varios otros procesos de menor relevancia que resultan difíciles de integrar en las ecuaciones de cálculo.

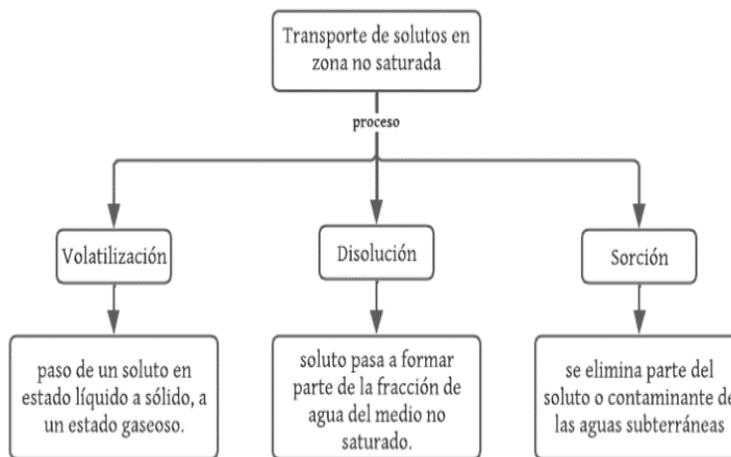


Ilustración 13. Procesos de transporte de contaminantes en la zona vadosa.

Fuente: Elaboración propia, 2023.

En la Tabla 5 se muestran los procesos de volatilización, disolución y sorción y sus respectivas ecuaciones de cálculo:

Tabla 5. Mecanismos de desplazamiento en la zona vadosa.

Fuente: Adaptado de (VLEACH, 1997)

Proceso	Descripción	Ecuación
Volatilización	<p>El proceso se encuentra influenciado por la presión de vapor, la cual indica la propensión de un componente a experimentar evaporación, y está definida por la ley de Raoult.</p> <p>La constante de Henry K_H también es importante para caracterizar el proceso de volatilización.</p> <p>En el caso de compuestos orgánicos presentes en la zona vadosa, la volatilización de dichos compuestos puede plantear un</p>	$P_i = x_i P_i^n \quad (64)$ <p>Dónde, P_i = presión de vapor en fase no acuosa x_i = fracción molar del componente P_i^n = presión de vapor pura del componente</p>

Proceso	Descripción	Ecuación
	problema. Si se acumulan en una zona específica al volatilizarse, existe el riesgo de una explosión si entran en contacto con una fuente de fuego. Además, también pueden ocasionar problemas de salud.	
Disolución	<p>La solubilidad es una característica de un compuesto que se puede medir en base a su capacidad para disolverse en agua y alcanzar el equilibrio, el soluto, NAPL o contaminante pasa a formar parte de la fracción de agua del medio no saturado.</p> <p>En términos de contaminantes del suelo, la solubilidad se considera como la concentración máxima que dichos contaminantes pueden alcanzar sin afectar negativamente al terreno, esta propiedad depende de la temperatura.</p>	$Sol = \frac{C}{V_w} \quad (65)$ <p>Dónde, <i>Sol</i> = solubilidad <i>C</i> = concentración del contaminante o soluto <i>V_w</i> = volumen de agua.</p>
Sorción	<p>En la isoterma lineal la relación entre la cantidad de soluto que queda en el sólido y la concentración de soluto en las aguas es lineal.</p> <p>El principal problema que presenta esta isoterma es que no hay límite en la cantidad de soluto que puede ser sorbido por el suelo, hecho muy alejado de la realidad.</p>	$C^* = K_d C \quad (66)$ <p>Dónde, <i>C*</i> = cantidad de soluto que queda en el sólido (M_{soluto}/M_{suelo}) <i>K_d</i> = coeficiente de distribución e igual a la pendiente de la isoterma lineal. <i>C</i> = concentración de soluto en las aguas (M_{soluto}/M_{suelo})</p>
	<p>Dentro de las isotermas no lineales, existen varios tipos. En primer lugar, la isoterma de Freundlich.</p> <p>Esta isoterma describe la absorción de sustancias, como metales o pesticidas orgánicos. Al igual que la isoterma lineal, enfrenta la limitación de no tener un límite de concentración definido que pueda ser absorbido por el suelo.</p>	$C^* = K_d C^N \quad (67)$ <p>Dónde, <i>C*</i> = cantidad de soluto que queda en el sólido <i>K_d</i> = coeficiente de distribución <i>C</i> = concentración de soluto en las aguas <i>N</i> = constante</p>

Proceso	Descripción	Ecuación
	La isoterma de Langmuir (que es no lineal) resuelve el desafío de la falta de un límite superior en la cantidad de soluto que un sólido puede retener mediante sorción.	$C^* = \frac{\alpha\beta C}{1 + \alpha C} \quad (68)$ <p>Dónde, α=constante de adsorción (Vagua/Msolute) β= límite de soluto que puede ser retenido por sorción por un determinado suelo (Msolute/Msuelo)</p>

La sorción es un proceso que elimina algunos componentes de las aguas subterráneas y tiene una parte física y química. Este proceso involucra cuatro mecanismos: adsorción, adsorción química, absorción e intercambio iónico. La adsorción implica la adherencia del soluto a las paredes de los granos sólidos. El intercambio iónico implica la atracción electrostática de los solutos por los minerales. La adsorción química implica que el soluto se incorpora a la superficie de una roca, suelo o sedimento mediante una reacción química. Finalmente, la absorción retiene el soluto en poros o huecos internos del suelo.

La adsorción es el principal mecanismo asociado a la captación, y se refiere a la retención o adhesión de una parte del soluto a las partículas sólidas del suelo. La adsorción es fundamental en la ralentización de la expansión de contaminantes a través del suelo, y puede ocurrir tanto en la zona saturada como en la no saturada. En la zona saturada, el agua es la principal sustancia adsorbida debido a la mayor proporción agua/soluto. En cambio, en la zona vadosa, los contaminantes suelen ser más fácilmente retenidos en los granos de suelo mediante adsorción.

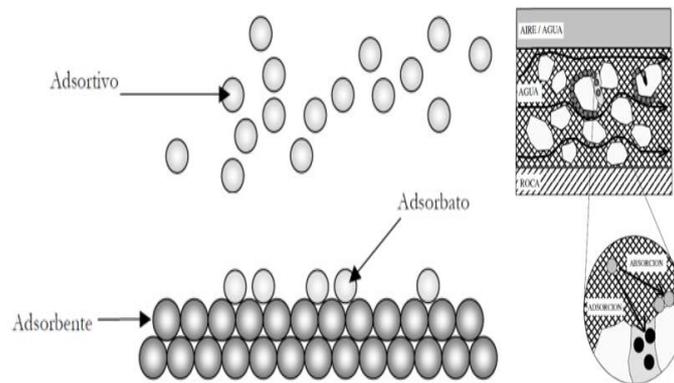


Ilustración 14. Fenómeno de adsorción.

Fuente: (Coronas, 2013).

La sorción es un proceso general que requiere una determinación experimental para cada par soluto-suelo. Esta determinación se refleja en gráficas conocidas como isothermas, que representan la concentración de soluto frente a la concentración retenida en el suelo/roca. Las isothermas son de distintos tipos y pueden ser lineales o no lineales. La Ilustración 5 muestra los tipos comunes de isothermas de adsorción, lineal, de Freundlich y de Lagmir.

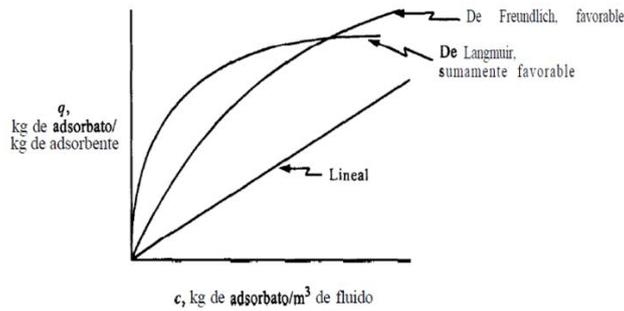


Ilustración 15. tipos comunes de isotermas de adsorción.
Fuente: (Geankoplis, 1998)

3.3.2 Coeficientes de partición

Los coeficientes de partición examinan la concentración de una sustancia específica presente en una mezcla de diferentes fases, incluyendo sólida, líquida, gaseosa o NAPL. En la Ilustración 18 y Tabla 6 se relacionan los procesos de desplazamiento en zona vadosa con sus coeficientes de partición.

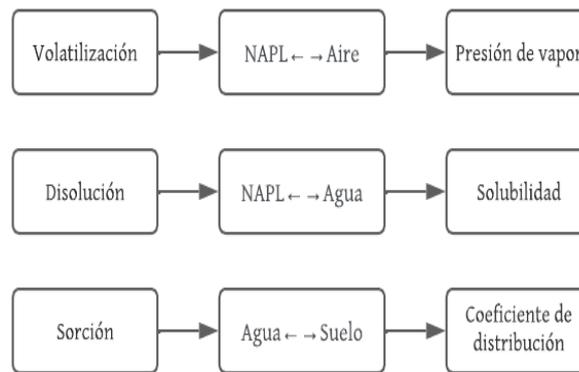


Ilustración 16. Procesos de transporte en zona no saturada y coeficientes de partición.
Fuente: Elaboración propia, 2023.

Tabla 6. Coeficientes de partición en la dinámica de traslado en la zona vadosa.

Fuente: Adaptado de (VLEACH, 1997)

Coeficiente de partición	Descripción	Ecuación
Constante de Henry	Se utiliza para mezclas de líquido y gas, y su propósito es describir la solubilidad de un gas en agua.	$K_H = \frac{C_a}{P_g} \quad (69)$ <p>Dónde, K_H = constante de Henry C_a = concentración de la sustancia gaseosa P_g = presión de la sustancia de estudio en la fase gaseosa</p>

Coeficiente de partición	Descripción	Ecuación
Octanol-agua	<p>Describe la relación entre un soluto orgánico, el octanol (un líquido a base de carbono), y el agua, es especialmente relevante en situaciones relacionadas con la contaminación por hidrocarburos.</p> <p>Cuanto menor sea el peso molecular de un compuesto, mayor será su capacidad de disolverse en agua y mayor será su presión de vapor.</p> <p>En el laboratorio es posible determinar el coeficiente para cada compuesto a partir de este valor, se pueden extrapolar y obtener otros coeficientes de partición utilizando relaciones experimentales establecidas.</p>	$K_{ow} = \frac{(otg \cdot oct)}{(org \cdot aq)} \quad (70)$ <p>Dónde,</p> <p>K_{ow} = coeficiente de partición octanol-agua</p> <p>$otg \cdot oct$ = la concentración de soluto en octanol</p> <p>$org \cdot aq$ = concentración de soluto en agua</p>

En la Tabla 7 se establece una relación entre los compuestos del grupo BTEX y los valores de los coeficientes de partición. Los valores de solubilidad y presión de vapor se obtuvieron a una temperatura de 20°C, mientras que los valores del coeficiente octanol-agua se obtuvieron a una temperatura de 25°C.

Tabla 7. Coeficiente de partición de los compuestos del BTEX.

Fuente: (Lyman et al 1990 y Schwarzenbach et al 1993).

Compuesto	P. molecular (g/mol)	Solubilidad (mg/L)	Presión de vapor (atm)	Log Kow
Benceno	78.11	1780	0.125	2.13
Etilbenceno	106.17	152	0.0125	3.10
Tolueno	92.14	515	0.037	2.69
Xileno	106.17	175	0.0087	3.12

3.3.3 La ecuación del transporte en medios no saturados

En el desplazamiento de sustancias en medios no saturados, se emplea comúnmente la ecuación de advección-dispersión modificada. Esta ecuación se enfoca únicamente en el transporte de la fase líquida y adopta un enfoque conservador, ya que algunos términos que complican el transporte en la fase líquida son difíciles de modelar de manera precisa, por lo anterior solo se incluirá el término debido a la absorción.

La adsorción es un proceso mediante el cual los contaminantes presentes en el agua se adhieren a los granos de suelo, como se ha mencionado anteriormente. Esto resulta en un

retraso en la propagación del contaminante, ya que reduce los espacios disponibles para el flujo entre los granos. Además, conlleva una disminución en la concentración del contaminante a medida que se extiende.

Tabla 8. Ecuaciones del transporte en medios no saturados.

Fuente: Adaptado de (VLEACH, 1997)

Descripción	Ecuación
El retardo que provoca la adsorción depende de la densidad de la matriz seca y de la porosidad, siendo la concentración de contaminante adsorbida por la fase sólida en un determinado tiempo.	$\frac{\rho_b}{\phi} \frac{\partial S}{\partial t} \quad (71)$ <p>Dónde, ρ_b = matriz seca ϕ = porosidad $\partial S/\partial t$ = concentración de contaminante</p>
La ecuación advección-dispersión con la inclusión del fenómeno de la adsorción es	$D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v_x \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\rho_b}{\phi} \frac{\partial S}{\partial t} \quad (72)$
Asumiendo una concentración baja de contaminantes, se puede trabajar con una isoterma lineal	$\frac{\partial S}{\partial t} = K_d \frac{\partial C}{\partial t} \quad (73)$ <p>Dónde, K_d = coeficiente de distribución $\frac{\partial C}{\partial t}$ = concentración de contaminante</p>
Sustituyendo [24] en [23]	$D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v_x \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\rho_b K_d}{\phi} \frac{\partial C}{\partial t} \quad (74)$
Agrupando términos	$R = \frac{\rho_b}{\phi} K_d + 1 \quad (75)$ <p>Dónde, R = factor de retardo [adim]</p>
La ecuación del transporte de masa en un medio no saturado se obtiene al considerar los procesos de advección, dispersión y adsorción.	$\frac{D_L}{R} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \frac{v_x}{R} \frac{\partial C}{\partial x} \quad (76)$

**Nota:* Es importante considerar que el factor de retardo siempre es mayor que uno en un medio no saturado. Por lo tanto, la ecuación de transporte de masa en este tipo de medio tiene en cuenta el efecto de retardo, el cual reduce la propagación de las concentraciones de contaminantes.

3.3.4 El desplazamiento multifase en zona vadosa

En el desplazamiento de contaminantes en la zona vadosa, es necesario considerar las tres fases que están involucradas en el transporte de contaminantes conocidos como líquidos no acuosos (NAPLs): la fase líquida, la fase gaseosa y la fase NAPL. La descripción del flujo y el transporte multifase requiere considerar diferentes ecuaciones. Se necesitan ecuaciones de flujo para cada una de las tres fases, ecuaciones de transporte de masa para cada uno de los compuestos orgánicos presentes, y ecuaciones que tengan en cuenta los procesos de

transferencia de masa entre las distintas fases. Estas ecuaciones permiten caracterizar los procesos de transporte que tienen lugar en el medio no saturado, y se utilizan en conjunto con los coeficientes de partición entre las fases mencionadas previamente.

4. DESCRIPCIÓN DEL MODELO VLEACH

El programa VLEACH se enfoca en la filtración de solutos y el desplazamiento de contaminantes a través de la zona vadosa del suelo, permitiendo modelar un solo contaminante en cada simulación y realizar un análisis unidimensional mediante cálculos de diferencias finitas. El desarrollo de este modelo fue llevado a cabo en 1990 por la empresa CH2M Hill para la EPA, siendo utilizado posteriormente en diferentes lugares y situaciones para evaluar los impactos subterráneos generados por la liberación de contaminantes tipo COV.

Se ha optado por utilizar el modelo VLEACH como herramienta para simular el transporte de la contaminación por BTEX en la zona no saturada; esta elección se debe a que es un modelo simple que no requiere una gran cantidad de datos y permite una aproximación adecuada de los resultados.

El modelo simplificado de VLEACH se centra en el transporte vertical de líquidos y gases, en la ilustración 1 se muestra la metodología que utiliza el modelo para analizar los procesos de transporte en tres fases. Para la fase líquida, el modelo solo considera la advección como el mecanismo de migración, mientras que, para la fase gaseosa se modela la difusión como el mecanismo de transporte. Esto significa que VLEACH no tiene en cuenta otros procesos importantes como la dispersión o la convección, pero aún puede ser útil en ciertas situaciones donde estos procesos son menos importantes. En la discretización espacial, utiliza polígonos verticales los cuales poseen condiciones uniformes y se encuentran divididos en celdas la concentración de contaminantes puede variar entre ellas.

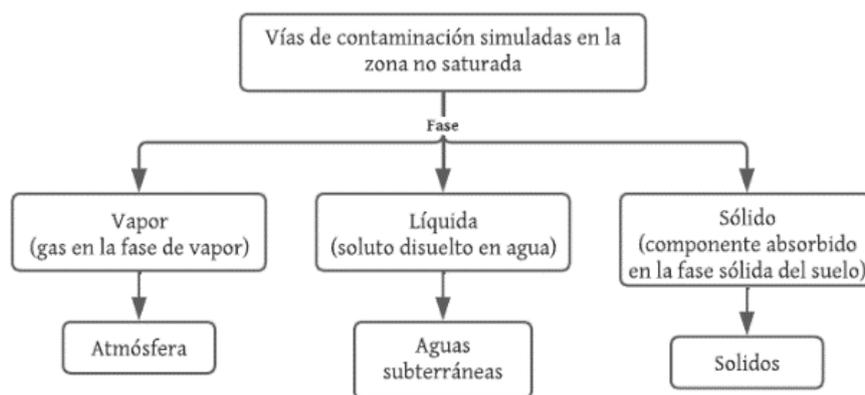


Ilustración 17. Proceso de transporte en tres fases en el modelo de VLEACH.

Fuente: Adaptado de (VLEACH, 1997)

4.1 Variables Consideradas

Para que el modelo funcione correctamente, es necesario ingresar una serie de parámetros de entrada que servirán como punto de partida para realizar los cálculos. En la ilustración 2 se presentan los datos de entrada en dos grupos.

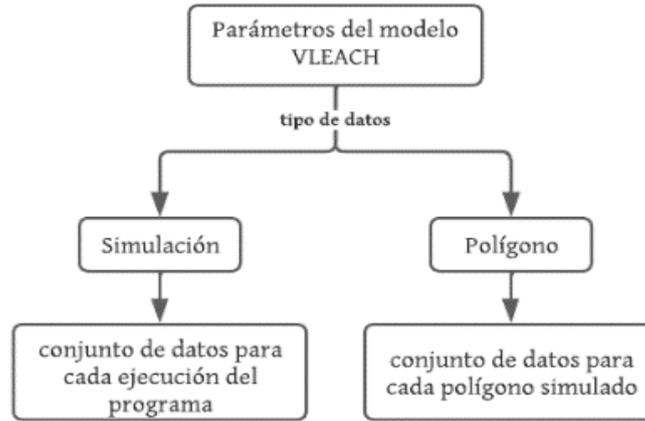


Ilustración 18. Parámetros de entrada en el modelo de VLEACH.

Fuente: Adaptado de (VLEACH, 1997)

En la ilustración 21 se muestra la interfaz de entrada de parámetros de una simulación además de los parámetros de entrada para cada polígono que representa el espacio de estudio, la descripción detallada de cada uno de ellos se muestra en la tabla 9 y 10 respectivamente.

VLEACH Model Parameters

Simulation Parameters

Title: Sample Problem - TCE contamination scenario.

Simulation Time	Time Step	Output Time Interval	Profile Time Interval
500	100	100	250
Years	Years	Years	Years

Chemical Parameters

Chemical: Reference Chemical Profiles

Chemical Name: Tetrachloroethylene (TCE)

Organic Carbon Distribution Coefficient	Henry's Law Constant	Water Solubility	Free Air Diffusion Coefficient
100	0.4	1100	0.7
mL	Kh	mg/L	m ² /day

Polygon

Polygon Selected: Polygon1, Polygon2

Number of Polygon(s): 2

[Add New Polygon](#)

[View Polygon](#)

[Delete Polygon](#)

Polygon Parameters

Polygon Title: Polygon1

Area of Polygon	Vertical Cell Dimension	Number Of Cells	Height of Polygon
1000	1	50	50
Square ft	ft	Cells	ft

Soil Parameters

Soil Type: Reference Soil Type Profiles

Soil Type Name: Sand

Dry Bulk Density	Effective Porosity	Volumetric Water Content	Soil Organic Carbon Content
1.6	0.4	0.3	0.005
g/cm ³	(n)	(Vc)	(foc)

Boundary Conditions

Recharge Rate	Concentration of Recharge Water	Upper Boundary Vapor Condition	Lower Boundary Vapor Condition
1	0	0	0
ft/year	mg/L	mg/L	mg/L

Output Options

Create Groundwater and Soil Contaminant Profile: Yes No

Soil Contaminant Profile Time (Years): 100

Initial Contaminant Concentrations

	Upper Cell	Lower Cell	Initial Concentration (ug/kg)
1	20	100	
21	30	50	
31	40	10	
41	50	0	

Ilustración 19. Datos de simulación (izq.) y datos de polígono (der.).

Fuente: (The United States Environmental Protection Agency, 1997)

Tabla 9. Datos de Simulación
Fuente: Adaptado de (VLEACH, 1997)

Dato	Descripción	Unidad
Título (Title)	nombre de la simulación	-
Número de polígonos (Number of polygons)	cantidad de polígonos utilizados para representar el entorno de estudio.	-
Paso de tiempo (Timestep)	intervalo de tiempo entre cada cálculo realizado como parte de una simulación.	años
Tiempo de simulación (Simulation Time)	duración total de la simulación.	años
Intervalo de tiempo de salida (Output Time Interval)	período de tiempo en el que se registran el balance de masa y el impacto en el acuífero en el archivo de salida.	años
Intervalo de tiempo del perfil de concentración (Profile Time Interval)	período de tiempo en el cual se muestra el perfil vertical de concentración en el archivo de salida.	años
Coefficiente de partición del carbono orgánico (Organic Carbon Distribution Coefficient) (Koc)	capacidad de un contaminante orgánico para experimentar un proceso de adsorción en el suelo.	ml/g
Constante de Henry (Henry's Constant) (KH)	explica la distribución entre las fases líquida y gaseosa del contaminante, y depende de la presión de vapor y la solubilidad del contaminante a una determinada temperatura.	adimensional
Solubilidad en agua (Water solubility)	solubilidad máxima en agua del contaminante.	ml/g
Coefficiente de difusión al aire libre (Free Air Diffusion Coefficient)	explica el transporte de contaminante causado por el movimiento browniano (movimiento aleatorio de los átomos en un medio fluido) en la fase gaseosa.	m ² /día

*Nota: Sobre los 4 últimos parámetros, VLEACH incluye una biblioteca con valores comunes para numerosos contaminantes.

Tabla 10. Datos del polígono
Fuente: Adaptado de (VLEACH, 1997)

Dato	Descripción	Unidad
Título (Title)	nombre del polígono	
Área (Area)	superficie de la planta del polígono y su sección transversal al flujo vertical.	pies ²
Dimensión vertical de la celda (Vertical Cell Dimension)	es la altura o dimensión vertical de cada celda que conforma el polígono.	pies
Conductividad hidráulica no saturada (Recharge Rate)	la velocidad del agua en la zona vadosa se evalúa mediante el análisis de la conductividad hidráulica del suelo, la cual no es constante en esta zona y aumenta a medida que el suelo retiene más agua. Este parámetro debe ser igual o inferior a la conductividad hidráulica, se deben realizar varias simulaciones para abarcar un amplio rango de valores, ya que en la realidad este parámetro experimenta cambios constantes.	pies/año
Densidad seca aparente (Dry Bulk Density)	proporción de masa seca de suelo en relación con el volumen total de suelo.	g/cm ³
Porosidad efectiva (Effective Porosity)	cantidad de espacio vacío en el suelo que puede ser ocupado por agua y está disponible para el flujo. Esta medida se limita a los espacios que son accesibles al agua.	adimensional
Contenido volumétrico de agua o humedad (Volumetric Water Content)	El valor no debe superar la capacidad de permeabilidad del terreno. Se deben realizar diversas pruebas que abarquen una amplia gama de valores, ya que este valor no se mantiene constante con el tiempo.	adimensional
Fracción de contenido orgánico (Soil Organic Carbon Content)	cantidad de carbono orgánico presente en el suelo, este parámetro influye en la capacidad de adsorción de contaminantes en la fase sólida.	-
Concentración del agua infiltrada (Concentration of Recharge Water)	concentración de contaminante del agua que recarga el sistema.	mg/L
Condición de contorno superior de vapor (Upper Boundary Condition for Vapor)	La concentración del contaminante en la atmósfera, justo arriba del suelo, queda definida por esta condición de límite. Si se asigna un valor negativo a este parámetro, el programa considerará que esta frontera no permite la difusión gaseosa.	mg/L
Condición de contorno inferior de vapor (Lower Boundary Vapor Condition for Vapor):	La concentración del contaminante en la interfase entre el acuífero y la zona no saturada está determinada por esta restricción de límites. Un valor negativo	-

Dato	Descripción	Unidad
	asignado al parámetro indica que la frontera inferior es impermeable a la difusión.	
Número de celdas (Cell Number)	divisiones en las que se discretiza el polígono.	-
Representación del perfil (Plot Variable)	sí está activa, permite la visualización del perfil de contaminación del suelo.	-
Tiempo de representación (Plot time)	momento específico en el que se representará el perfil de contaminación del suelo.	años
Concentración inicial de contaminante (Initial Contaminant Concentration)	concentración inicial de contaminante para cada una de las celdas que componen el polígono.	µg/kg

4.2 Planteamiento Matemático

VLEACH evalúa la cantidad de sustancias tóxicas presentes en cada una de las tres fases para luego llevar a cabo una simulación del transporte, considerando tanto el movimiento del fluido infiltrado como la difusión de la fase gaseosa, mediante la comparación de diferentes concentraciones. Después de llevar a cabo este proceso, se equilibra el balance de masa para cada polígono y en cada paso de tiempo independientemente. Al finalizar, se agrupan los resultados por polígono para determinar la cantidad de contaminantes que han afectado la zona no saturada, cuánto ha pasado al nivel freático y la cantidad que se ha evaporado y ha sido liberado a la atmósfera.

En la tabla 11 se muestran hipótesis que lleva a cabo el modelo para sus cálculos; el enfoque de VLEACH es ampliamente utilizado para llevar a cabo evaluaciones iniciales debido a que el modelo supone que la cantidad de información requerida para simular el transporte de contaminantes no sea significativa.

Tabla 11. Hipótesis en el modelo de VLEACH

Fuente: Adaptado de (VLEACH, 1997)

Hipótesis	Descripción
Isotermas lineales.	Representa la división en las tres etapas distintas.
La zona no saturada se considera estática en relación al movimiento del agua.	El nivel de humedad en toda la zona vadosa permanece constante a lo largo de la simulación, lo cual no suele ocurrir en condiciones reales. Se sugiere realizar múltiples simulaciones que abarquen diferentes niveles de humedad en el suelo a lo largo del tiempo que se desea simular.
Se ignora el fenómeno de la dispersión en la fase líquida.	Predomina la seguridad al predecir concentraciones disueltas más altas y tiempos de viaje más largos que los reales, lo que evita riesgos innecesarios.

Hipótesis	Descripción
El software no simula la manera en que el contaminante se produce o se descompone en su lugar de origen.	En el caso de sustancias contaminantes orgánicas, como los hidrocarburos, es común que sean sometidas a procesos de descomposición en la zona no saturada. Como resultado, esta teoría conduce a una estimación más cautelosa de la concentración del contaminante.
Las condiciones del suelo son homogéneas dentro de cada polígono.	La realidad no coincide con esta suposición, por lo que se sugiere hacer múltiples simulaciones que abarquen la gama de diferentes tipos de suelo que podrían estar presentes en el área a simular. A pesar de esto, las cantidades de contaminantes absorbidos en el suelo pueden cambiar a lo largo de las celdas de cada polígono.
El proceso de volatilización de la fase gaseosa es libre o restringido.	El programa establece que la volatilización del contaminante puede suceder sin restricciones o puede estar limitada en los límites del suelo y la atmósfera.
NAPLs (Non Aqueous Phase Liquids)	El software no considera la presencia de líquidos orgánicos no acuosos ni el flujo que resulte de una densidad variable.

VLEACH divide la masa de contaminante en tres fases: gaseosa, líquida y sólida. Además, la caracteriza a lo largo del espacio (z) y del tiempo (t), dando valores de C_l , C_s , C_g . En la tabla 2 se explican los cálculos y ecuaciones matemáticas que utiliza el modelo.

Tabla 12. Ecuaciones matemáticas en VLEACH

Fuente: Adaptado de (VLEACH, 1997)

Descripción	Ecuación
Toda la masa de contaminante está disuelta en la fase líquida. Esta suposición se realiza al asumir que el contaminante que ingresa al medio poroso debido a una fuga o accidente lo hace en estado líquido.	$C_l(z, 0) = M(z, 0) \frac{P_b}{\theta} \quad (77)$ <p>Dónde, $C_l(z, 0)$ = concentración inicial de contaminante en la fase líquida [g/ml] $M(z, 0)$ = es la masa inicial de contaminante por unidad de masa de suelo [gcont/gsuelo] θ = contenido volumétrico de agua o humedad [%] [Vagua/Vtotal] P_b = densidad aparente del suelo [g/ml] o [g/cm³].</p>

Descripción	Ecuación
<p>La concentración líquida se refiere a la cantidad de contaminante presente en la fase líquida. A medida que aumenta la humedad, una mayor proporción del suelo estará en fase líquida, lo que resultará en una menor concentración de contaminante en esta fase, ya que la masa (M) se divide entre una mayor cantidad de fase líquida.</p>	$M(z, 0) \frac{\rho_b}{\theta} = \frac{M_{cont} \frac{M_{sol}}{V_T}}{M_{sol} \frac{V_w}{V_T}} = \frac{M_{cont}}{V_w} \quad (78)$ $= C_l$ <p>Dónde, $\frac{\rho_b}{\theta}$ = representa la fracción del suelo que está en fase líquida.</p>
<p>Para obtener la evolución de la concentración en la fase líquida en función del tiempo y el espacio, se utiliza la ecuación de balance de masa para el flujo advectivo.</p>	$\left(\frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} + \frac{\partial F_z}{\partial z} \right) = -\phi_e \frac{\partial C}{\partial t} \quad (79)$
<p>Para el cálculo del valor Z en VLEACH, se realiza una adaptación específica para determinar la concentración en la fase líquida.</p>	$\frac{\partial F_z}{\partial z} = -\phi_e \frac{\partial C}{\partial t} \quad (80)$
<p>Ecuación del flujo másico en una dirección</p>	$F_z = v_z \phi_e = qC \quad (81)$
<p>Sustituyendo (7) en (6)</p>	$q \frac{\partial C}{\partial z} = -\phi_e \frac{\partial C}{\partial t} \quad (82)$ $\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{q}{\phi_e} \frac{\partial C}{\partial z} \quad (83)$
<p>En un suelo completamente saturado, todos los espacios porosos están ocupados por agua, lo que implica que la porosidad efectiva sería igual al contenido volumétrico de agua o humedad (proporción volumétrica del suelo que está compuesta de agua). Por lo tanto, en el contexto de VLEACH, se reemplaza el término "porosidad efectiva" con "contenido volumétrico de agua", ya que se está calculando la concentración de contaminante en la fase líquida, donde tiene más sentido utilizar el contenido volumétrico de agua.</p> <p>Se utilizan métodos de diferencias finitas a partir de la ecuación unidimensional en derivadas parciales que describe el fenómeno de la advección.</p>	$\frac{\partial C_l}{\partial t} = -\frac{q}{\theta} \frac{\partial C_l}{\partial z} \quad (84)$ <p>Dónde, la concentración en la fase líquida a lo largo del tiempo y el espacio parte de la ecuación de balance de masa para el flujo advectivo.</p>
<p>Con el fin de determinar el cambio en la concentración del contaminante en la fase gaseosa a lo largo del tiempo, VLEACH emplea la segunda ley de Fick, determinando así la concentración del contaminante en estado gaseoso al resolver</p>	$\frac{\partial C_g}{\partial t} = D^* \frac{\partial^2 C_g}{\partial z^2} \quad (85)$ <p>Dónde C_g = concentración de contaminante en la fase gaseosa [g/ml]</p>

Descripción	Ecuación
la ecuación unidimensional de difusión en derivadas parciales.	D^* = coeficiente de difusión efectiva del contaminante en fase gas solo en los poros llenos de aire [m ² /día]
La obtención del coeficiente de difusión efectiva es utilizada por el programa para caracterizar solo los huecos por los que puede producirse la difusión gaseosa.	$D^* = D_{air} \frac{(\phi - \theta)^{7/3}}{\phi^2} \quad (86)$ <p>Dónde D_{air} = coeficiente de difusión gaseosa al aire libre.</p>
	$D_e = D_{air} \frac{(\phi - \theta)^{10/3}}{\phi^2} \quad (87)$
	$D_e = (\phi - \theta)D^* \quad (88)$
No es posible resolver la ecuación directamente debido a la falta de información sobre la concentración en la fase sólida. Por lo tanto, VLEACH utiliza un conjunto de constantes para determinar los valores de MT (masa total de contaminante) y CS (concentración en la fase sólida).	$M_T(z, t) = [\theta C_l + (\phi - \theta)C_g + \rho_b C_s] \quad (89)$ <p>Dónde $M_T(z, t)$ = masa total de contaminante por unidad de volumen de suelo [g/pie³]</p>
El primer término de la ecuación proporciona una estimación de la masa de contaminante presente en la fase líquida para un determinado volumen de suelo.	$\theta C_l = \frac{V_w M_{cont}}{V_T V_w} = \frac{M_{cont}}{V_T} \quad (90)$ <p>Dónde θC_l = cantidad de contaminante en la fase líquida multiplicada por el contenido volumétrico de agua</p>
En el segundo término de la ecuación sigue una estructura similar a la fase líquida, se calcula el producto entre la concentración de contaminante en la fase gaseosa y la diferencia entre la porosidad y el contenido volumétrico de agua, que representa el volumen de espacios vacíos ocupados por aire. Esto proporciona una estimación de la masa de contaminante presente en la fase gaseosa para un determinado volumen de suelo.	$(\phi - \theta)C_g = \left(\frac{V_V}{V_T} - \frac{V_w}{V_T}\right) \frac{M_{cont}}{V_V - V_w} \quad (91)$ $= \frac{M_{cont}}{V_T}$ <p>Dónde $(\phi - \theta)C_g$ = considera la cantidad de masa de contaminante presente en la fase gaseosa</p>
La forma de calcular el tercer término difiere de la estructura utilizada para la fase líquida y la fase gaseosa. Se obtiene multiplicando la densidad seca aparente del suelo por la concentración de contaminante en la fase sólida, la cual se calcula como la masa de contaminante dividida por la masa de suelo.	$\rho_b C_s = \frac{M_{sólida}}{V_T} \frac{M_{cont}}{M_{sólida}} = \frac{M_{cont}}{V_T} \quad (92)$ <p>Dónde $\rho_b C_s$ = cantidad de masa de contaminante que se retiene en el suelo</p>
KH se emplea para establecer la relación entre la concentración de contaminante en	$K_H = \frac{C_g}{C_l} \quad (93)$

Descripción	Ecuación
la fase gaseosa y en la fase líquida. Cada compuesto o contaminante tiene su propia constante de Henry, que es única. El manual recoge una serie de valores recomendados.	Dónde K_H = constante de Henry expresados a dimensionalmente o en [atm m ³ /mol].
K _d se emplea para establecer la relación entre la concentración de contaminante en la fase sólida y en la fase líquida. La determinación de este coeficiente se basa en otras dos constantes relacionadas con el contaminante y el tipo de suelo. En el manual se proporcionan valores recomendados para estos coeficientes.	$K_d = \frac{C_s}{C_l} \quad (94)$ $K_d = K_{oc} f_{oc} \quad (95)$ <p>Dónde: K_d = coeficiente de distribución K_{oc} = coeficiente de partición carbono orgánico [ml/g] f_{oc} = fracción de contenido orgánico de un suelo.</p>
Es posible calcular las concentraciones en cada fase utilizando la masa total y las constantes correspondientes. Para lograr el equilibrio entre estas concentraciones, el programa utiliza un enfoque iterativo mediante diferencias finitas hasta alcanzar el resultado deseado.	$C_g(z, t) = \frac{K_H M_T(z, t)}{[\theta + (\phi - \theta)K_H + K_d \rho_b]} \quad (96)$ $C_l(z, t) = \frac{M_T(z, t)}{[\theta + (\phi - \theta)K_H + K_d \rho_b]} \quad (97)$ $C_s(z, t) = \frac{K_d M_T(z, t)}{[\theta + (\phi - \theta)K_H + K_d \rho_b]} \quad (98)$ <p>Dónde: C_g = concentración gaseosa [g/pie³] C_l = concentración líquida [g/pie³] C_s = concentración en estado sólido [gcont/gsuelo].</p>

4.3 Obtención de Resultados

El software brinda la opción de visualizar los resultados mediante gráficos o cifras. En cuanto a los gráficos, se pueden elegir entre una representación que muestra la propagación de la contaminación en las aguas subterráneas a lo largo del tiempo y otra que presenta un análisis en profundidad de la contaminación del suelo. El primer tipo de gráfico permite observar la evolución del impacto durante un período determinado, mientras que el segundo proporciona un análisis más detallado para momentos específicos de la simulación seleccionados por el usuario. Por otro lado, los resultados numéricos permiten examinar la cantidad de contaminantes en cada fase para intervalos específicos de tiempo y en cada celda. También se puede ver el cambio en la masa total de contaminantes en el suelo, causado por advección y difusión, en cada momento de la simulación.

5. CARACTERÍSTICAS DE LOS BTEX COMO CONTAMINANTES DEL SUELO Y LAS AGUAS SUBTERRANEAS

Los hidrocarburos son compuestos orgánicos que están compuestos exclusivamente por átomos de carbono e hidrógeno. Si se introduce cualquier otro átomo que no sea de estos dos elementos, el compuesto ya no puede considerarse un hidrocarburo.

En América Latina, al igual que en otras regiones, los hidrocarburos se clasifican en dos tipos principales en función de su estructura molecular: alifáticos y aromáticos. Los hidrocarburos alifáticos son aquellos que no contienen ningún anillo de benceno, mientras que los hidrocarburos aromáticos son aquellos que sí lo poseen.

Dentro de la categoría de los hidrocarburos alifáticos, se pueden identificar tres subtipos: alcanos, alquenos y alquinos. Los alcanos son hidrocarburos saturados que presentan enlaces simples entre los átomos de carbono. Los alquenos son hidrocarburos que contienen al menos un enlace doble entre los átomos de carbono, mientras que los alquinos son aquellos que tienen al menos un enlace triple.

Estas clasificaciones y subtipos son aplicables en todo el continente latinoamericano y sirven como base para comprender y estudiar los diferentes tipos de hidrocarburos presentes en la región.

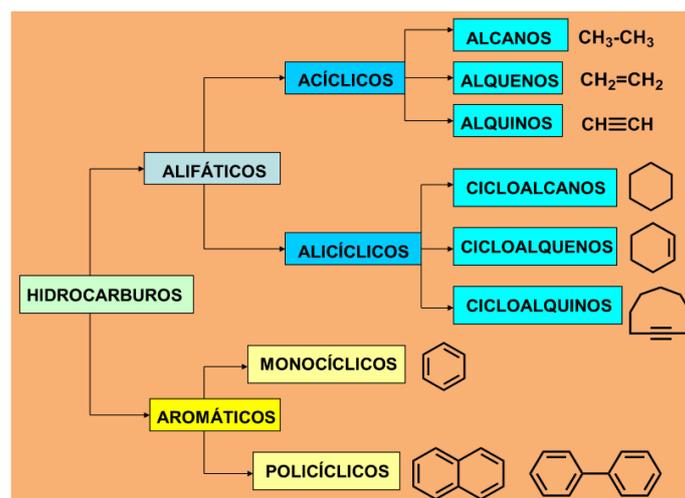


Ilustración 20. Tipos de hidrocarburos

Fuente: (Rodríguez, s.f.)

Los hidrocarburos se clasifican en diferentes grupos según su estructura y enlaces químicos. En Colombia, los alcanos o parafinas son hidrocarburos alifáticos que se caracterizan por tener enlaces simples entre los átomos de carbono. Estos compuestos son saturados, lo que significa que no tienen enlaces dobles o triples. Ejemplos comunes de alcanos incluyen el metano, etano, propano y butano. Además, los alcanos también pueden presentar una estructura cíclica, en cuyo caso se conocen como cicloalcanos o naftenos.

Por otro lado, los alquenos u olefinas son hidrocarburos alifáticos que poseen enlaces dobles entre los átomos de carbono. Estos enlaces dobles les otorgan propiedades distintivas y los hacen conocidos como hidrocarburos no saturados. Los alquenos son ampliamente utilizados en la industria química y tienen aplicaciones en la producción de plásticos, detergentes y combustibles.

En cuanto a los alquinos, son hidrocarburos alifáticos que contienen un enlace triple de carbono. Esta triple unión les confiere características únicas y los hace apropiados para usos industriales específicos, como en la fabricación de productos químicos y productos farmacéuticos.

Los hidrocarburos aromáticos se distinguen por poseer un anillo de benceno en su estructura molecular. El benceno es un ejemplo común de este tipo de hidrocarburo aromático, y también existen otros compuestos aromáticos como el tolueno y el xileno. Si un hidrocarburo aromático presenta dos o más anillos de benceno, se le denomina hidrocarburo aromático policíclico (PAH). La naftalina es un ejemplo de hidrocarburo aromático policíclico ampliamente conocido.

En resumen, los hidrocarburos se clasifican en alcanos, alquenos, alquinos e hidrocarburos aromáticos según la presencia de enlaces simples, dobles, triples o anillos de benceno en su estructura molecular. Estas clasificaciones son importantes en la industria química y tienen diversas aplicaciones en diferentes sectores.

5.1 Introducción a los BTEX

5.1.1 El funcionamiento de los BTEX

El funcionamiento en conjunto de los compuestos BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno y xileno) tiene una gran importancia en el estudio de problemas medioambientales asociados a la gasolina en Latinoamérica y Colombia. Esto se debe a que estos compuestos forman la mayor parte de la fracción soluble de la gasolina y, por ende, pueden ser las responsables de la contaminación por gasolina. Una de las formas más comunes de contaminación del BTEX se produce por la fuga de gasolina en tanques de almacenamiento enterrados en el suelo, principalmente en gasolineras.

Según estudios realizados en Colombia y Latinoamérica, se ha comprobado que el BTEX puede ser descompuesto de forma aeróbica, y a mayor concentración de oxígeno disuelto en el agua subterránea, más rápidamente se degradan estos compuestos. Además, en caso de contaminaciones continuas de larga duración, se forma una pluma de contaminación que se extiende principalmente en la dirección del flujo subterráneo. Dentro de esta pluma se han comprobado varias reacciones que producen la degradación del BTEX, comenzando por el oxígeno hasta que es consumido, luego el nitrato continúa la descomposición, seguido por el hierro férrico y, por último, el sulfato reacciona en la producción de la degradación del BTEX. Con todas estas reacciones, el nivel de hierro disuelto y de dióxido de carbono se incrementa en la pluma. Es importante tener en cuenta estos efectos para implementar medidas que protejan el bienestar de las personas y del medio ambiente.

Los BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno y xileno) son compuestos presentes en la gasolina y al ser esta una sustancia ampliamente utilizada, la contaminación por BTEX se ha convertido en un problema ambiental serio en Latinoamérica y Colombia. Además de la fuga de gasolina en tanques de almacenamiento como se mencionó anteriormente, la contaminación por BTEX también puede ser causada por derrames accidentales, fugas en tuberías de transporte o por evaporación de la gasolina en el aire.

La exposición a los compuestos BTEX ha sido relacionada con efectos en el estado de salud de los seres humanos como irritación de la piel y los ojos, náuseas, dolores de cabeza, problemas

neurológicos y daños al sistema respiratorio. En algunos casos, la exposición prolongada a elevadas concentraciones de BTEX se ha asociado con efectos más graves como leucemia y otros tipos de cáncer. Por eso, es importante tomar medidas adecuadas para prevenir o minimizar la exposición a estos compuestos especialmente en áreas urbanas y cerca de carreteras y gasolineras.

En cuanto a la eliminación de estos compuestos, existen diversas tecnologías para descontaminar la tierra y el agua subterránea contaminada por BTEX, como la biodegradación con microorganismos capaces de degradar estos compuestos o la extracción del suelo contaminado a través de la técnica de "air sparging" y "vapor extraction". Existen también tecnologías de remediación que combinan diferentes procesos para lograr una mayor eficacia en la eliminación del BTEX.

En conclusión, es evidente que los compuestos BTEX tienen un efecto significativo en las personas y en el ecosistema, por lo que es esencial tomar medidas para prevenir su emisión y minimizar su impacto una vez que han sido liberados al ambiente. Además, es importante seguir investigando y desarrollando tecnologías más eficientes para remediar la contaminación por BTEX y proteger a la población y al medio ambiente de estos compuestos tóxicos.

Los principales aspectos o más importantes relacionados con los BTEX son:

- Los BTEX son compuestos presentes en la gasolina y son contaminantes ambientales potentes.
- En Colombia, la contaminación por BTEX es un problema ambiental serio debido a la amplia utilización de la gasolina y debido a la presencia de numerosas fuentes de emisión de estos compuestos.
- La exposición a los compuestos BTEX ha sido relacionada con efectos en la salud humana como irritación de la piel y los ojos, náuseas, dolores de cabeza y otros problemas neurológicos, así como con efectos más graves como la leucemia y otros tipos de cáncer.
- La eliminación de estos compuestos es crucial para minimizar su impacto en el medio ambiente y en la salud pública. Existen diversas tecnologías para descontaminar la tierra y el agua subterránea contaminada por BTEX, como la biodegradación, la extracción del suelo contaminado mediante "air sparging" y "vapor extraction", y tecnologías de remediación que combinan diferentes procesos.
- Es importante seguir investigando y desarrollando tecnologías más eficientes para remediar la contaminación por BTEX y proteger a la población y al medio ambiente de estos compuestos tóxicos.
- A nivel mundial, la contaminación por BTEX también es un problema ambiental importante, especialmente en las áreas urbanas y cerca de carreteras y gasolineras.
- La inhalación de los vapores de gasolina es una de las principales vías de exposición a los compuestos BTEX en el aire.
- Para prevenir la exposición a estos compuestos, es esencial tomar medidas adecuadas para prevenir su emisión y minimizar su impacto una vez que han sido liberados al ambiente.

- La supervisión y el monitoreo de la contaminación por BTEX son esenciales para prevenir y tratar los efectos negativos para la salud pública y el medio ambiente.

5.1.2 Non Aqueous Phase Liquids (NAPLs)

Los Non-Aqueous Phase Liquids (NAPL) son sustancias orgánicas que no se mezclan completamente con el agua y pueden encontrarse en el suelo en la zona no saturada o debajo del nivel de agua subterránea. Estos compuestos pueden afectar la salud pública y el medio ambiente en Colombia. Dependiendo de su densidad, pueden tener diferentes efectos en los acuíferos: si son más livianos que el agua, se conocen como "light non aqueous phase liquids" (LNAPL) y si son más densos, se llaman "líquidos densos en fase no acuosa" (DNAPL). Debido a esto, se deben tomar medidas para evitar la liberación de estos compuestos en el medio ambiente y, si es necesario, tratar su presencia

Las propiedades físicas de los NAPL, como la densidad, viscosidad, saturación, ángulo de contacto y tensión superficial, junto con los coeficientes de almacenamiento, permeabilidad y porosidad del acuífero, influyen en su distribución en la zona vadosa y su capacidad de disolverse en el agua. Por lo tanto, el monitoreo constante de estas sustancias es crucial para garantizar la seguridad del medio ambiente.

Los LNAPL suelen estar presentes en productos derivados del petróleo, como el benceno, el tolueno, el etilbenceno y el xileno (comúnmente conocidos por el acrónimo BTEX), y pueden ser una fuente importante de contaminación en las capas freáticas subterráneas. Los DNAPL, por otro lado, son comunes en disolventes y pueden hundirse en el subsuelo y contaminar las capas acuíferas subterráneas.

Las soluciones para la gestión y mitigación de los NAPL varían según las características y la gravedad del problema. En Colombia, existen normativas específicas, como la Resolución 2254 de 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, que establecen los estándares para la emisión de contaminantes atmosféricos, incluyendo los NAPL, con el fin de proteger la salud pública y el medio ambiente. Las autoridades ambientales en Colombia también supervisan y sancionan aquellas actividades que emiten estos contaminantes.

zonas del suelo donde pueden presentarse distintas fases relacionadas con la presencia de NAPL:

En zona no saturada (vadosa):	aire, agua, NAPL y suelo
En zona saturada (zona que es fuente emisión):	agua, NAPL y suelo
En zona saturada (en la pluma):	agua y suelo

La presencia de compuestos orgánicos no acuosos que no se mezclan completamente con el agua (NAPL) en las aguas subterráneas puede producir contaminación. Si los NAPL se originan en la zona no saturada o vadosa, una parte puede evaporarse o filtrarse hacia la zona saturada, donde una fracción se disuelve y contamina el agua. En el caso de los LNAPL, la fracción no disuelta se queda en la intersección entre las zonas no saturada y saturada, mientras que los DNAPL se hunden hasta el fondo de la zona saturada. Es importante tomar medidas para prevenir la liberación de estos compuestos y tratar su presencia para proteger la salud pública y el ecosistema en Colombia.

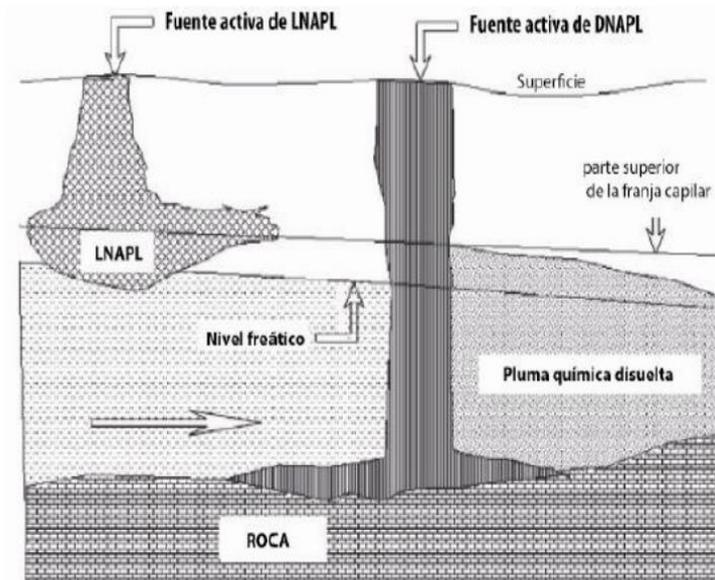


Ilustración 21. Representación de las plumas de contaminación según LNAPL o DNAPL.

Fuente:(Rosales, 2013)

5.1.3 Contaminantes orgánicos volátiles (COVs)

En Latinoamérica, los COV también son un problema ambiental y de salud pública importante. En muchos países, la emisión de estos compuestos es una causa importante de la contaminación del aire interior y exterior. Además, la exposición a los COV puede tener efectos perjudiciales para la salud, tales como irritación en los ojos y las vías respiratorias, dolores de cabeza, mareos, etc.

En Colombia, por ejemplo, la emisión de COVs es un problema especialmente grave en las grandes ciudades, donde la contaminación atmosférica es una preocupación importante. Según un informe del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, la gasolina es una de las principales fuentes de emisión de BTEX en el país. Además, la eliminación del BTEX en Colombia es un problema complejo debido a la presencia de contaminación del suelo y del agua en algunas zonas del país. Las actividades industriales, el uso de pesticidas y otros productos químicos, y el vertido de residuos tóxicos son algunas de las principales causas de la contaminación del suelo y del agua.

En la última década, se han llevado a cabo esfuerzos significativos para reducir la emisión de COVs en Colombia, incluyendo la promoción de tecnologías más eficaces y la implementación de regulaciones y normativas más estrictas. Sin embargo, todavía queda mucho por hacer para mitigar los efectos de la contaminación causada por estos compuestos peligrosos. En conclusión, los COV son un problema ambiental y de salud de gran importancia en Latinoamérica y en Colombia. Tomar medidas para reducir la emisión de estos compuestos, prevenir la exposición y desarrollar tecnologías más eficientes para la eliminación son necesarias para proteger la salud humana y el medio ambiente.

Tabla 13. Clasificación COV según volatilidad

Fuente: Adaptada de OMS

Compuestos orgánicos	Temperatura de ebullición (°C)	Ejemplos
Muy volátiles	<0 hasta 50-100	Propano, butano, cloruro de metilo
Volátiles	50-100 hasta 240-260	Formaldehído, tolueno, acetona, etanol, propanol
Semi-volátiles	240-260 hasta 380-400	Pesticidas

En Colombia, muchos COVs también tienen la capacidad de formar smog fotoquímico a nivel del suelo en las grandes ciudades. Este smog, producido por la reacción de los COVs con los compuestos que contienen oxígeno en la atmósfera en presencia de luz solar¹, puede contener elementos como el ozono y otros productos que son irritantes para el sistema respiratorio humano. Si bien este fenómeno puede observarse en cualquier lugar con altas concentraciones de COVs, las grandes ciudades de Colombia son especialmente propensas a la formación de smog debido a la alta emisión de estos compuestos por el tráfico vehicular y las actividades industriales. Como resultado, algunas ciudades colombianas a menudo tienen un cielo marrón y los habitantes pueden experimentar problemas en sus vías respiratorias debido a la exposición a estos contaminantes atmosféricos. Es importante tener en cuenta que el ozono que se encuentra en el smog fotoquímico no es lo mismo que el ozono presente en la estratosfera como capa protectora.



Ilustración 22. Ejemplo de smog fotoquímico Bogotá

Fuente: (Murillo, 2022)

En Latinoamérica, aunque no todos los compuestos orgánicos volátiles (COV) son perjudiciales, algunos al reaccionar provocan la formación de ozono en la atmósfera, lo que puede tener efectos dañinos sobre la salud y el medio ambiente. Otros, como el tetracloruro de vinilo, han sido identificados como sustancias que dañan la capa de ozono en la

estratosfera, lo que tiene un impacto significativo en el cambio climático. El Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente ha establecido una clasificación de los COV en América Latina según su peligrosidad, basándose en una normativa alemana para el control de la contaminación atmosférica, conocida como TA-Luft.

Es importante destacar que los efectos de los COV varían según el tipo de compuesto y el estado ambiental en el que se encuentran. En Latinoamérica, la combinación de altas temperaturas, altas concentraciones de COV y luz solar puede provocar la formación de smog fotoquímico, que puede tener repercusiones negativas para el bienestar de las personas, especialmente en las grandes ciudades con alta emisión de estos compuestos por el tráfico vehicular y las actividades industriales. Por ello, es fundamental implementar políticas y prácticas para reducir la emisión de estos compuestos y proteger la calidad del aire en la región.

Tabla 14. Clasificación COV según peligrosidad

Fuente: Adaptada de Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente)

Peligrosidad	COV
Muy peligrosos para la salud	Benceno, cloruro de vinilo
Muy dañinos para el medioambiente	Acetaldehído, halones, tetracloruro de carbono
Dañinos para el medioambiente	Acetona, etanol

Por tanto, los COV pueden provocar problemas medio ambientales en condiciones exteriores y problemas para la salud humana en ambientes interiores.

En Colombia, existen diversas normativas y regulaciones que buscan controlar la emisión de los compuestos orgánicos volátiles (COV) y otros agentes contaminantes del aire para proteger el ecosistema y la salud pública. Entre las normativas relevantes se incluyen:

- La Resolución 2254 de 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, que establece los estándares y criterios para la emisión de contaminantes atmosféricos en el territorio nacional, incluyendo los COV.
 - La Resolución 220 de 2014 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, que regula el registro y reporte de emisiones y transferencia de contaminantes al aire (RETC) de empresas y organizaciones en Colombia, y que incluye el control de emisiones de COV.
 - La Resolución 909 de 2008 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, que establece la regulación sobre la calidad del aire y las emisiones contaminantes en Colombia.

Estas normativas establecen medidas y protocolos específicos, tales como límites máximos permisibles de emisiones, monitoreo de la calidad del aire y la salud de los trabajadores, y requisitos para la obtención de permisos y autorizaciones para actividades que emitan COV. El cumplimiento de estas normativas es supervisado y sancionado por las autoridades ambientales competentes en Colombia.

5.1.4 Producción de Hidrocarburos en Procesos Industriales

Los hidrocarburos pueden causar la contaminación de suelos en actividades como el almacenamiento en tanques de gasolineras, campas de camiones y aeropuertos. Los productos que más comúnmente causan esta contaminación son la gasolina, el gasoil y el queroseno. A menudo, las fugas en los tanques provocan la liberación de hidrocarburos al terreno a cierta profundidad, y la detección de la contaminación no es posible hasta que estos contaminantes llegan a la superficie, como por ejemplo a un pozo de extracción de agua o a un río conectado al acuífero contaminado. Es importante tomar medidas preventivas para evitar la liberación de hidrocarburos y proteger la salud pública y el medio ambiente.

En caso de ocurrir un derrame de hidrocarburos en el suelo, es importante tomar medidas adecuadas para limpiar la zona y evitar que se propague la contaminación. La limpieza de los suelos contaminados con hidrocarburos puede ser un proceso largo y costoso, por lo que es mejor prevenir la contaminación en primer lugar al tomar medidas de prevención. Además, la regulación y el monitoreo por parte de las autoridades son fundamentales para garantizar que las empresas que trabajan con hidrocarburos cumplan con las normas ambientales y tomen las medidas necesarias para prevenir la contaminación del suelo y proteger la salud pública en la región.

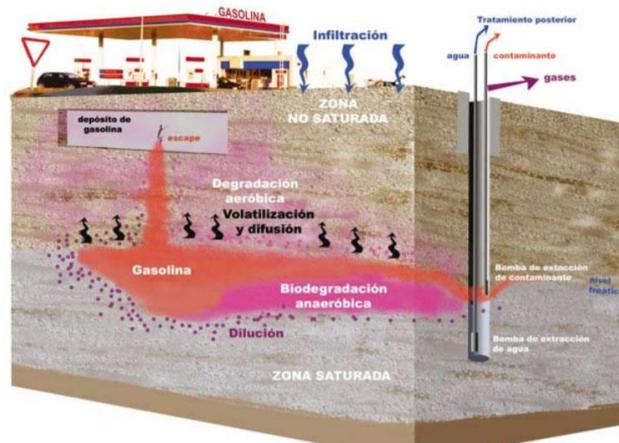


Ilustración 23. Esquema de contaminación por fuga en depósito de gasolina
Fuente: (Segovia, 2021)

El repostaje de vehículos, el reabastecimiento de los tanques o la manipulación de productos en refinerías puede provocar derrames accidentales que contaminen el suelo. Esta forma de contaminación, al ser detectada visualmente y ser una contaminación puntual en un determinado momento, puede ser atajada de inmediato y tener menos consecuencias.

Las instalaciones para el tratamiento de maderas también pueden producir contaminación del suelo por hidrocarburos. La función de estas instalaciones es la de tratar madera con productos químicos para protegerla de los posibles daños que puedan causar insectos u hongos. Generalmente, la madera tratada en estas instalaciones ha sido destinada para usos exteriores como bancos, cercados, etc. El tratamiento consiste en aplicarle la solución química caliente a la madera en una cámara de presión. Después se deja secar la madera en el exterior, lo que implica la contaminación por transporte de los productos químicos por el aire y su depósito en el suelo circundante. También, se genera un agua residual que se condensa en el proceso de tratamiento y en un enjuagado posterior. A lo largo de la historia, estas aguas residuales se vertían en un pozo sin revestimiento. Este hecho ha provocado la contaminación

de forma directa de los suelos. Los tratamientos más antiguos se realizaban con creosota, un compuesto que contiene hidrocarburos y que actualmente su uso está prohibido en la UE debido a que es cancerígeno. Actualmente se utiliza el arseniato de cobre cromado (CCA), que no contiene hidrocarburos.

El riesgo de contaminación puede aumentar debido a la propagación de los compuestos tóxicos por el aire o por el agua. Los productos que contienen hidrocarburos pueden ser transportados por el viento y depositados en la superficie de los suelos. Las labores agrícolas pueden mezclar estos depósitos superficiales en el suelo. El movimiento de las aguas subterráneas o superficiales afectan a la forma de dispersarse los contaminantes por el suelo.

La Agencia de Protección Ambiental (EPA) de Estados Unidos tiene en su sitio web una lista de residuos generados por cada sector industrial, incluyendo aquellos que producen hidrocarburos. Esta información es crucial para entender la magnitud de la contaminación del suelo causada por la industria. Además, la EPA ha establecido regulaciones para controlar y minimizar la contaminación del suelo por hidrocarburos en los diferentes sectores industriales, desde el petróleo y el gas hasta la energía y la fabricación de productos químicos. Esta regulación es importante para proteger el medio ambiente y la salud pública, pero también para fomentar la industria sostenible. Colombia y otros países de Latinoamérica pueden aprender de estas regulaciones y trabajar en conjunto con la EPA de Estados Unidos para implementar mejores prácticas y reducir la contaminación del suelo por hidrocarburos.

- Industria de la carpintería y recubrimiento de suelos de hogar
- Tratamiento de la madera
- Industria del mueble
- Pintura y revestimientos
- Industria química
- Industria petroquímica
- Instalaciones para repostar vehículos
- Reparación de automóviles
- Aeropuertos y bases militares
- Industrias que utilizan disolventes

5.2 Hidrocarburos BTEX

La presencia de los compuestos del BTEX en el medio ambiente es un tema de gran preocupación debido a los efectos negativos que pueden tener en la salud humana y en la calidad del aire y del agua. Estos compuestos se encuentran principalmente en la gasolina y otros derivados del petróleo, y su liberación al medio ambiente puede ocurrir durante la producción, refinación y distribución de los combustibles. Cada uno de los compuestos del BTEX tiene características y propiedades únicas que afectan su comportamiento en el medio ambiente y su impacto en la salud humana. Por ejemplo, el benceno es un carcinógeno conocido y el tolueno puede ser tóxico para el sistema nervioso. Por esta razón, es importante estudiar y controlar la liberación y el comportamiento de estos compuestos para prevenir la contaminación y proteger la salud humana y el medio ambiente en Latinoamérica y Colombia.

5.2.1 Benceno

El benceno es un hidrocarburo aromático presente en numerosos productos y procesos en Colombia y Latinoamérica, incluyendo la gasolina, la fabricación de explosivos, detergentes, medicamentos, plásticos, caucho y pinturas. Su molécula consiste en un anillo cerrado de seis átomos de carbono y seis átomos de hidrógeno, en el cual los enlaces entre los átomos están compuestos por electrones compartidos, lo que lo hace un compuesto aromático. Debido a que es comúnmente utilizado en la gasolina, puede encontrarse en las emisiones de la quema de carbón o petróleo, fugas de tanques de gasolineras y vapor expulsado por tubos de escape de vehículos.



Ilustración 24. Estructura química del benceno

Fuente: (sp.depositphotos.com, 2015)

No obstante, la exposición al benceno puede tener graves consecuencias para la salud humana. La inhalación de vapores que contienen benceno o el consumo de agua contaminada con este compuesto pueden provocar problemas de reproducción, reducir los glóbulos rojos en sangre, aumentar el riesgo de leucemia, causar daño fetal durante el embarazo y aumentar el riesgo de desarrollar cáncer.

Es importante tener en cuenta los riesgos asociados al benceno y controlar su liberación al medio ambiente para minimizar los efectos negativos en la salud de las personas y la calidad del aire y del agua. Cada vez se están adoptando más medidas regulatorias y controles en la producción, manejo y utilización del benceno en Latinoamérica y Colombia para evitar efectos adversos en la salud y el medio ambiente.

5.2.2 Tolueno

El tolueno es un compuesto químico orgánico utilizado en una amplia variedad de aplicaciones industriales, incluyendo la producción de pinturas, barnices, pegamentos y solventes. Su fórmula química es C_7H_8 , lo que significa que su molécula consiste en un anillo cerrado de seis átomos de carbono y un grupo metilo adicional, que le da una estructura similar al benceno. Por esta razón, el tolueno también se considera un hidrocarburo aromático.

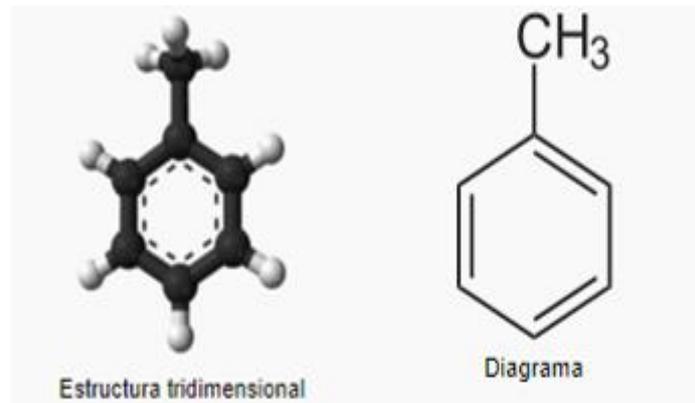


Ilustración 25. Estructura del tolueno

Fuente: (wikipedia.org, 2009)

La exposición al tolueno puede tener efectos negativos para el bienestar de las personas. La inhalación de los vapores que contienen tolueno puede provocar mareos, dolores de cabeza, fatiga y náuseas, mientras que la exposición continua puede causar problemas neurológicos, daño hepático y renal, y problemas respiratorios. También puede ser tóxico para los animales acuáticos y plantas, y su liberación al medio ambiente puede tener un efecto perjudicial en la condición del aire y del agua.

Es importante tener medidas regulatorias y controles en la producción, manejo y utilización del tolueno para evitar su impacto negativo en la salud y el medio ambiente. Por lo tanto, se debe tomar en cuenta los riesgos asociados al tolueno y controlar su liberación al medio ambiente para minimizar los efectos negativos en la salud de las personas y la calidad del aire y del agua. Cada vez se están adoptando más medidas regulatorias y controles en la producción, manejo y utilización del tolueno en la industria para prevenir su impacto negativo.

El tolueno es ampliamente utilizado en Latinoamérica y su uso principal es la mezcla con gasolina para mejorar su calificación por octanos. También se utiliza como disolvente en pinturas, limpiezas, producción de benceno y polímeros para la confección de botellas de refresco de plástico, nylon, etc. Sin embargo, la exposición al tolueno puede tener consecuencias graves para la salud. Las principales fuentes de exposición son los vehículos, el hogar y las industrias. Los efectos en la salud pueden incluir afecciones al sistema nervioso central, arritmias cardíacas, insomnio, náuseas, fatiga e irritación del sistema respiratorio. Es importante tomar medidas para controlar su liberación al medio ambiente y minimizar los efectos negativos en la salud de las personas y en la calidad del aire y del agua.

5.2.3 Etilbenceno

El etilbenceno es un hidrocarburo aromático que se utiliza ampliamente en Latinoamérica en distintas industrias, tales como en la producción de polímeros a través de la fabricación de estireno, o en la elaboración de productos disolventes, asfaltos, gasolinas y pesticidas. Su formulación química C_8H_{10} y peso molecular de 106.16 g/mol, junto con su olor similar al de la gasolina y su incoloración, lo definen.

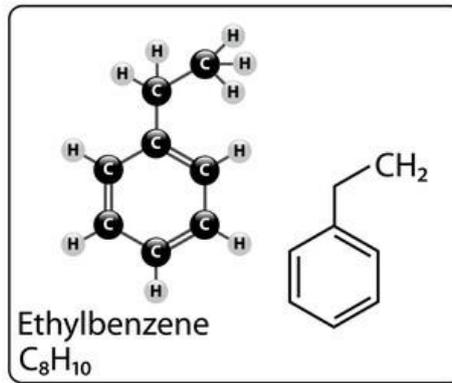


Ilustración 26. Estructura del Etilbenceno

Fuente: (shutterstock.com, s.f.)

En Colombia, el etilbenceno es un compuesto fundamental en la industria química, y su principal uso es la producción de estireno. A su vez, el estireno es utilizado en la fabricación de polímeros, como el poliestireno, que es ampliamente utilizado en la producción de envases, aislamientos térmicos y materiales para la construcción. En el caso de Colombia, se ha registrado su uso también en la fabricación de disolventes y solventes aromáticos para la industria petroquímica, como constituyente de asfaltos y gasolinas. Además, el etilbenceno se encuentra presente en pesticidas y puede estar presente en los humos producidos por el tabaco, lo que hace relevante considerar los efectos perjudiciales en la salud de las personas y su regulación en la industria a nivel nacional.

Sin embargo, la exposición al etilbenceno puede tener graves consecuencias para la salud humana en Latinoamérica. La Agencia de Protección del Medio Ambiente Estadounidense (EPA) ha medido que existen concentraciones significativas de etilbenceno en espacios cerrados, incluyendo las ciudades. Este compuesto está presente en diferentes productos de limpieza como disolvente y las formas peligrosas de exposición son principalmente por inhalación y exposición oral. Entre los efectos más comunes de la exposición al etilbenceno se encuentran la irritación de la garganta y los ojos, así como la constricción del pecho. Una exposición prolongada puede derivar en el desarrollo de enfermedades sanguíneas. Por lo tanto, es esencial tomar medidas para minimizar la exposición al etilbenceno y reducir su impacto negativo en la salud y el medio ambiente en Latinoamérica y en el mundo.

5.2.4 Xileno

Los xilenos son hidrocarburos aromáticos que se caracterizan por ser incoloros y tener una baja capacidad para disolverse en agua. Su formulación química C_8H_{10} con un peso molecular de 106.16 g/mol y presentan tres isómeros distintos: meta, orto y para xileno.



Ilustración 27. Estructura química de las variantes del xileno

Fuente: (AFESA Medio Ambiente, 2018)

En América Latina y en Colombia, el xileno es un compuesto químico que se utiliza en múltiples industrias, como la petroquímica, la textil, la farmacéutica y la de construcción. Los xilenos son obtenidos principalmente del petróleo y puede estar presente en algunos productos de uso cotidiano, como los combustibles de gasolina. Sin embargo, su presencia en el medio ambiente debido a emisiones de industrias y vehículos que utilizan combustibles fósiles puede ser perjudicial para la salud humana y el medio ambiente. La exposición a xilenos puede provocar efectos nocivos en la salud, como náuseas, vómitos, irritación del sistema respiratorio, pérdida del equilibrio, sequedad y descamación de la piel. En Colombia, se han establecido regulaciones y medidas para minimizar la emisión de compuestos tóxicos en el medio ambiente. Es importante continuar tomando medidas de protección contra las repercusiones negativas del xileno y otros compuestos químicos.

En cuanto a sus usos, los xilenos son utilizados como disolventes y para producir etilbenceno. En cuanto a su presencia en el medio ambiente, son encontrados en distintos medios como el aire, el suelo, el agua de lluvia, en sedimentos e incluso en organismos acuáticos. Las principales fuentes de emisión de xilenos son las industrias, vehículos que utilizan combustibles fósiles y vapores desprendidos de disolventes. Las vías más comunes de exposición son la inhalación por vía respiratoria o el contacto con la piel.

La exposición a los distintos isómeros de xileno puede provocar efectos muy parecidos en las personas. Entre ellos se encuentran náuseas, vómitos, irritación del sistema respiratorio, pérdida del equilibrio o sequedad y descamación de la piel, en exposiciones a corto plazo. La inhalación prolongada puede afectar al sistema nervioso central, respiratorio y cardiovascular. En la actualidad, los xilenos no están clasificados como cancerígenos. Es importante considerar y regular su impacto en la salud humana y en el medio ambiente.

5.2.5 Productos elaborados con hidrocarburos contaminantes del suelo.

En Colombia y Latinoamérica, existen numerosos productos derivados del petróleo que contienen hidrocarburos y pueden contaminar los suelos y el medio ambiente. Algunos ejemplos relevantes incluyen el petróleo crudo, la gasolina, el diésel y otros combustibles fósiles utilizados para el transporte y la generación de energía. También hay una amplia gama de productos químicos utilizados en la industria textil, la agricultura y otros sectores que pueden contribuir a la contaminación del suelo. Es prioritario tomar medidas para prevenir la liberación de estos compuestos y tratar su presencia para protección de las personas y el sistema ecológico. A continuación, se relacionarán los principales tenidos en cuenta en este estudio.

5.2.5.1 Gasolina

La gasolina es una mezcla de hidrocarburos líquidos inflamables y volátiles derivados del petróleo, ampliamente utilizada en Colombia y Latinoamérica como combustible para el transporte y también como disolvente para aceites y grasas. La composición de la gasolina varía dependiendo de la fuente del crudo, el proceso de refinamiento y las especificaciones necesarias del producto final. La gasolina contiene principalmente alcanos (parafinas), alquenos (olefinas) y aromáticos, con al menos 200 hidrocarburos de estos tipos.

La composición de la gasolina puede variar según su uso. En el caso de la gasolina destinada a la aviación, se debe soportar temperaturas más bajas y menor presión de vapor para evitar la

ebullición en los depósitos de los aviones. Además, su composición relativa de hidrocarburos aromáticos es aproximadamente del 10%, mientras que la gasolina para automóviles puede contener hasta un 40%.

El concepto de octanaje es importante para la gasolina, ya que indica su capacidad para evitar la detonación. A mayor octanaje, menor probabilidad de detonación durante la combustión, lo que resulta en una mayor eficiencia y menor daño al motor. Los hidrocarburos aromáticos suelen tener mayor octanaje. Es esencial tomar medidas adecuadas para prevenir la liberación de gasolina y otros productos derivados del petróleo en el medio ambiente con el fin de evitar la contaminación del suelo y proteger la salud pública.

5.2.5.2 Queroseno

El queroseno, otro producto derivado del petróleo comúnmente utilizado en Colombia y Latinoamérica como fuente de combustible, también tiene el potencial de contaminar el suelo si se maneja inadecuadamente. El queroseno se obtiene del proceso de refinación del petróleo crudo y se utiliza como combustible para aviones, linternas, estufas y otros equipos de calefacción, así como para la eliminación de piojos y otros parásitos.

Al igual que la gasolina, la composición del queroseno varía dependiendo de la fuente del crudo y del proceso de refinamiento. El queroseno se compone principalmente de hidrocarburos alifáticos y contiene alcanos, cicloalcanos y alquenos. La cantidad y la proporción de cada uno de estos hidrocarburos también varían según la fuente y el proceso de refinación.

El queroseno utilizado para aviación debe cumplir con especificaciones técnicas estrictas para garantizar la seguridad de los pasajeros y la eficiencia del motor, por lo que su composición es diferente a la del queroseno utilizado para equipos de calefacción.

5.2.5.3 Gasoil

El gasoil es un combustible ampliamente utilizado en Latinoamérica por su alto rendimiento en los motores de los vehículos. A menudo se utiliza en combinación con la gasolina para reducir costos y aumentar la eficiencia. El gasoil está compuesto principalmente por hidrocarburos alifáticos, incluyendo alcanos, cicloalcanos y, en menor proporción, hidrocarburos aromáticos. En Latinoamérica, el porcentaje de hidrocarburos aromáticos en el gasoil varía y es menor al 30% en la mayoría de los casos, lo que lo hace menos contaminante que otros combustibles. Es importante tomar medidas adecuadas para prevenir la liberación de gasoil en el medio ambiente y garantizar prácticas de manejo responsable para evitar la contaminación terrestre y preservar la salud de la población.

5.2.5.4 Fueloil

En Latinoamérica, el fueloil es uno de los combustibles más utilizados en muchos sectores, y está compuesto por una mezcla de hidrocarburos alifáticos como alcanos y cicloalcanos, y a su vez, hidrocarburos aromáticos, aunque estos últimos representan una cantidad menor en su composición. En Colombia, como en otras partes de la región, se utiliza principalmente para usos domésticos y de calefacción, aunque también se emplea en la industria. Actualmente, existen dos tipos principales de fueloil: destilado y residual, pero su uso se ha vuelto cada vez más específico, y se realiza una mezcla de ambos tipos según los usos particulares. Entre los

diferentes tipos de fueloil que se pueden encontrar en Colombia y Latinoamérica se encuentran el fuelóleo doméstico, el gasóleo y el fuelóleo pesado. Es importante tomar medidas adecuadas para prevenir la liberación de fuel oil en el medio ambiente y garantizar prácticas de manejo responsable para evitar la degradación del suelo y salvaguardar el bienestar a nivel social.

5.2.5.5 Lubricantes

En Colombia y en toda Latinoamérica, los lubricantes desempeñan un papel fundamental al ser aceites derivados del petróleo que se utilizan ampliamente para mejorar el rendimiento de la maquinaria y los vehículos. Estos lubricantes se caracterizan por su alto punto de ebullición, que generalmente supera los 400 °C, y por su viscosidad elevada. Su composición puede estar compuesta por hidrocarburos alifáticos, como alcanos y cicloalcanos, así como por hidrocarburos aromáticos. La utilización de lubricantes resulta esencial para asegurar un funcionamiento adecuado de los componentes mecánicos, al tiempo que se reduce el desgaste y la fricción entre las partes móviles. No obstante, es de vital importancia adoptar medidas apropiadas para evitar la liberación de lubricantes al medio ambiente y promover prácticas de manejo responsables que prevengan la contaminación del suelo y protejan la salud pública.

5.2.5.6 Ceras o parafinas

La parafina es una mezcla cristalina sólida de hidrocarburos alifáticos, principalmente alcanos, y es un material muy utilizado en Latinoamérica en diversas aplicaciones. Se caracteriza por ser insoluble en agua y ser un buen aislante eléctrico. En Colombia y otros países de la región, se utiliza comúnmente para el empaquetamiento de productos alimentarios, como impermeabilizante de numerosos productos y como aislante térmico. Su uso en la industria alimentaria es importante para garantizar la calidad y seguridad de los productos.

6. MARCO LEGAL

Esta sección del documento tiene como objetivo recopilar las normativas más estrictas aplicables a los suelos contaminados y la contaminación de agua subterránea, siguiendo un orden jerárquico que abarca desde el nivel general latinoamericano hasta el nivel específico en Colombia objeto de este estudio. La presentación de estas normativas se organizará en función de esta jerarquía, comenzando por las normativas de nivel latinoamericano, seguidas por las normativas de nivel nacional en Colombia y finalmente, las normativas a nivel municipal en Barranquilla. De esta manera, se busca ofrecer una visión exhaustiva y detallada de todas las normativas aplicables a los suelos contaminados en esta región de las Américas.

6.1 Marco Legal en América Latina

En América Latina, la contaminación de suelos por diversos contaminantes, incluyendo hidrocarburos, es un problema muy presente que ha llevado a la creación de normativas específicas en cada país. Estas normativas incluyen regulaciones tanto en el nivel nacional como en el nivel municipal, y su rigurosidad puede variar significativamente de un país a otro. En algunos países, como Argentina, Brasil, Chile, Colombia, México, Perú y Venezuela, se han implementado regulaciones ambientales estrictas para abordar este problema, mientras que en otros lugares se han adoptado enfoques menos rigurosos. En esta sección del documento recogeremos las normativas más estrictas aplicables a los suelos contaminados en América Latina. De esta manera, se espera que la información proporcionada sea de utilidad para los interesados en esta problemática en la región.

6.2 Marco Legal en Colombia

La normativa respecto a la contaminación de suelos y aguas subterráneas en Colombia incluye varias leyes y regulaciones. En primer lugar, la Ley 99 de 1993 establece la obligatoriedad de prevenir, controlar, y reducir la contaminación del ambiente y los recursos naturales renovables, entre ellos, suelos y aguas. Asimismo, el Decreto 2270 de 2012 adopta la norma técnica colombiana NTC 5375 (Calidad del agua - Evaluación y clasificación de la calidad de los cuerpos de agua superficiales y sistemas de drenaje urbano), que establece los límites máximos permisibles para diferentes contaminantes, incluyendo hidrocarburos, en cuerpos de agua superficiales y sistemas de drenaje urbano.

Por otra parte, en relación con la contaminación de suelos, el Decreto 1076 de 2015 adopta la resolución del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible por la cual se establecen los lineamientos técnicos para la prevención, control y gestión de la contaminación del suelo. Esta norma establece la necesidad de realizar evaluaciones del suelo y la implementación de medidas preventivas y correctivas para evitar o disminuir la contaminación.

6.2.1 Marco Legal Colombiana Aplicada a la Contaminación de Suelo

En Colombia, existen diversas leyes y regulaciones que establecen los lineamientos generales para la gestión ambiental y la prevención de la contaminación del suelo por hidrocarburos. Algunas de las normas relevantes son:

- La Constitución Política de Colombia de 1991 reconoce el derecho fundamental de las personas a gozar de un ambiente sano y establece la obligación del Estado y de los particulares de proteger los recursos naturales del país.
- La Ley 99 de 1993 crea el Ministerio del Medio Ambiente y establece normas para la gestión ambiental en Colombia.
- El Decreto 1594 de 1984 establece los procedimientos de control de la calidad del aire, agua y suelo, proporcionando pautas para la protección y prevención de la contaminación del suelo.
- La Resolución 910 de 2008 establece los estándares de calidad ambiental del suelo en Colombia. Esta normativa define los límites máximos permisibles de contaminantes en suelos según su uso, ya sea para fines industriales, agrícolas, urbanos o de protección ambiental. También establece los procedimientos para el monitoreo y la evaluación de la calidad del suelo, así como lineamientos para la remediación y recuperación de suelos contaminados.
- La Resolución 1582 de 2012 define criterios y procedimientos para la identificación, evaluación y seguimiento de sitios contaminados en el país.
- El Decreto 1076 de 2015, conocido como el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, es una normativa amplia que aborda diferentes aspectos de la gestión ambiental en Colombia. En su Capítulo 6, Título C, se refiere específicamente a la gestión y control de suelos contaminados. Este decreto establece los criterios técnicos y legales para la identificación, evaluación, prevención, control, remediación y seguimiento de suelos afectados por actividades contaminantes. Además, define los límites máximos permisibles de contaminantes en suelos y establece los procedimientos y responsabilidades de los actores involucrados en la gestión de suelos contaminados, como las autoridades ambientales y los responsables de actividades contaminantes.

6.2.2 Resolución 1582 de 2012:

La Resolución 1582 de 2012 define los criterios y procedimientos para la identificación, evaluación y seguimiento de sitios contaminados por actividades relacionadas con hidrocarburos. Esta normativa establece un marco para la gestión de suelos contaminados, con el objetivo de prevenir riesgos para la salud humana y el medio ambiente.

Entre los aspectos más destacados de esta resolución se encuentran:

Establecimiento de criterios para la identificación y clasificación de sitios contaminados.

Definición de lineamientos para la evaluación de la calidad del suelo y la determinación de los niveles de contaminación.

Especificación de los procedimientos para la elaboración de planes de manejo y remediación de suelos contaminados.

Establecimiento de requisitos para el seguimiento y monitoreo de la restauración de suelos afectados por hidrocarburos.

En resumen, la Resolución 1582 de 2012 proporciona una guía detallada para la gestión de suelos contaminados con hidrocarburos, abordando aspectos clave como la identificación, evaluación y remediación de estos sitios.

6.2.3 Decreto 1076 de 2015:

El Decreto 1076 de 2015, conocido como el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, aborda diversos aspectos de la gestión ambiental en Colombia, incluyendo la contaminación del suelo por hidrocarburos.

En relación con la contaminación de suelos con hidrocarburos, este decreto establece:

Criterios técnicos y legales para la identificación, evaluación, prevención, control, remediación y seguimiento de suelos afectados por actividades contaminantes relacionadas con hidrocarburos.

Se definen los Límites máximos permisibles de contaminantes en suelos, A continuación, para diferentes hidrocarburos en el suelo varían según la zona de aplicación y el uso del suelo.

Tabla 15. LMP de contaminantes en suelos, para diferentes hidrocarburos en el suelo según la zona de aplicación y el uso del suelo en Colombia

Límites máximos permisibles de contaminantes en suelos, para diferentes hidrocarburos en el suelo según la zona de aplicación y el uso del suelo en Colombia			
Hidrocarburo	Zona de aplicación	Uso del suelo	Valor límite (mg/kg)
Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH):	Zona Rural	Residencial:	10
		Industrial:	50
		Agropecuario:	5
	Zona Urbana	Residencial:	2
		Comercial:	5
		Industrial:	10
Zona de Bosques	Turístico-Recreativo:	2	
	Forestal-Comercial:	2	
Benceno:	Zona Rural	Residencial:	2
		Industrial:	10
		Agropecuario:	2
	Zona Urbana	Residencial:	2
		Comercial:	5
	Zona de Bosques	Industrial:	10
Turístico-Recreativo:		2	
Tolueno:	Zona Rural	Forestal-Comercial:	5
		Residencial:	20
		Industrial:	50
	Zona Urbana	Agropecuario:	20
		Residencial:	5
		Comercial:	15
		Industrial:	50

Límites máximos permisibles de contaminantes en suelos, para diferentes hidrocarburos en el suelo según la zona de aplicación y el uso del suelo en Colombia			
	Zona de Bosques	Turístico-Recreativo: Forestal-Comercial:	5 15
Etilbenceno:	Zona Rural	Residencial:	2
		Industrial: Agropecuario:	5 2
	Zona Urbana	Residencial: Comercial: Industrial:	2 5 10
	Zona de Bosques	Turístico-Recreativo: Forestal-Comercial:	2 5
Xileno:	Zona Rural	Residencial: Industrial: Agropecuario:	80 200 80
		Zona Urbana	Residencial: Comercial: Industrial:
	Zona de Bosques	Turístico-Recreativo: Forestal-Comercial:	20 50

Esta normativa tiene las Responsabilidades y procedimientos de los actores involucrados en la gestión de suelos contaminados, como las autoridades ambientales y los responsables de actividades contaminantes. El Decreto 1076 de 2015 también establece directrices para la gestión y control de suelos contaminados en general, no limitado exclusivamente a la contaminación por hidrocarburos. Esto incluye aspectos como la prevención, el manejo, el control y la remediación de suelos afectados por diversas actividades humanas.

En conclusión, tanto la Resolución 1582 de 2012 como el Decreto 1076 de 2015 son normativas importantes en Colombia para abordar la contaminación de suelos con hidrocarburos. Ambas regulaciones establecen los criterios, procedimientos y responsabilidades necesarios para la identificación, evaluación y remediación de suelos afectados, con el objetivo de prevenir riesgos ambientales y proteger la salud pública.

En lo que respecta a la contaminación del suelo por hidrocarburos, la normativa colombiana impone normas de control y medidas preventivas para evitar posibles daños ambientales y humanos. Dichas normas establecen, por ejemplo, límites máximos permisibles de contaminantes por zona y establecen criterios y procedimientos para la identificación, evaluación y seguimiento de sitios contaminados. Las autoridades ambientales correspondientes son las encargadas de supervisar el cumplimiento de la normativa y hacer cumplir las medidas necesarias en caso de identificar contaminación del suelo por hidrocarburos.

6.2.3.1 Marco Legal Colombiana Aplicada a la Contaminación de Aguas Subterráneas

En Colombia, la regulación y normativa aplicada para la contaminación de agua subterránea se encuentra establecida en la Resolución 631 de 2015, expedida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Esta normativa establece los lineamientos para el control de las sustancias contaminantes que llegan a los cuerpos de agua subterráneos, con el fin de garantizar la protección de este recurso para el presente y las futuras generaciones. La norma establece límites máximos permisibles para las descargas de aguas residuales y vertimientos, así como los estándares para el monitoreo de la calidad del agua subterránea.

6.2.4 Resolución 631 de 2015

La Resolución 631 de 2015 establece los lineamientos para el control de las sustancias contaminantes que llegan a los cuerpos de agua subterráneos¹, incluyendo las aguas subsuperficiales que puedan ser afectadas por vertimientos de aguas residuales. En cuanto a la contaminación del agua subterránea con hidrocarburos, los factores más relevantes de la Resolución 631 de 2015 son:

1. La definición de límites máximos permisibles para las descargas de aguas residuales y vertimientos.
2. La obligación de realizar un monitoreo periódico para evaluar la calidad del agua subterránea.
3. La prohibición de realizar vertimientos que contengan hidrocarburos sin un tratamiento previo que garantice el cumplimiento de los límites máximos permisibles.
4. La obligación de reportar cualquier incidente o derrame de hidrocarburos que pueda afectar la calidad del agua subterránea ante las autoridades ambientales competentes.

Los límites permisibles para la concentración de hidrocarburos específicos en el agua subterránea en Colombia, de acuerdo con la Resolución 631 de 2015, para los compuestos conocidos como BTEX:

Tabla 16. Límites permisibles de hidrocarburos específicos en el agua subterránea de Colombia

Límites permisibles para la concentración de hidrocarburos específicos en el agua subterránea en Colombia	
<i>Hidrocarburo</i>	<i>Valor límite (mg/L)</i>
Hidrocarburos totales:	10
Benceno:	0.005
Tolueno	1,0
Etilbenceno	0.7
Xileno	0.5

La Resolución 631 de 2015 es una disposición fundamental para el control de la contaminación por hidrocarburos en el agua subterránea en Colombia. Esta regulación establece medidas específicas para prevenir y controlar los efectos negativos de los hidrocarburos en la salud de la población y el medio ambiente. Además de establecer los límites permisibles para la concentración de hidrocarburos específicos, esta resolución también incluye medidas para la

gestión segura de estos compuestos en los procesos industriales y comerciales. La implementación efectiva de la Resolución 631 de 2015 requiere de la cooperación entre las autoridades, la industria y la sociedad en general para cumplir con las normas establecidas y fortalecer los esfuerzos para proteger el agua subterránea de la contaminación por hidrocarburos. La necesidad de garantizar la calidad de los recursos hídricos es fundamental para asegurar el bienestar de las generaciones presentes y futuras, por lo que es importante seguir trabajando en las acciones para prevenir y mitigar el deterioro en este sentido.

6.3 Marco Legal Municipal de Barraquilla

“La normativa aplicada para la contaminación de suelos y agua subterránea en Barraquilla se encuentra regulada por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible a través de la Resolución 631 de 2015”. Esta regulación busca establecer medidas preventivas y correctivas para la protección de los recursos naturales, especialmente aquellos que pueden verse afectados por la contaminación de hidrocarburos, compuestos químicos y otros contaminantes. Es importante tener en cuenta que, aunque la normativa aplicable a nivel nacional es la que prevalece, en muchas ocasiones los municipios y departamentos pueden establecer regulaciones locales para complementar estas regulaciones y ampliar la protección ambiental.

6.3.1 Marco Legal Aplicada en Barraquilla para la Contaminación de Suelo

La normativa que se aplica en la ciudad de Barraquilla en casos de contaminación de suelos incluye la Resolución 631 de 2015, emitida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, la cual establece medidas específicas para el control de la contaminación por hidrocarburos en el agua subterránea, así como también medidas para la gestión segura de estos compuestos en los procesos industriales y comerciales. Además, la ciudad de Barraquilla cuenta con una normativa especial, autorizada por el Concejo Distrital, llamada Acuerdo Distrital N 0010 de 2008, la cual establece normas para el mantenimiento, gestión y uso del suelo y el patrimonio natural en la ciudad, incluyendo medidas para prevenir la contaminación del suelo y la gestión adecuada de los residuos. En caso de que se presente contaminación, es importante que las autoridades ambientales locales sean notificadas para tomar las medidas necesarias, y que se cumpla con las disposiciones establecidas en la normativa aplicable.

Además de la Resolución 631 de 2015 y el Acuerdo Distrital N 0010 de 2008, existen también otras regulaciones importantes a nivel nacional y local que regulan la gestión de residuos peligrosos y la mitigación y control de la contaminación del suelo. Por ejemplo, el Decreto 4727 de 2005 establece las normas para la gestión integral de residuos peligrosos, incluyendo la identificación, clasificación, generación, transporte, tratamiento y disposición final de dichos residuos. Por otro lado, la Alcaldía de Barraquilla ha establecido planes y programas para la gestión y la conservación del suelo, como el Plan de Ordenamiento Territorial, que tiene como objetivo establecer las directrices para la gestión territorial y ambiental en el municipio. En su conjunto, estas disposiciones y planes establecen medidas integrales y rigurosas para prevenir y controlar la contaminación del suelo y los recursos naturales en la ciudad de Barraquilla.

6.3.2 Acuerdo Distrital N 0010 de 200 – Contaminación de Suelo

El Acuerdo Distrital N 0010 de 2008 de Barranquilla establece varias normas importantes para el cuidado del suelo y la prevención polución por hidrocarburos. Uno de los puntos claves se relaciona con la identificación, clasificación y control de los sitios contaminados por hidrocarburos, así como la definición de protocolos para la remediación y restauración del suelo en estas áreas. Adicionalmente, el acuerdo formula lineamientos para la gestión integral de los residuos peligrosos originados en la ciudad, incluyendo aquellos que se generan por la disposición de los hidrocarburos. El documento también establece medidas tendientes a la prevención de incidentes y accidentes relacionados con el manejo de productos químicos y sustancias peligrosas que puedan afectar al suelo y los recursos naturales. En resumen, el Acuerdo Distrital N 0010 de 2008 es una regulación importante y completa que establece lineamientos integrales para la protección del suelo y la prevención de la contaminación por hidrocarburos en Barranquilla.

6.3.3 Marco Legal Aplicada en Barranquilla Para Contaminación de Agua Subterránea.

Lo siento, parece que inadvertidamente proporcioné información sobre la contaminación del suelo en mi primera respuesta. Para responder a su pregunta sobre la normativa aplicable en casos de contaminación de agua subterránea en la ciudad de Barranquilla, se deben tener en cuenta la Resolución 631 de 2015 emitida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, y el Acuerdo Distrital N 0010 de 2008. Ambas disposiciones establecen medidas específicas para el control de la contaminación por hidrocarburos en el agua subterránea, y en el caso del Acuerdo Distrital N 0010 de 2008, también define protocolos para la identificación, clasificación y control de los sitios contaminados por hidrocarburos que afecten el suelo, agua y recursos naturales. Además de estas regulaciones, la ciudad de Barranquilla ha establecido también planes y programas para la protección del suelo y el mantenimiento del buen estado del agua y otros recursos naturales, como el Plan de Ordenamiento Territorial, que establece las directrices necesarias para la gestión territorial y ambiental en el municipio. En caso de detectar algún riesgo de contaminación de agua subterránea, es importante notificar a las autoridades ambientales locales para tomar las medidas necesarias y apoyarse en la normativa aplicable.

En el contexto de la normativa aplicable en la ciudad de Barranquilla, es importante destacar la importancia de la evaluación ambiental en la prevención y control de la contaminación. La Ley 21/2013 de evaluación ambiental establece regulaciones para la evaluación de los proyectos y actividades que puedan generar efectos significativos en el medio ambiente, incluyendo la contaminación del suelo y del agua. Además de la evaluación ambiental, existen otras medidas preventivas y correctivas que se pueden aplicar en casos del agua subterránea impura, como la implementación de tecnologías o prácticas de gestión que reduzcan el riesgo de contaminación y la investigación sobre los posibles efectos de la contaminación en la salud humana y el medio ambiente. Es importante destacar que estas medidas deben estar en línea con las regulaciones existentes, tanto a nivel nacional como local, y en caso de cualquier duda o necesidad de asesoramiento, es recomendable consultar a las autoridades ambientales y expertos en la materia. En conjunto, estas medidas pueden contribuir significativamente al cuidado del medio ambiente en la ciudad de Barranquilla.

6.3.4 Acuerdo Distrital N 0010 de 200 – Agua Subterránea

El Acuerdo Distrital N 0010 de 2008 de Barranquilla establece varias disposiciones importantes para el resguardo del agua subterránea y la protección contra el deterioro del suelo por hidrocarburos en la ciudad. En este sentido, el acuerdo establece lineamientos específicos para la identificación y control de los sitios que puedan estar contaminados con hidrocarburos, así como protocolos para la remediación y restauración del agua subterránea en estas áreas. Además, el documento establece medidas de prevención para la gestión de los residuos peligrosos que puedan afectar el agua subterránea y otros recursos naturales. Es importante destacar que el acuerdo no solo define medidas preventivas y correctivas, sino también medidas tendientes a la evaluación y monitoreo de la contaminación del agua subterránea, en línea con la Resolución 631 de 2015 emitida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. En conjunto, estas disposiciones y regulaciones pueden contribuir significativamente al mantenimiento y protección del agua subterránea en la ciudad de Barranquilla y a la prevención de posibles daños ambientales y a la salud pública. En caso de cualquier duda o necesidad de información adicional, es recomendable consultar a las autoridades ambientales locales o expertos en la materia para tomar las medidas necesarias.

6.4 Valores Límites aplicados en este estudio

6.4.1 Concentraciones Máximas en Suelo (Sólida)

Tabla 17. Máxima concentración en suelo de BTEX en el suelo

Fuente: (Decreto 1076 de 2015 Colombia)

Hidrocarburo	Concentración Máxima (mg/kg)
Benceno	10
Tolueno	50
Etilbenceno	10
Xileno	200

6.4.2 Concentraciones Máximas en el Agua (Líquido)

Tabla 18. Límites permisibles para la concentración de hidrocarburos específicos en el agua subterránea en Colombia

Fuente: (Resolución 631 de 2015)

Hidrocarburo	Valor límite (mg/L)
Benceno:	0.005
Tolueno	1,0
Etilbenceno	0.7
Xileno	0.5

7. CASO DE ESTUDIO

El caso de estudio consiste en la “Modelación de la contaminación del suelo por fugas de tanques subterráneos de combustible. Aplicación a una futura estación de servicio en Barranquilla (Colombia)”. El estudio que se presenta se enfoca en la modelación de la contaminación del suelo por fugas de tanques subterráneos de combustible, específicamente en una futura estación de servicio en Barranquilla, Atlántico, Colombia. Esto es importante debido a la relación directa que existe entre la contaminación de los recursos hídricos subterráneos y los posibles impactos negativos que esto puede tener en los ecosistemas y recursos hídricos del país. El trabajo evalúa la contaminación y el impacto en el suelo y las aguas subterráneas que pueden generarse por estas fugas, utilizando el modelo de lixiviación en zona no saturada VLEACH desarrollado por la USEPA. Es necesario llevar a cabo este tipo de estudios para establecer medidas preventivas para controlar la contaminación y evitar problemas de salud en las poblaciones que dependen de estos recursos. A menudo se pone el foco de atención en cómo afecta una posible fuga de contaminantes sobre la población, analizando la afección del medio que se encuentra en contacto con ambos extremos: el acuífero y el tramo de suelo que compone la zona no saturada. Sin embargo, una mejor caracterización de la zona no saturada permitiría conocer el tiempo que se dispone antes de que la contaminación llegue al acuífero y eliminar las fuentes de contaminación de manera efectiva mediante técnicas de remediación en la zona vadosa. Para realizar el análisis, se utilizará el programa VLEACH, que es un modelo sencillo y preciso que permite una buena aproximación a la realidad sin necesidad de una gran cantidad de datos y que cuenta con una amplia base de datos con los parámetros asociados a los contaminantes del BTEX.

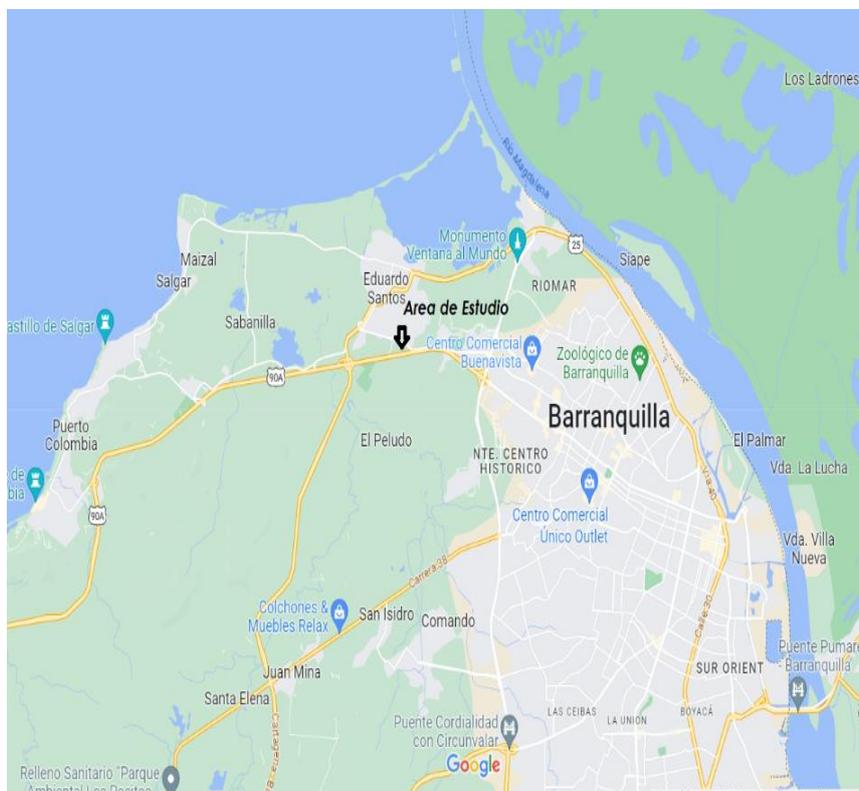


Ilustración 28. Ubicación general del área de estudio

Fuente: Google Maps

7.1 Localización del Proyecto

El objetivo del modelamiento es analizar la posible contaminación del suelo que podría ser causada por una fuga de hidrocarburos en una futura estación de servicio ubicada en la vía que conduce a Puerto Colombia, al noroeste del centro histórico de la ciudad de Barranquilla, dentro del área metropolitana de la ciudad. Las coordenadas de su ubicación son Latitud $11^{\circ} 1'3.69''N$ y Longitud $74^{\circ}51'44.09''O$. Este predio se ubica en la parte del Distrito de Barranquilla, por ende, una estación de servicio de combustible es clave para la movilidad y el abastecimiento de la parte norte de la ciudad. Este predio tiene un área de 6.269 m^2 , se ubica en la Carrera 51 B con calle 133, tiene una forma triangular, y hay un predio en estado de ruina que será objeto de demolición.

El área de estudio se encuentra, paralelo a la vía que conduce al municipio de puerto Colombia en el noroeste de la ciudad de barranquilla, a 2.1 kilómetros en línea recta de la ciénaga mallorquín, esta se encuentra en un área sin cuerpos de agua superficiales cercanos, cuenta con áreas residenciales y recreativas importantes alrededor, área que a su vez cuenta con alcantarillado subterráneo para el manejo de las aguas lluvias.

La ubicación de la estación de servicio proyectada permite realizar la modelación de contaminación de suelo por fuga de contaminantes de tanques subterráneas, su afección a la zona no saturada del suelo, y el tiempo de llegada a la zona saturada, de donde puede extraerse encontrarse con el nivel freático. La elevación media del terreno en la futura estación de estación de servicio se encuentra dentro de los 46 msnm.



Ilustración 29. Localización de la futura Estación de servicio – Noroeste ciudad de Barranquilla

Fuente: Google Earth Pro

Esto también permitiría evaluar las estrategias a optar para la degradación del combustible mediante métodos de biorremediación en caso de ocurrencia de fugas, si el medio permite mediante métodos aeróbicos o anaeróbicos.

7.2 Caracterización Hidrológica

El país se divide en 5 áreas hidrográficas. El sitio en estudio se encuentra dentro de la zona hidrográfica de Colombia Magdalena – Cauca (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), el cual está determinado por estos dos importantes cauces. Específicamente, la zona se ubica en la ribera de la desembocadura del río Magdalena, lo cual, permite conocer su ubicación específica, siendo esta la subzona hidrológica de los ríos directos al Magdalena en el Bajo Magdalena (Ilustración 31).

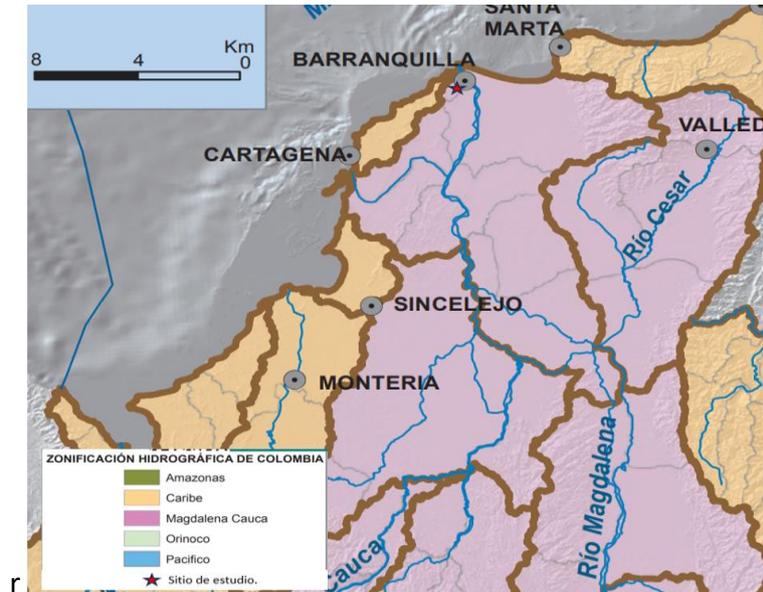


Ilustración 30. Ubicación hidrológica general del sitio de estudio

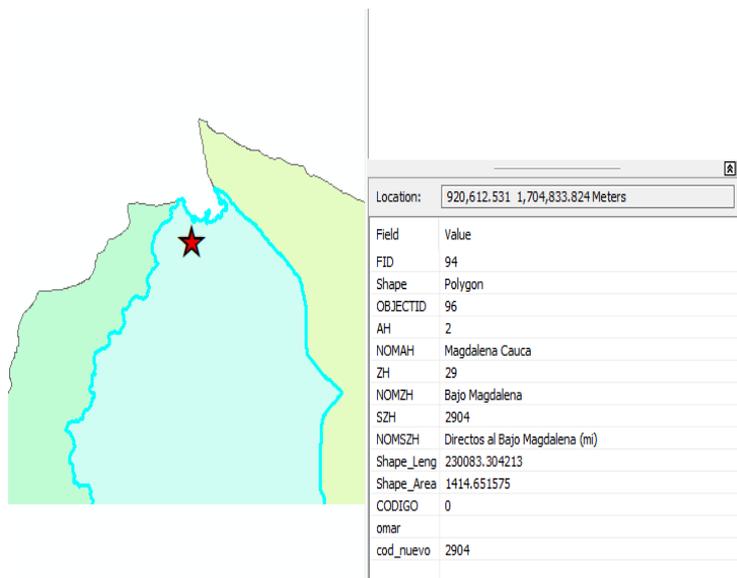


Ilustración 31. Ubicación hidrológica específica del sitio de estudio.

A partir de lo anterior, a partir del POMCA de la Cuenca hidrográfica Ciénaga de Mallorcaín y los Arroyos Grande y León⁸ se identificó que el sitio de estudio está localizado sobre la cuenca de la Ciénaga de Mallorcaín, la cual presenta una superficie aproximada de 300km² y se constituye por los arroyos Grande y León, conformada por una red de patrón dendrítico, de corrientes efímeras donde predominan tributarios de corta longitud y corrientes principales alargadas, específicamente se localiza sobre la subcuenca Plano Costero o Cuenca Baja la cual cuenta con un área de 38.07 km², una pendiente promedio de la cuenca de 7.3% y de 6.1 para el cauce principal con un tiempo de concentración de 105 minutos.

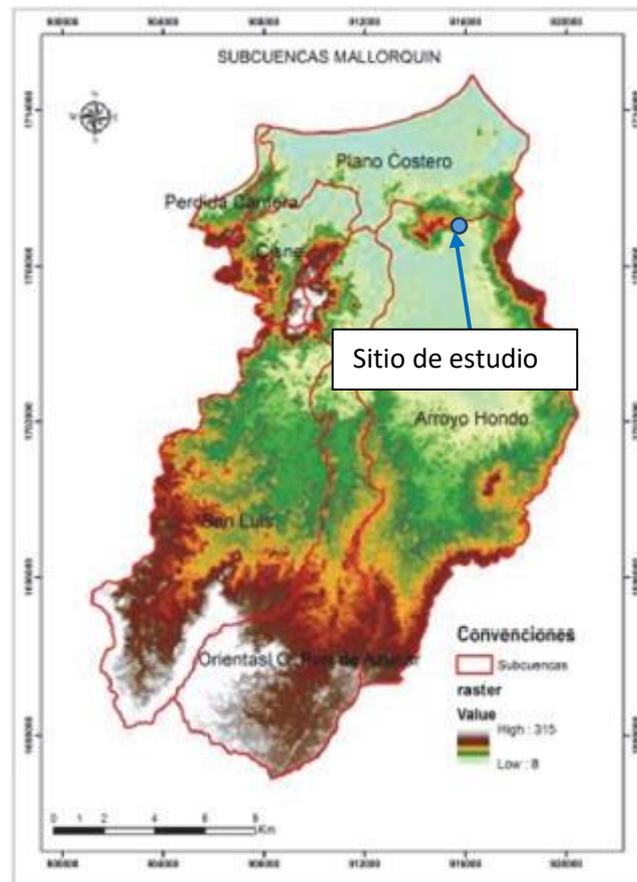


Ilustración 32. Subcuencas de la cuenca Mallorcaín

Según reporta el POMCA de la cuenca mallorquin en la subcuenca del Plano costero se presentan caudales máximos diarios del orden de 35 m³/s para un periodo de análisis entre 1980 y el 2011, una oferta hídrica de 3.66x10⁷ m³/año y un rendimiento máximo de escorrentía superficial de la cuenca correspondiente a 0.26 l/s-ha.

Ahora, específicamente en el sitio objeto de este estudio no se han identificado cruces con cuerpos de agua correspondientes a cauces naturales teniendo en cuenta también que corresponde a un sector completamente urbanizado y con sus respectivos sistemas de drenaje pluvial para los caudales generados por escorrentía como se observa en las siguientes imágenes:

⁸ Revisión de la zonificación, mejoramiento de escala (1:25.000) y el abordaje al tema de susceptibilidad de amenazas y vulnerabilidad, como avance en el ajuste al plan de ordenamiento de la cuenca hidrográfica ciénaga de mallorquin y los arroyos grande y león

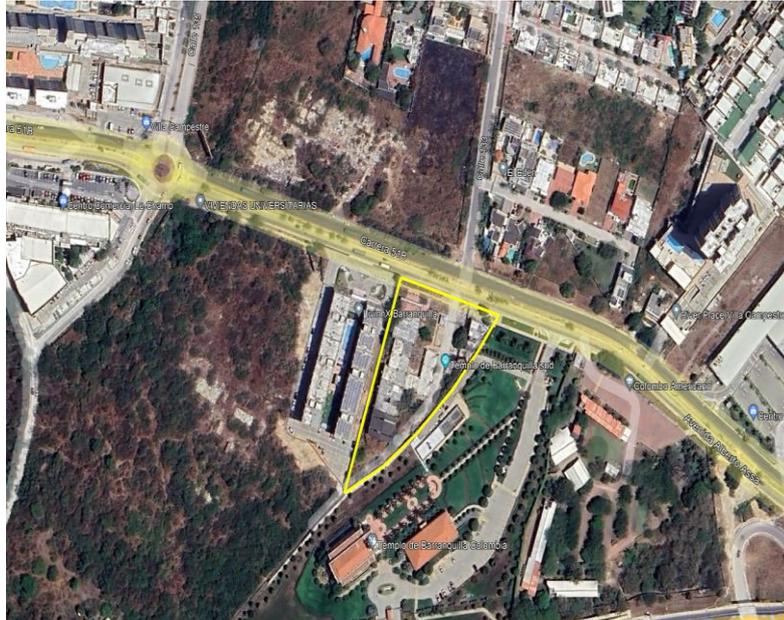


Ilustración 33. Vista en planta del sitio de intervención.



Ilustración 34. Estructuras de drenaje longitudinal aferentes al sitio de intervención

7.3 Hidrogeología Regional Y Local

En cuanto al comportamiento hidrogeológico de la zona, el IDEAM ordena el territorio en diferentes provincias hidrogeológicas, de acuerdo con las posibilidades de las rocas de almacenar y permitir el paso del agua (porosidad y permeabilidad) complementando la información geológica con el Atlas hidrogeológico de Colombia⁹. Para la zona de estudio, se especifica que se incluye en las provincias costeras ubicadas en Sinú – San Jacinto (PC1) y en el Valle del bajo Magdalena (PC2).

⁹ ZONIFICACIÓN Y CODIFICACIÓN DE UNIDADES HIDROGRÁFICAS E HIDROGEOLÓGICAS DE COLOMBIA, documento técnico, IDEAM

Vale la pena mencionar que las corrientes en inicio van en dirección de acuerdo con la inclinación de las capas y en segunda instancia controladas por un factor topográfico, pero en la zona de trabajo serían flujos superficiales por escorrentía e infiltración por aguas lluvias, el cual generaría una acumulación superficial, ya que de acuerdo con Barrera¹¹, esta unidad es un acuífero de regular calidad a acuitardo regional al ser rocas calcáreas.

7.4 Información para el modelamiento

En esta sección se recopilan los datos necesarios sobre la zona de estudio que se requieren para modelar una posible fuga de hidrocarburos que provenga de la estación de servicio.

7.4.1 Análisis Climatológico

Con el fin de conocer el comportamiento climatológico de la zona de estudio, inicialmente se considera la ubicación de las estaciones hidro climatológicas del IDEAM (Ilustración 37). En este caso, se ubican dos especificadas en la Tabla 20:

Tabla 20. Estaciones cercanas al sitio de estudio.

Código	Nombre	Categoría	Estado	Fecha Inst	Alt	Lat	Long	Corriente
29040450	BARRANQUILLA SEDE	Pluviométrica	Activa	1/11/2007	12.00	11.00	-74.80	Ranchería
29045180	LAS FLORES - AUT	Climática Principal	Susp.	30/08/2006	2.00	11.04	-74.82	Magdalena
29045120	FLORES LAS	Climática Principal	Activa	15/04/1971	8.00	11.04	-74.82	Ay Cerrejón

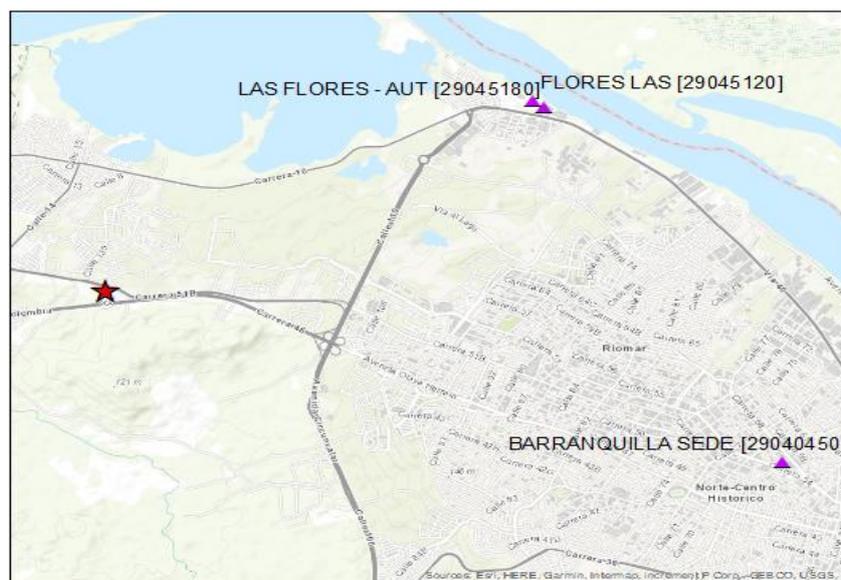


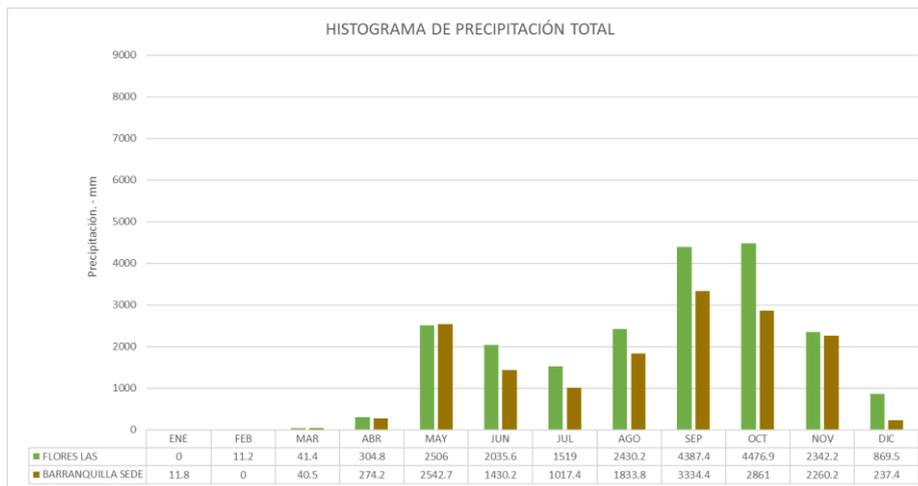
Ilustración 37. Estaciones hidroclimatológicas IDEAM.

¹¹ Fuente: (Barrera, 2001)

Estas estaciones brindan únicamente información referente a precipitación, por lo tanto, se considera un análisis a detalle.

7.4.1.1 Histograma de precipitación.

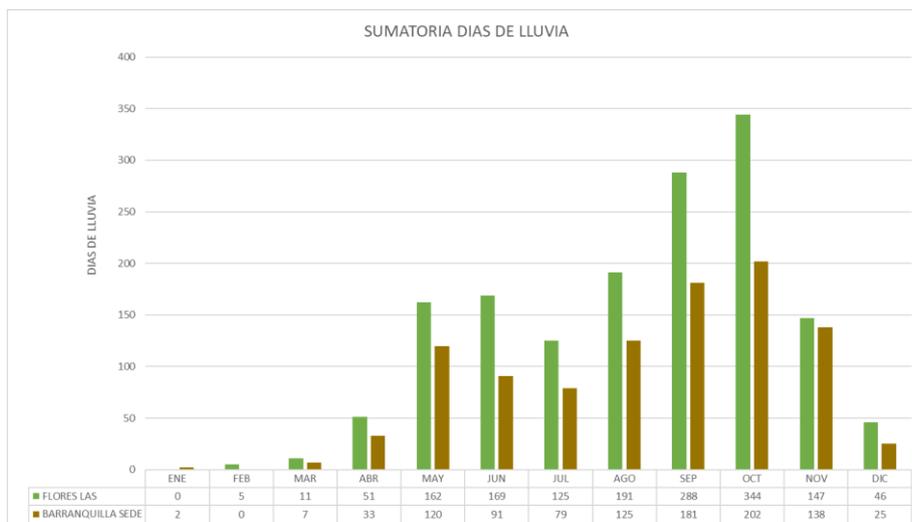
En la Gráfica 1, se presenta el histograma de precipitación total, en el cual se observa un régimen de lluvia bimodal; aun así, los picos altos y bajos se diferencian considerablemente, es decir, los picos altos se presentan en octubre y mayo. Así mismo, se observa que el primer trimestre del año es una temporada con precipitaciones muy bajas.



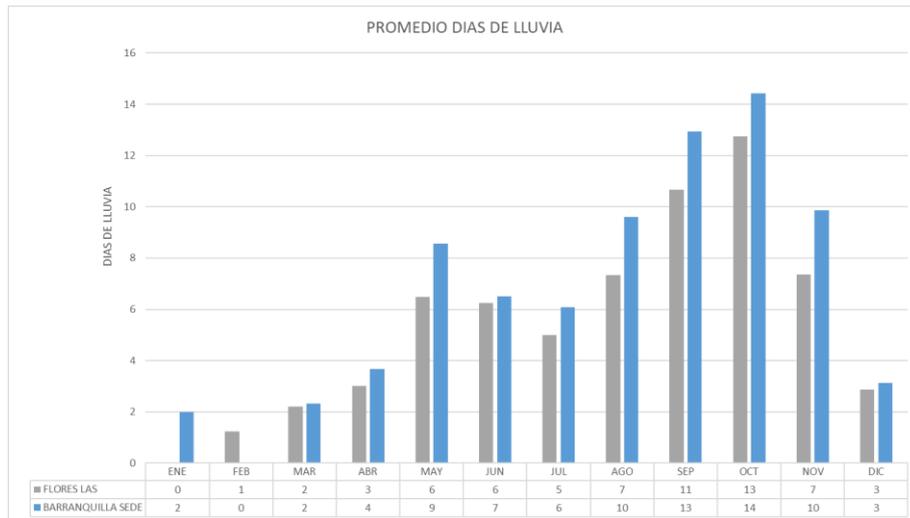
Gráfica 1. Histograma de precipitación.

7.4.1.2 Días de lluvia

El comportamiento de este parámetro en la Gráfica 1 respecto a la Gráfica 2 y Gráfica 3 son equiparables, de modo tal que, se confirma que, en el primer trimestre del año, la situación común es de bajas o nulas precipitaciones. Sin embargo, en los meses de agosto a octubre estas van teniendo un aumento considerable, de modo tal que se observa que el 50% del mes presenta fenómenos de precipitación.



Gráfica 2. Sumatoria días de lluvia.



Gráfica 3 Promedio días de lluvia.

Según se indica en el clima promedio en Barranquilla¹² la temporada de lluvias es nublada, mientras que la seca es ventosa y muy caliente, manejando temperaturas a lo largo del año generalmente entre 24 °C a 32°C, presentando picos de altas temperaturas entre mayo y septiembre y bajas los primeros meses del año.

7.4.2 Análisis Geológico y Litológico

A nivel local afloran las siguientes unidades siendo en cercanías de unos brazos por donde desemboca el Río Magdalena y el mar los que controlan el nivel de los depósitos recientes a nivel regional, pero también es una zona controlada por unidades sedimentarias de origen marino y continental.

Estos niveles de sedimentos recientes están discordantes con unidades del Pleistoceno – Mioceno, que afloran en zona urbana y en el sur del casco urbano de Barranquilla.

Para ello se toma de referencia lo explicado por el SGC (Barrera, 2001).

7.4.2.1 Evolución Geológica

Esta zona tiene una evolución desde plataformas marinas con presencia de arrecifes de coral, los cuales fueron afectados por procesos de aumento de la sedimentación por efecto del Río Magdalena durante los procesos exhumativos de la Cordillera Oriental en el Mioceno, además de la acreción del Cinturón de Sinú - San Jacinto, en un proceso netamente compresional – traslacional regional generado por la

Falla de Oca, durante la generación del Istmo de Panamá durante el Mioceno por efectos de esfuerzos tectónicos compresivos.

A nivel regional se evidencia que hay un ambiente predominantemente marino durante el paleógeno, siendo este evidente con niveles de arcillolitas grises y biomicritas. Pero durante el Mioceno se evidencian procesos de exhumación de la Cordillera Oriental, además de la incidencia de la deformación del Cinturón de Sinú – San Jacinto durante ese periodo

¹² <https://es.weatherspark.com/y/23451/Clima-promedio-en-Barranquilla-Colombia-durante-todo-el-a%C3%B1o>

generando superficies erosivas que pusieron en contacto niveles del Eoceno – Oligoceno con unidades del Plioceno – Pleistoceno.

Durante el Plioceno se dio un aumento de la sedimentación, evidenciado por los niveles de arenisca calcárea de la Formación La Popa, y aun así durante el Pleistoceno se dieron procesos de exhumación de la zona, colocando en contacto de forma discordante la Formación La Popa con los depósitos recientes generados por la dinámica del Río Magdalena y el Mar Caribe, por lo que se logra evidenciar en la parte norte del casco urbano de Barranquilla.

7.4.2.1.1 Unidades Litológicas Regional

En la zona afloran las siguientes unidades, de acuerdo con los mapas del SGC¹³ a escala regional:

Tabla 21. Unidades Litológicas a Nivel Regional

Fuente: (Barrera, 2001)

Unidad	Litología	Ambiente	Edad
Formación Los Perdices (Anderson, 1929)	Sublitorenicas de grano fino con intercalaciones menores de limolitas y arcillolitas grises.	Marino profundo con afectación de tormentas	Mioceno Inferior a Medio
Formación La Popa (Anderson, 1926)	Niveles grano crecientes de arcillas con clastos calcáreos, hasta calizas coralinas con alto contenido de arena.	Marino somero de plataforma arrecifal	Plioceno a Pleistoceno
Depósitos Fluvio – Lacustres	Niveles de arcillas y arenas de forma grano decreciente que varía de acuerdo con la cercanía a cursos de agua lóticos	Ríos anastomosados y lagunas	Holoceno
Depósitos Marinos de Playa	Niveles de arenas en sucesiones homogéneas y grano decrecientes de poca selección	Playa	Holoceno

Las cuales se distribuyen a nivel geográfico de la siguiente forma:

¹³ Fuente: (Barrera, 2001)

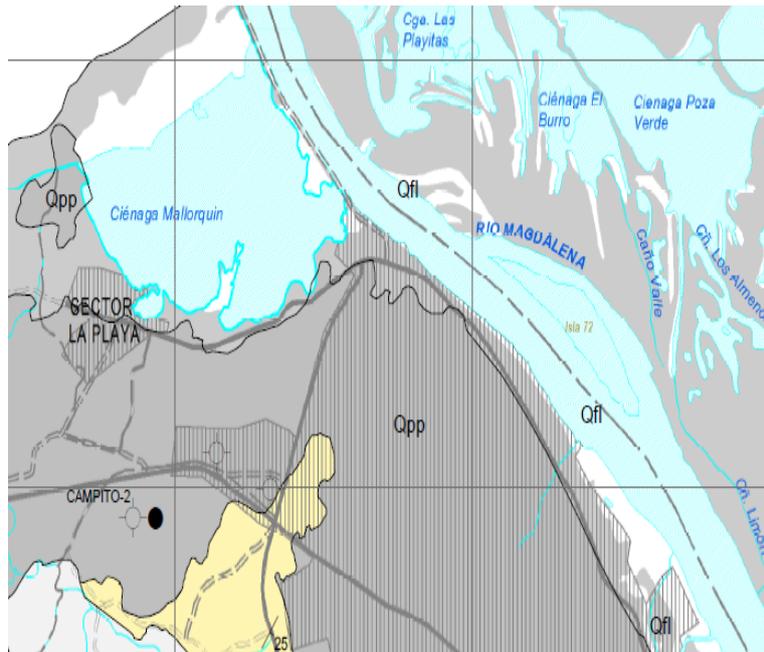


Ilustración 38. Mapa Geológico de la Plancha 16 - 17 Galerazamba - Barranquilla en la zona de trabajo.

Fuente: (Barrera, 2001)

7.4.2.1.2 Unidades Litológicas Locales

Este polígono se ubica sobre niveles de arenas calcáreas de la Formación La Popa, que mediante estudios realizados por Solgeotec (2022)¹⁴ se evidencia lo siguiente:

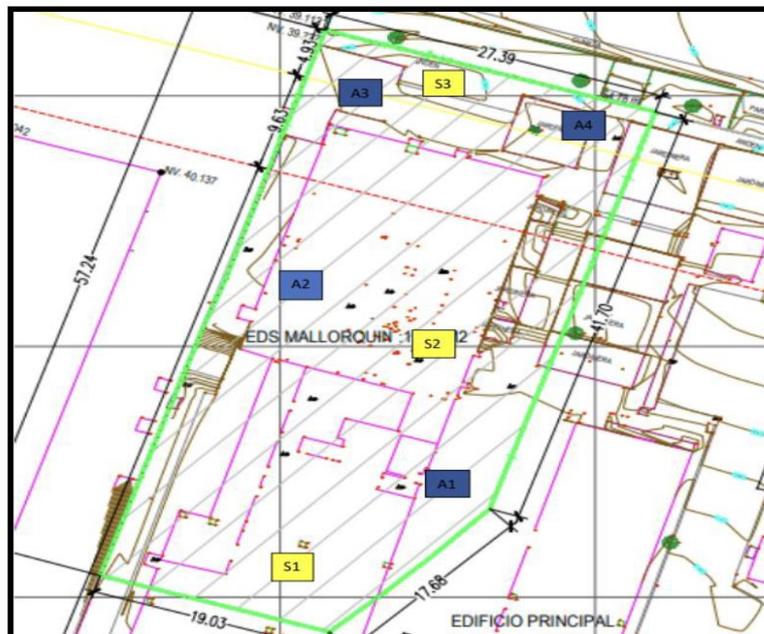


Ilustración 39. Ubicación de los Sondeos Realizados por Solgeotec.

Fuente: (Baez, 2022)

¹⁴ Fuente: (Baez, 2022)

En donde se evidencian niveles homogéneos de arenas limosas calcáreas, derivadas de la degradación de niveles de areniscas calcáreas de la Formación La Popa, como se ve en la siguiente columna generalizada a partir de los sondeos geotécnicos.

PROFUNDIDAD		CLASIFICACION S.U.C.S	DESCRIPCION
De:	Hasta:		
0,00	1,00	RSM	RELLENO DE ARENA LIMOSA Y MEDANO
1,00	2,00	SM	ARENA LIMOSA (SM) Y MEDANO COLOR MARRÓN
2,00	3,00	SM	ARENA LIMOSA (SM) Y MEDANO COLOR MARRÓN
3,00	4,00	SM	ARENA LIMOSA (SM) Y MEDANO COLOR MARRÓN
4,00	5,00	SM	ARENA LIMOSA (SM) Y MEDANO COLOR MARRÓN
5,00	6,00	SM	ARENA LIMOSA (SM) Y MEDANO COLOR MARRÓN

Ilustración 40. Columna generalizada de los 3 sondeos realizados.

Fuente: (Baez, 2022)

Siendo a nivel superficial una unidad con una alta transmisividad pero que se va reduciendo a medida que profundiza o cuando se va encontrando la unidad en roca fresca.

7.4.3 Niveles Freáticos

Con base a información del SGC¹⁵, se evidencian que los niveles freáticos regionales reportados se ubican a la siguiente profundidad:

Profundidad techo (m)	Espesor (m)	Resistividad (ohm-m)	Correlación Geohidrológica
0	4,6	580	Calizas Arrecifales del Popa; no saturada (T1).
4,6	9,4	110	Calizas Arrecifales del Popa margosa o saturada (T1).
14	-	1,5	Arcillolitas de Sibarco (T7)

Ilustración 41. Perfil eléctrico Vertical - Sector Barranquilla – Salgar (Perfil 1).

Fuente: (Diaz, y otros, 1984)

¹⁵ Fuente: (Diaz, y otros, 1984)

Profundidad techo (m)	Espesor (m)	Resistividad (ohm-m)	Correlación Geohidrológica
0	1,5	95	Calizas Arrecifales del Popa no saturada (T1)
1,5	3,5	23	Calizas Arrecifales del Popa, margosa o con aludes arcillosos (T1)
5,0	18	90	Calizas Arrecifales del Popa (T1).
23	277	13	Arenisca no identificada saturada con agua posiblemente aceptable.
300	-	2	Arcilloлитas de Sibarco (T7).

Ilustración 42. Perfil Eléctrico Vertical - Sector Barranquilla – Salgar (Perfil 1).
Fuente: (Diaz, y otros, 1984)

Teniendo en cuenta los estudios locales realizados, por la época del año, no se reporta nivel freático a la profundidad de estudio, por ende, se recurre a los estudios regionales.

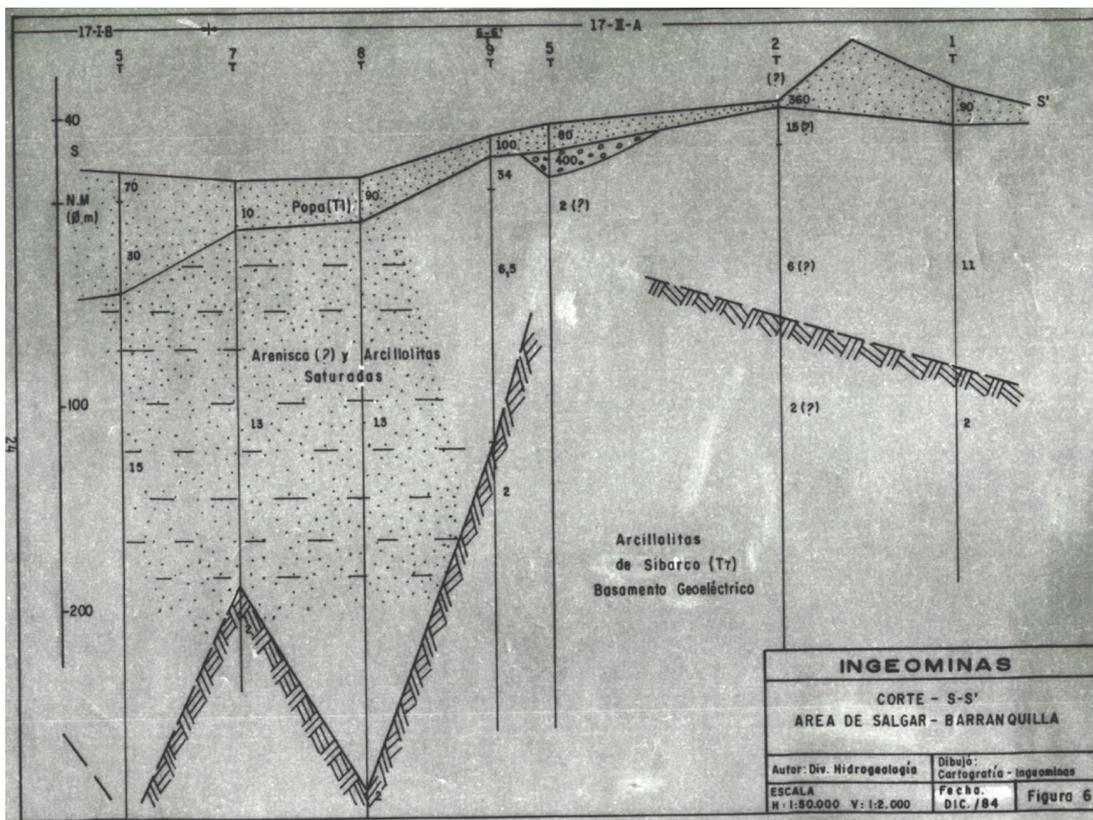


Ilustración 43. Perfil geológico obtenido de los sondeos.
Fuente: (Diaz, y otros, 1984)

Los niveles freáticos a nivel local se reportan a 4.5 m en la zona sur y de 23 m en la zona cercana al mar, por lo que se puede inferir en un estimado de 10 m de profundidad para evaluaciones teóricas, con base a la información encontrada y aplicable al área de trabajo, con base a la diferencia de resistividad en los valores de referencia de calizas que ronda sobre los 500 Ohm/m.

7.4.4 Litología y Nivel Freático para Modelamiento

Con base a la información de los sondeos locales e información secundaria de tipo regional se puede evidenciar lo siguiente tanto en estratigrafía como en nivel freático, el cual sirve por la escala para todo el polígono de análisis, y el flujo de agua hacia el norte.

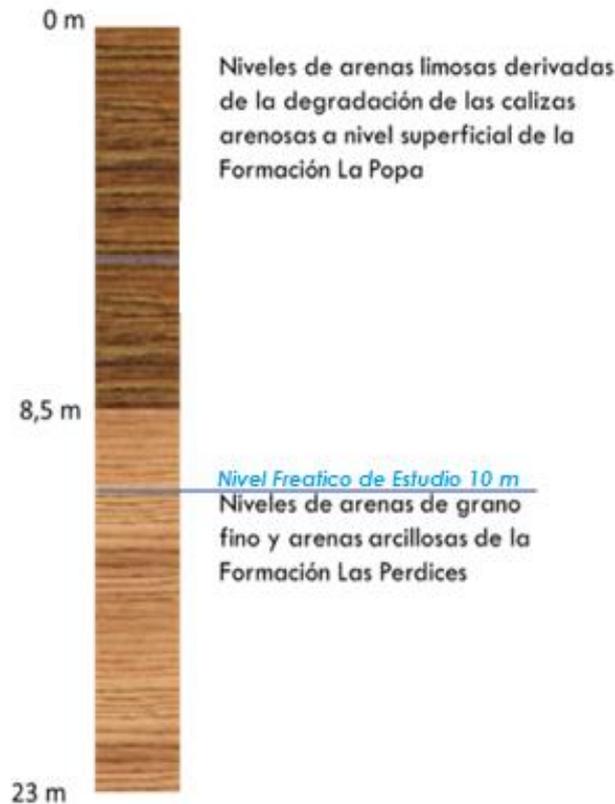


Ilustración 44. Perfil estratigráfico de la zona de estudio.

Fuente: Interpretación propia

Vale la pena mencionar que el nivel freático a nivel local tiene variaciones de acuerdo con la época del año y aspectos de factor antrópico que afecten la configuración de este acuífero. Para ello se recurre a formular un perfil N – S teniendo en cuenta que va en paralelo a la dirección de los flujos de aguas subterráneas por infiltración y escorrentía, que son los eventos principales en la zona.

Para efectos de análisis se hace en niveles homogéneos dada la poca variación litológica de acuerdo con la información analizada.

7.4.5 Estación de Servicio

La regulación ambiental en Colombia establece la necesidad de garantizar la protección del suelo y agua subterránea en estaciones de servicio y otros sitios donde se manipulan y almacenan hidrocarburos. La estación de servicio que será evaluada en Barranquilla en cuanto a los riesgos de contaminación ambiental cumple con esta normativa y estará equipada con una losa de hormigón que impermeabiliza el subsuelo y previene la contaminación de la capa freática. Además, la estación de servicio incluirá un lavadero de coches como instalación auxiliar.

Los combustibles que se venderán en la estación de servicio se almacenarán en tanques enterrados en el suelo, uno de los cuales será de acero y se utilizará para almacenar gasolina, hidrocarburo que será evaluado para identificar los riesgos ambientales que pueda implicar su manipulación y almacenamiento. Es importante destacar que en Colombia existen regulaciones específicas para la evaluación y control de los riesgos ambientales relacionados con los hidrocarburos, incluyendo la identificación y seguimiento de posibles migraciones de los contaminantes en el subsuelo y la evaluación de los posibles impactos ambientales y en la salud pública.

La selección del tanque se realiza teniendo en cuenta *“La norma técnica colombiana NTC 3853 establece los requisitos técnicos y de seguridad para tanques de almacenamiento de combustible destinados a la venta al público en general”*, y también establece requisitos técnicos importantes para los tanques subterráneos de combustibles. Algunos de los puntos clave a destacar de la norma NTC 3853 respecto a los tanques subterráneos para combustibles son:

- Establece el tamaño mínimo y máximo para los tanques subterráneos.
- Especifica las características importantes de los materiales necesarios para la construcción del tanque, incluyendo el espesor mínimo del material y la resistencia al impacto y al agrietamiento.
- Establece los requisitos técnicos para la instalación y operación de los tanques subterráneos, incluyendo la necesidad de una adecuada ventilación y drenaje.
- Especifica los requisitos para la inspección y mantenimiento regular de los tanques subterráneos para garantizar la seguridad y el buen funcionamiento.
- Destaca la importancia de contar con una adecuada gestión ambiental y seguridad en el almacenamiento de combustibles.

La capacidad de almacenamiento del tanque será de 8153 galones o 30862 litros, El volumen de almacenamiento útil del tanque será de 30.000 litros. El tanque seleccionado será un Tanque para Almacenamiento de Combustibles Doble Pared en Acero y Fibra de Vidrio de la empresa Syner Tech SAS, de acuerdo con su diseño será de forma cilíndrica, con un diámetro de 2,4 metros y un largo de 7,925 metros, su peso es de 2400 kg.

Por tratarse de un tanque de doble pared contara con un sistema de monitoreo y protección por capas, evitando derrames de líquidos peligrosos, que busca proteger y evitar generar impactos al medio ambiente en caso de fuga.



Ilustración 45. Tanques Doble Pared

Fuente: Sinertech S.A.S

Ø 2.4 METROS HASTA 19882
GAL

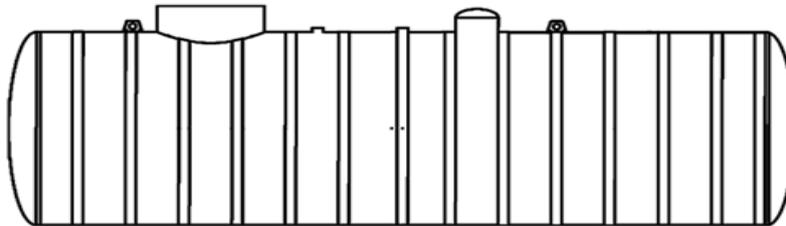


Ilustración 46. Medidas del tanque.

Fuente: Sinertech S.A.S

Capacidad Total (Gallones)	Largo (Centrimetros)	Peso Kilogramos	Número de Correas
4003	200,7	1450	2
5357	243,8	1800	2
6740	454,6	2050	2
8153	792,5	2400	4
9219	887,7	2600	4
10660	1037,7	3000	4
12072	1137,9	3425	6
13484	1262,3	3925	6
14565	1356,4	4250	6
15905	1470,7	4825	8
17346	1602,6	5325	8
19882	1826,3	6200	8

Ilustración 47. Información del tanque.

Fuente: Sinertech S.A.S

8. DEFINICION DE ESCENARIOS DE ANÁLISIS

Los escenarios de contaminación del suelo dependen de cuatro parámetros o variables principales, estas son en función de la zona de estudio o en función de las variables determinadas para cada escenario de modelación.

La variable principal en este caso está definida por las capacidades del software VLEACH relacionadas con la litología del terreno de estudio. Dicho software permite modelar la zona no saturada como si se tratara de un suelo homogéneo, lo cual lleva a la obtención de dos resultados diferentes: el perfil de contaminación en la zona no saturada en sus tres fases (sólida, líquida y gaseosa) y la cantidad de contaminantes que llegan a la zona saturada. Para analizar este caso, se sugiere ejecutar un análisis del estrato total, compuesto por limos arenosos, para determinar los perfiles de contaminación y las concentraciones de contaminantes en el suelo. Esto permitirá comparar los resultados obtenidos con las concentraciones máximas establecidas en el Decreto 1076 de 2015 y la Resolución 631 de 2015. Cabe destacar que el análisis de la litología determina que el estrato puede presentar la misma composición de suelo hasta unos 200 metros de profundidad, lo cual asegura un perfil homogéneo en la zona de estudio.

El segundo factor clave o segunda variable a considerar es el tipo de afectación, que consiste en analizar la diferencia entre una posible fuga continua de contaminantes del depósito o un accidente puntual. En el caso de la fuga continua, ésta puede deberse a un fallo en las juntas o a pequeños derrames durante las operaciones de llenado del depósito. Para estimar esta posible fuga, se pueden considerar los rangos de posible fuga de gasolina de un tanque enterrado establecidos por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos. Es importante mencionar que una fuga continua puede tener efectos graves en el medio ambiente y en la salud pública debido a la acumulación de los contaminantes. Por otro lado, en un accidente puntual se produce una emisión repentina de contaminantes, que puede deberse por ejemplo a una rotura del tanque o a una colisión de este, y que puede tener efectos inmediatos y locales, para efectos de este estudio solo se modelara fuga continua.

Tabla 22. Volumen de hidrocarburos fugados en función del tipo de fuga

Fuente: Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos)

Tipo de fuga	Volumen de hidrocarburo (l) al año
1-2 gotas por segundo	1800
Orificio de 1,6 mm	120.000
Orificio de 3,2 mm	350.000
Orificio de 6,4 mm	1.400.000

Los tanques actuales cuentan con un sistema de seguridad de doble casco capaz de detectar fugas considerables. Por esta razón, y considerando el tipo de fuga supuesta (debido a juntas defectuosas o a procedimientos de llenado), se estima que la fuga sería de varias gotas por segundo, y se considera un volumen de 3000 litros de gasolina vertidos al suelo anualmente. En el caso de un accidente puntual, se supone que el tanque colapsa y libera todo el volumen contenido en su interior al medio ambiente. En consecuencia, se produce una única fuga concentrada en el primer año de la simulación, con un volumen de 30.000 litros de gasolina, para efectos de este estudio solo se modelará fuga continua.

La cuarta variable para considerar es la humedad o contenido volumétrico de agua en el suelo. Este parámetro se divide en tres escalones distintos (bajo, medio o alto) en función de la cantidad de agua que caiga sobre la superficie del suelo. Los valores posibles para el contenido volumétrico de agua son 0,15, 0,20 y 0,25, los cuales son superiores al contenido volumétrico mínimo del suelo y menores que la porosidad. Es importante destacar que la humedad del suelo desempeña un papel crucial en la supervivencia y crecimiento de las plantas, ya que influye directamente en la disponibilidad de nutrientes y en la capacidad de retener agua en el suelo. Además, la humedad también puede afectar la estabilidad del terreno, especialmente en áreas donde se producen intensas precipitaciones.



Mapa 1. Mapa conceptual de las variables de los escenarios simulados

Fuente: Propia

Tabla 23. Escenarios de modelamiento

Fuente: Propia

ID	Estrato Analizado	Tipo de Fuga	Ubicación del N. F.	Volumen de agua o humedad	Permeabilidad en función de la humedad
LM-C1	Arena Limosa	Fuga Continua	Media 10 metros	Bajo	Baja
LM-C2	Arena Limosa	Fuga Continua	Media 10 metros	Medio	Media
LM-C3	Arena Limosa	Fuga Continua	Media 10 metros	Alto	Alta

Se obtiene un total de 3 escenarios y 48 modelaciones, teniendo en cuenta que se trata de un estrato homogéneo de Arenas-limosas este tipo de modelación es muy útil para caracterizar las concentraciones de contaminantes en el suelo, a su vez se utilizan para caracterizar la contaminación que llegara al acuífero.

9. DATOS DE ENTRADA DEL MODELAMIENTO

Una vez que se han determinado los escenarios que se desean simular, es importante definir los parámetros que los representarán adecuadamente. Estos parámetros deben ser introducidos en el programa.

9.1 Parámetros de Suelo

VLEACH es un modelo de simulación que requiere de varios parámetros para poder caracterizar adecuadamente el terreno a estudiar. Entre estos parámetros se encuentran la densidad seca aparente, la porosidad, el contenido volumétrico de agua o humedad, el contenido de materia orgánica y la conductividad no saturada. Es importante destacar que VLEACH cuenta con una base de datos que proporciona valores típicos para algunos tipos de suelos, lo que facilita la selección de los valores adecuados.

En este caso, al tratarse de un estrato homogéneo de limos arenosos, se seleccionarán los valores que proporciona VLEACH para dicho tipo de suelo. Es fundamental considerar la selección correcta de los parámetros, ya que de estos dependen los resultados de la simulación. Asimismo, esta información es esencial para la construcción de modelos que simulan diferentes escenarios relacionados con el terreno como, por ejemplo, la contaminación del agua o la calidad del aire. La incorporación de esta base de datos permite simplificar la elección de los valores para los parámetros necesarios, lo cual facilita el proceso de la simulación y aumenta su confiabilidad.

Tabla 24. Parámetros físicos del suelo

Fuente: Propia

Propiedades físicas del suelo		
Tipo de Suelo	Variable	Valor
Limos arenosos	Densidad seca aparente (ρ_b)	1.62 (g/cm ³)
	Porosidad efectiva (ϕ_e)	0,41
	Contenido de materia orgánica (foc)	0,0061

Tabla 25. Parámetros Hidráulicos del suelo

Fuente: Propia

Propiedades Hidráulicas del suelo		
Tipo de Suelo	Variable	Valor
Limos arenosos	Conductividad Hidráulica (cm/s)	10 ⁻⁴
	Conductividad Hidráulica (pies/año)	103,44

9.1.1 Contenido volumétrico de agua o humedad (θ)

Teniendo en cuenta los escenarios a modelar se definirán 3 posibles valores que estarían dentro del límite entre el contenido mínimo de agua de los terrenos y la porosidad del terreno. Se han seleccionado 0,15, 0,20 y 0,25 como posibles valores. Basado en estos valores se calculará la conductividad hidráulica no saturada para cada uno.

Según Van Genuchten (1980), es posible encontrar la conductividad hidráulica no saturada a partir de la conductividad hidráulica saturada y el contenido de humedad de un suelo. Se presenta la ecuación que permite calcular este parámetro a continuación.

$$k(\theta) = K_s \sqrt{S_e [1 - (1 - \sqrt[m]{S_e})^m]^2} \quad (99)$$

Ecuación 99. Contenido de humedad de un suelo

Dado que K_s es la conductividad hidráulica en saturación, m es el parámetro propio de Van Genuchten para cada suelo y “ S_e ” es la saturación efectiva, se puede expresar “ S_e ” de la siguiente manera:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (100)$$

Ecuación 100. Saturación efectiva

El contenido volumétrico de agua se representa por θ , el contenido volumétrico mínimo de agua para un suelo determinado se representa por θ_r y el contenido volumétrico de agua en saturación se representa por θ_s .

Se han calculado las conductividades hidráulicas no saturadas para los diferentes valores de contenido de humedad presentes en la capa de limos arenosos. Un parámetro m de valor medio 0,42, seleccionado del rango estimado por Ghanbarian-Alavijeh, et al. (2009), se ha utilizado en este cálculo. El valor mínimo del contenido volumétrico de agua se ha establecido en 0,057 según la recomendación del modelo VLEACH. Además, el contenido volumétrico de agua en saturación, que es igual a la porosidad, se ha fijado en 0,41.

Tabla 26. Conductividad hidráulica

Fuente: (Ghanbarian-Alavijeh, 2009)

Contenido volumétrico de agua	Conductividad hidráulica no saturada (cm/s)	Conductividad hidráulica no saturada (pies/año)
0,15	$1.602 \cdot 10^{-8}$	0.01658
0,20	$1.627 \cdot 10^{-7}$	0.16839
0,25	$8.561 \cdot 10^{-7}$	0.8858

9.2 Propiedades de los compuestos volátiles

9.2.1 Composición de la Gasolina en Colombia

En Colombia, no se establecen especificaciones técnicas puntuales por lo que se buscan cumplir las normativas internacionales para las gasolinas, gasóleos, fuelóleos y gases licuados del petróleo, así como la regulación del uso de ciertos biocombustibles. Que establecen límites máximos permitidos de contaminantes para los combustibles, sin embargo, sólo se establecen dos límites relativos a los compuestos BTEX.

- El porcentaje máximo en volumen de Benceno en las gasolinas no debe superar el 1%.
- El porcentaje máximo en volumen de compuestos aromáticos (como son los BTEX) no debe superar el 35%.

Las compañías que venden combustible en Colombia solo cumplen con los límites máximos establecidos y no proporcionan información detallada sobre la proporción de compuestos

BTEX presentes en las gasolinas vendidas. Según la página web del United States Geological Survey (USGS), el 16% del contenido de la gasolina típica es BTEX. Leusch y Bartkow (2010) recopilaron los rangos de porcentajes en volumen de cada uno de los componentes del BTEX en las gasolinas. A continuación, se presentan los valores seleccionados para el caso en cuestión, teniendo en cuenta las fuentes mencionadas:

Tabla 27. Composición de gasolina USGS

Fuente: (Leusch y Bartkow, 2010)

	% en volumen de gasolina
Benceno	1
Tolueno	5
Etilbenceno	1
Xileno	7

9.3 Parámetros BTEX para VLEACH

El software necesita una serie de parámetros que se refieren a cada contaminante para poder llevar a cabo la simulación. Estos parámetros son el coeficiente de partición de carbono orgánico, la constante de Henry, la solubilidad en agua y el coeficiente de difusión en el aire libre. VLEACH cuenta con una base de datos que incluye todos estos parámetros para los cuatro contaminantes que componen el BTEX y que han sido utilizados en las simulaciones realizadas, los cuales se presentan a continuación:

Tabla 28. Propiedades de los Compuestos BTEX

Fuente: (Johnson, 1997)

BTEX	Coeficiente de partición del carbono orgánico (ml/L)	Constante de Henry (adim)	Solubilidad en agua (mg/L)	Coeficiente de difusión al aire libre (m ² /día)
Benceno	58	0,221	1790	0,804
Tolueno	139	0,269	526	0,734
Etilbenceno	220	0,321	169	0,657
Xileno	350	0,244	106	0,622

9.4 Recarga de Concentración en el Modelo (fuga continua)

La definición de esta concentración será diferente según el componente del BTEX analizado y el contenido volumétrico de agua, es decir, la cantidad de agua que se infiltra en el terreno. En el caso de una fuga continua, se estima que se pierden 3.000 litros de gasolina al año, los cuales se mezclan con el agua que se infiltra en el terreno, lo que reduce la concentración de contaminación. Para prevenir la infiltración de agua en el terreno, la estación dispondrá de una losa de hormigón y una red de drenaje subterráneo que evacuará el agua hacia el alcantarillado. Sin embargo, estas redes de drenaje suelen tener pérdidas, que en este caso se suponen en un 10%. Asimismo, de este 10%, el 20% caerá sobre la zona del tanque enterrado. Las fuentes principales de agua que acaban en la red de drenaje son la lluvia y el lavadero de coches anteriormente mencionado.

El volumen de agua de lluvia se considerará variable y su fluctuación estará asociada con tres diferentes escenarios asociados a la humedad del terreno. En la ciudad de Barranquilla, donde la media anual de precipitaciones es de 1743 mm y la gasolinera ocupa un área de 1500 m², se definen los siguientes posibles escenarios de lluvia:

Tabla 29. Escenarios de lluvia sobre la estación de servicio

Fuente: propia

Contenido volumétrico de agua del terreno	Lluvia anual (mm)	Volumen que se drena anualmente (litros)
0,15	1950	2.925.000
0,20	1773	2.659.500
0,25	1550	2.325.000

Para calcular los volúmenes de agua provenientes de lluvia que se infiltrarían en el suelo y ser incluidos en el modelo, se aplica una pérdida del 10% debido al drenaje. De esa pérdida, el 20% cae sobre el depósito. Estos son los volúmenes anuales de recarga al modelo.

Tabla 30. Volúmenes anuales de agua

Fuente: propia

Contenido volumétrico de agua del terreno	Lluvia anual (mm)	Volumen de Recarga (litros)
0,15	1950	58500
0,20	1773	53190
0,25	1550	46500

Una vez establecidos los volúmenes anuales de agua y gasolina que se recargan en el modelo, es necesario determinar las concentraciones de cada uno de los contaminantes. En la tabla siguiente se muestra el volumen anual de cada contaminante que se libera del tanque, en función de los porcentajes de composición de la gasolina previamente obtenidos. Además, se proporcionan las densidades a 20°C de los cuatro compuestos que conforman el BTEX, las cuales se han obtenido de la base de datos de química PubChem, fuente oficial de este tipo de información.

Tabla 31. Volumen contaminante fugado al año

Fuente: propia

BTEX	Volumen que se fuga al año (L)	Densidad (g/L)
Benceno	30	876
Tolueno	150	867
Etilbenceno	30	866
Xileno	210	861

Las concentraciones de cada contaminante necesarias para introducir en el programa se obtienen a partir de la siguiente fórmula:

$$C_i = \text{Densidad} * \frac{\text{Volumen de contaminante}}{\text{Volumen de agua y gasolina}} \quad (101)$$

Ecuación 101. Concentraciones contaminantes

Un ejemplo de la aplicación de esta fórmula con el benceno

$$CB = 876 + \frac{30}{58500 + 3000} = 427 \frac{mg}{l} \quad (102)$$

Ecuación 102. Despeje

La tabla siguiente incluye todas las concentraciones que deben ser introducidas en función del contaminante y la cantidad de lluvia.

Tabla 32. Concentraciones de contaminante por kg de suelo en la superficie para un accidente puntual

Fuente: propia

Concentración (mg/L)	Lluvia Anual		
	1550 mm	1773 mm	1950 mm
Benceno	427	468	531
Tolueno	2115	2314	2627
Etilbenceno	422	462	525
Xileno	2940	3218	3653

9.5 Valores y Parámetros de Entrada

Los parámetros introducidos en el programa están sintetizados en su totalidad. Los siguientes parámetros permanecen constantes en todos los escenarios:

- Tiempo de simulación = 50 años
- Time step = 1 año
- Intervalo de tiempo de salida: 1 años
- Intervalo de tiempo del perfil: 1 años
- Área de simulación = 120 m² – 1290 ft²
- Condiciones de contorno de vapor superior e inferior = 0
- Parámetros de contaminantes determinados VLEACH

Tabla 33. Parámetros introducidos simulación del Benceno

Fuente: propia

Parámetros de simulación para BENCENO									
Escenario	Hpolígono (m)	Nº celdas	ρb (g/cm3)	φ	θ	foc (%)	K (cm/s)	Crecarga (mg/L)	Csuelo (µg/kg)
A-C1	6.5	10	1.62	0,41	0,15	0,61	1.602·10 ⁻⁸	427	0

Parámetros de simulación para BENCENO									
A-C2	6.5	10	1.62	0,41	0,20	0,61	$1.627 \cdot 10^{-7}$	468	0
A-C3	6.5	10	1.62	0,41	0,25	0,61	$8.561 \cdot 10^{-7}$	531	0

Tabla 34. Parámetros introducidos simulación del TOLUENO

Fuente: propia

Parámetros de simulación para TOLUENO									
Escenario	Hpolígono (m)	Nº celdas	ρ_b (g/cm ³)	ϕ	θ	foc (%)	K (cm/s)	Cre carga (mg/L)	Csuelo ($\mu\text{g}/\text{kg}$)
A-C1	6.5	10	1.62	0,41	0,15	0,61	$1.602 \cdot 10^{-8}$	2115	0
A-C2	6.5	10	1.62	0,41	0,20	0,61	$1.627 \cdot 10^{-7}$	2314	0
A-C3	6.5	10	1.62	0,41	0,25	0,61	$8.561 \cdot 10^{-7}$	2627	0

Tabla 35. Parámetros introducidos simulación del ETILBENCENO

Fuente: propia

Parámetros de simulación para ETILBENCENO									
Escenario	Hpolígono (m)	Nº celdas	ρ_b (g/cm ³)	ϕ	θ	foc (%)	K (cm/s)	Cre carga (mg/L)	Csuelo ($\mu\text{g}/\text{kg}$)
L-C1	6.5	10	1.62	0,41	0,15	0,61	$1.602 \cdot 10^{-8}$	422	0
L-C2	6.5	10	1.62	0,41	0,20	0,61	$1.627 \cdot 10^{-7}$	462	0
L-C3	6.5	10	1.62	0,41	0,25	0,61	$8.561 \cdot 10^{-7}$	525	0

Tabla 36. Parámetros introducidos simulación del XILENO

Fuente: propia

Parámetros de simulación para XILENO									
Escenario	Hpolígono (m)	Nº celdas	ρ_b (g/cm ³)	ϕ	θ	foc (%)	K (cm/s)	Cre carga (mg/L)	Csuelo ($\mu\text{g}/\text{kg}$)
L-C1	6.5	10	1.62	0,41	0,15	0,61	$1.602 \cdot 10^{-8}$	2940	0
L-C2	6.5	10	1.62	0,41	0,20	0,61	$1.627 \cdot 10^{-7}$	3218	0
L-C3	6.5	10	1.62	0,41	0,25	0,61	$8.561 \cdot 10^{-7}$	3653	0

10. RESULTADOS

VLEACH produce tanto resultados gráficos como de las concentraciones de contaminantes en las tres fases del suelo (sólido, líquido y gas). Para aplicar este estudio, es necesario tener en cuenta los límites establecidos por las normativas colombianas para uso industrial urbano e internacionales de forma general, los cuales determinan los valores de concentraciones que no se deben sobrepasar en los estados sólido y líquido, con el fin de establecer si existe o no contaminación. Es necesario tener en cuenta estos límites para determinar la presencia o ausencia de contaminación.

10.1 Concentraciones Máximas en Suelo (Solida)

El Decreto 1076 de 2015, también conocido como el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, aborda diversos aspectos de la gestión ambiental en Colombia, incluyendo la contaminación del suelo por hidrocarburos. Con relación a la contaminación de suelos con hidrocarburos, este decreto establece criterios técnicos y legales para la identificación, evaluación, prevención, control, remediación y seguimiento de suelos afectados por actividades contaminantes. Este decreto también define los límites máximos permisibles de contaminantes en suelos para diferentes hidrocarburos, los cuales varían según la zona de aplicación y el uso del suelo.

Tabla 37. Máxima concentración en suelo de BTEX en el suelo

Fuente: (Decreto 1076 de 2015 Colombia)

Hidrocarburo	Concentración Máxima (mg/kg)
Benceno	10
Tolueno	50
Etilbenceno	10
Xileno	200

10.2 Concentraciones Máximas en el Agua (Líquido)

La Resolución 631 de 2015 establece los lineamientos para el control de sustancias contaminantes en cuerpos de agua subterráneos, incluyendo aguas subsuperficiales afectadas por vertimientos. Esta resolución define límites máximos permisibles y obliga a monitoreo periódico de calidad de agua subterránea, prohibiendo vertimientos con hidrocarburos sin tratamiento previo, y exige reporte de derrames de hidrocarburos a las autoridades competentes. En cuanto a los BTEX, la resolución establece los límites permisibles de concentración específica en Colombia.

Tabla 38. Límites permisibles para la concentración de hidrocarburos específicos en el agua subterránea en Colombia

Fuente: (Resolución 631 de 2015)

Hidrocarburo	Valor límite (mg/L)
Benceno:	0.005
Tolueno	1,0
Etilbenceno	0.7
Xileno	0.5

Los límites de concentración se pueden aplicar directamente a los gráficos de salida de VLEACH para la zona vadosa, pero se debe hacer una pequeña transformación en el gráfico de impacto a las aguas subterráneas debido a que los resultados se expresan en gramos que llegan al acuífero al año. Se considera que la cantidad de contaminante que llega al acuífero se acumula en el primer metro de espesor de la zona saturada y en el área de 120 m² del polígono utilizado en la simulación. Para determinar la concentración líquida de contaminante en esta zona, se relacionará la cantidad de BTEX que llega al acuífero y la cantidad de agua presente en este primer metro de espesor de la zona saturada, que son todos los huecos del material, es decir, la porosidad. En todos los casos de estudio, el primer estrato de la zona saturada siempre son las arcillas.

$$V_{iw} (\text{zona saturada}) = \text{Superficie} * \text{espesor} * \text{porosidad} \quad (103)$$

$$= 120 \text{ m}^2 * 1 \text{ m} * 0,482 = 57.840 \text{ L}$$

Ecuación 103. Concentración líquida del contaminante

De esta forma, multiplicando el límite establecido en la EPA por el volumen de agua del primer metro en la zona saturada, se obtiene la máxima cantidad de contaminante que puede llegar al acuífero para cada contaminante.

$$\begin{aligned} \text{Máx } B &= 0,005 \frac{\text{mg}}{\text{L}} * 57840 \text{ L} = 0,289 \text{ g} \\ \text{Máx } T &= 1 \frac{\text{mg}}{\text{L}} * 57840 \text{ L} = 57.84 \text{ g} \\ \text{Máx } E &= 0,7 \frac{\text{mg}}{\text{L}} * 57840 \text{ L} = 40.49 \text{ g} \\ \text{Máx } x &= 0,5 \frac{\text{mg}}{\text{L}} * 57840 \text{ L} = 28.92 \text{ g} \end{aligned} \quad (104)$$

Ecuación 104. Despeje

En el caso de la concentración de un contaminante en fase gaseosa en el suelo, no se encuentra una regulación específica en las normativas. Para establecer un límite orientativo es necesario recurrir a otras regulaciones o estándares. En la Unión Europea, solo el nivel máximo de benceno está regulado para proteger la salud humana. Por lo tanto, se utilizan los occupational exposure limits establecidos por la Occupational Safety and Health Administration (OSHA) de los Estados Unidos, donde se definen límites para los cuatro compuestos del BTEX, basados en la máxima exposición permitida para los trabajadores en los Estados Unidos, y son utilizados como referencia para definir límites orientativos.

Tabla 39. Máxima concentración en fase gas de BTEX en EE. UU.

Fuente: (USEPA)

Sustancia	Máxima exposición en fase gas apta para trabajos en EE. UU. (µg/m ³)
Benceno	3.250
Tolueno	750
Etilbenceno	435
Xileno	435

Los resultados se obtienen mediante una fuga continua y se presentan en dos tipos el primero sera: un perfil de concentración en el terreno que comprende los primeros 10 metros de profundidad, es decir, solamente el estrato más superficial (limos). VLEACH no permite

presentar este tipo de gráfico diferenciando las condiciones del terreno por profundidad. El perfil se presenta para las tres fases, cuatro tiempos distintos, tres condiciones distintas de humedad y conductividad, y para los cuatro contaminantes.

El segundo resultado será el Impacto o Afección al nivel freático se presentará para cuatro niveles freáticos distintos, cuatro tiempos diferentes, tres condiciones distintas de humedad y conductividad, y para los cuatro contaminantes.

10.3 Resultados de Contaminación de Suelo por Fuga Continua

El escenario de fuga continua ocurre debido a fallas en las juntas y pequeños derrames durante el llenado del depósito. Se asume que el volumen de fuga es de 3.000 litros de combustible al año.

10.3.1 Resultados en Fase Solida

10.3.1.1 Perfil de concentración - Benceno

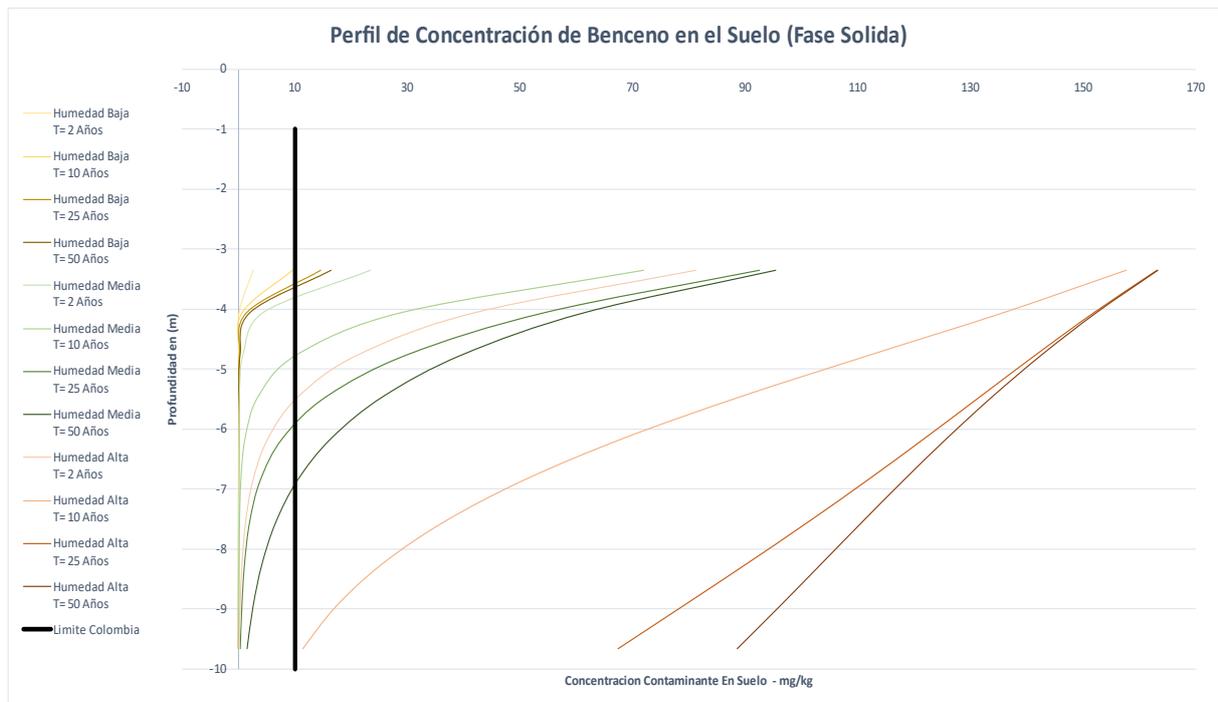


Ilustración 48. Resultados de Modelamiento - Benceno en fase sólida

Fuente: propia

En este gráfico se ilustran las concentraciones de benceno en fase sólida con relación a tres posibles humedades (θ) y, por ende, tres conductividades (K) asociadas. La línea vertical negra indica el límite máximo admisible de concentración de benceno en suelos industriales, de acuerdo con la normativa colombiana contenida en el Decreto único 1076 de 2015.

Los resultados indican que, para valores bajos de humedad, la contaminación avanza lentamente y después de 25 años desde el inicio de la fuga, el límite del decreto se supera en el primer metro debajo del tanque. Con humedades promedio, se supera el límite del decreto en el primer metro debajo del tanque en aproximadamente 2 años y la contaminación se extiende considerablemente, lo que requiere una reacción inmediata. Si la humedad es alta,

la contaminación avanza muy rápidamente y se convierte en una situación muy desfavorable, ya que se contaminan aproximadamente tres metros de profundidad del estrato debajo del tanque en dos años, lo que requiere una planificación previa para el control de contaminación y descontaminación del suelo, especialmente en situaciones muy desfavorables.

10.3.1.2 Perfil de concentración - Tolueno - Fase Sólida

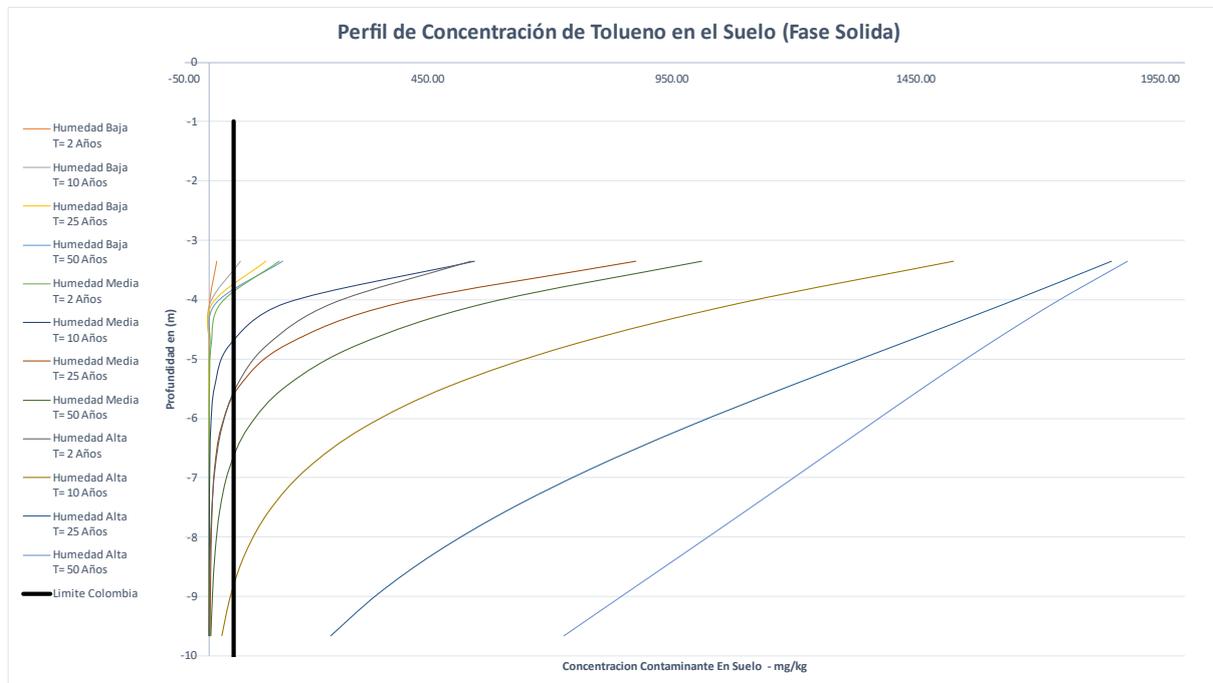


Ilustración 49. Resultados de Modelamiento - Tolueno en fase sólida

Fuente: propia

En este gráfico se representan las concentraciones de tolueno en fase sólida considerando tres posibles humedades (θ) y, por ende, tres conductividades (K) asociadas. La línea vertical negra indica el límite máximo admisible de concentración de benceno en suelos industriales, de acuerdo con la normativa colombiana contenida en el Decreto único 1076 de 2015.

Los resultados indican que, para valores bajos de humedad, la contaminación avanza de forma considerable, ya que después de 10 años desde el inicio de la fuga, se superaría el límite máximo permisible de concentración en el primer metro debajo del tanque. Con humedades promedio, se supera el límite máximo permisible del decreto en el primer metro debajo del tanque en aproximadamente 2 años y la contaminación se extiende considerablemente entre los 5 y los 10 años, lo que requiere una acción inmediata. Si la humedad es alta, la contaminación avanza muy rápidamente y se convierte en una situación muy desfavorable. En solo 2 años o menos, se contaminarían aproximadamente dos metros y medio de profundidad del estrato de suelo debajo del tanque, lo que requiere una planificación previa para el control y la descontaminación del suelo, especialmente en situaciones muy desfavorables.

10.3.1.3 Perfil de concentración - Etilbenceno - Fase Solida - Fase Solida

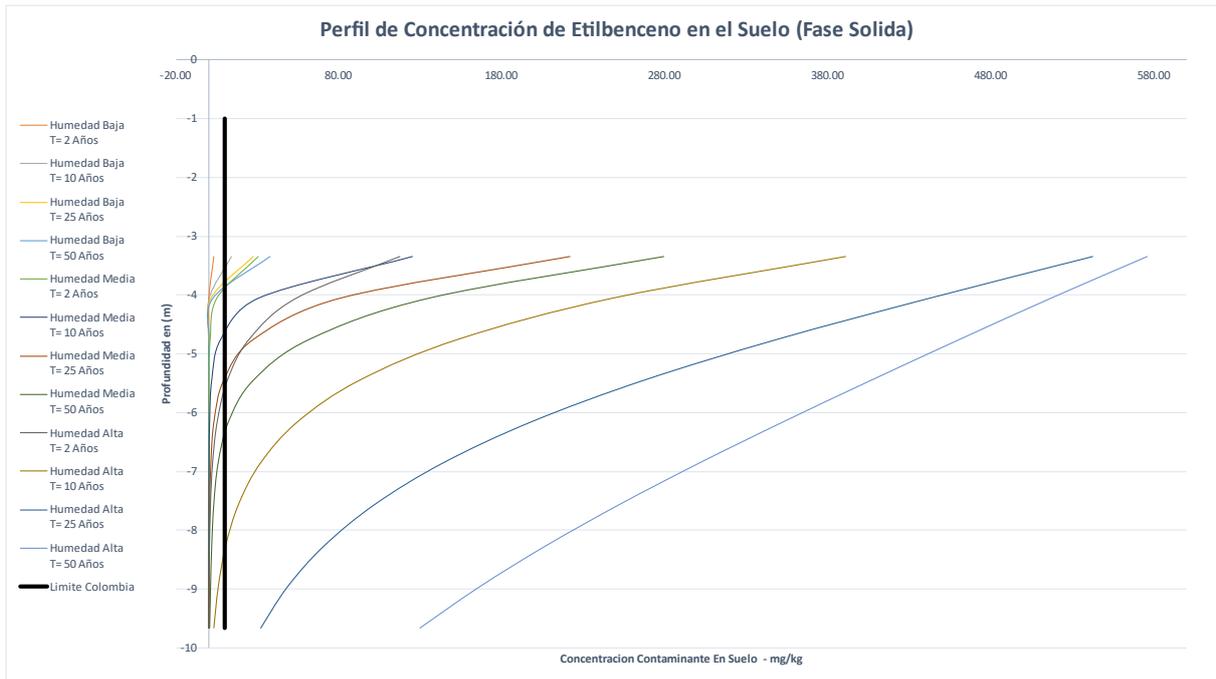


Ilustración 50. Resultados de Modelamiento - Etilbenceno en fase sólida

Fuente: propia

En este gráfico se presentan las concentraciones de Etilbenceno en fase sólida en relación con tres posibles humedades (θ) y, por ende, tres conductividades (K) asociadas. La línea vertical negra indica el límite máximo admisible de concentración de benceno en suelos industriales, de acuerdo con la normativa colombiana contenida en el Decreto único 1076 de 2015.

Los resultados indican que, para valores bajos de humedad, la contaminación se extiende de manera lenta, ya que después de 10 años desde el inicio de la fuga, se superaría el límite máximo permisible de concentración en el primer metro debajo del tanque. Con humedades promedio, se supera el límite máximo permisible del decreto en el primer metro debajo del tanque en aproximadamente 2 años y la contaminación se extiende considerablemente entre los 5 y los 10 años, lo que requiere una acción inmediata. Si la humedad es alta, la contaminación avanza a una velocidad muy rápida y se convierte en una situación muy desfavorable. Al cabo de solo 2 años o menos, se contaminarían aproximadamente dos metros de profundidad del estrato de suelo debajo del tanque, lo que requiere una planificación previa para el control y la descontaminación del suelo, especialmente en situaciones muy desfavorables.

10.3.1.4 Perfil de concentración - Xileno - Fase Solida

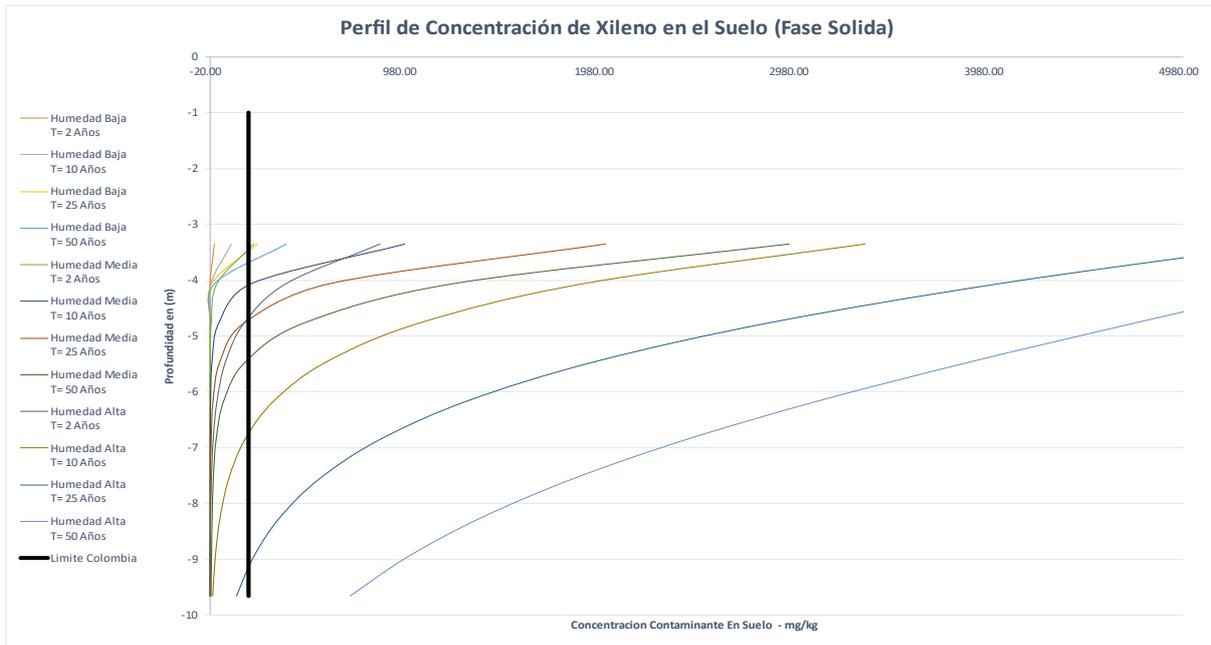


Ilustración 51. Resultados de Modelamiento - en fase sólida

Fuente: propia

En este gráfico se visualizan las concentraciones de xileno en fase sólida en relación con tres posibles niveles de humedad (θ) y, por ende, tres conductividades (K) asociadas. La línea vertical negra indica el límite máximo admisible de concentración de benceno en suelos industriales, de acuerdo con la normativa colombiana contenida en el Decreto único 1076 de 2015.

Los resultados muestran que, para valores bajos de humedad, la contaminación avanza lentamente y después de 25 años desde el inicio de la fuga, se supera el límite del decreto en el primer metro debajo del tanque. Con humedades promedio, se supera dicho límite en el primer metro debajo del tanque en aproximadamente 2 años y la contaminación se extiende considerablemente, por lo que requiere una acción inmediata. Si la humedad es alta, la contaminación avanza muy rápidamente y se convierte en una situación muy desfavorable, ya que se contaminan alrededor de tres metros de profundidad del estrato debajo del tanque en dos años o menos, lo que requiere una planificación previa para el control y descontaminación del suelo, especialmente en situaciones muy desfavorables.

En la siguiente tabla se resumen los tiempos para actuar antes de que se contamine el estrato de limos al completo, para cada contaminante y escenario.

Tabla 40. Tiempo (años) para actuar en caso de fuga continua, fase sólida

Fuente: propia

BTEX	Humedad Baja	Humedad Media	Humedad Alta
Benceno	+25	+2	-2
Tolueno	+10	+2	-2
Etilbenceno	+10	+2	-2
Xileno	+25	+10	-2

10.3.2 Resultados en Fase Líquida

10.3.2.1 Perfil de concentración - Benceno - Fase Líquida

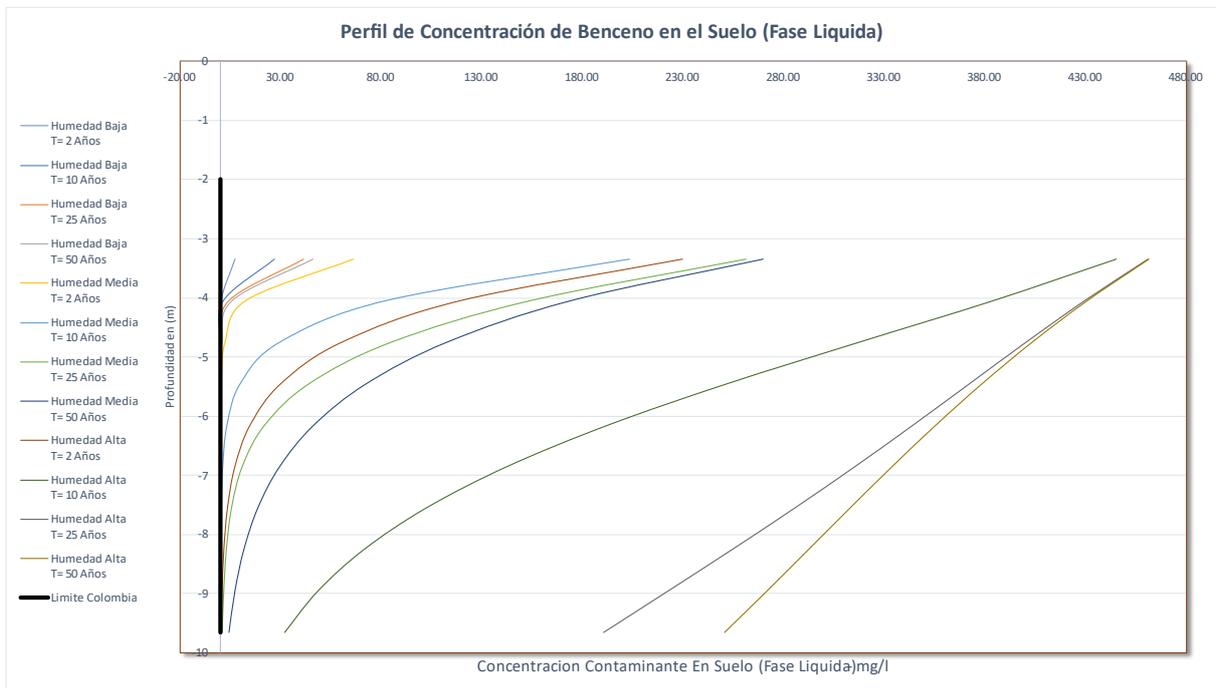


Ilustración 52. Resultados de Modelamiento - Benceno en fase líquida

Fuente: propia

10.3.2.2 Perfil de concentración - Tolueno - Fase Líquida

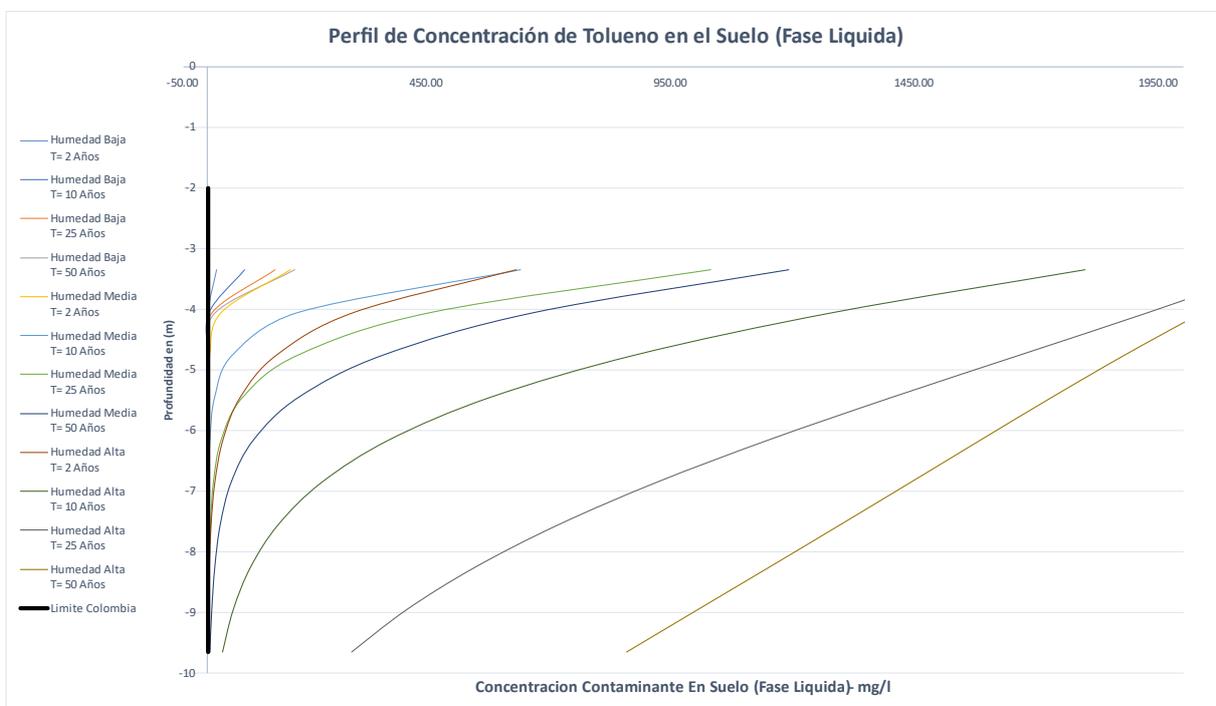


Ilustración 53. Resultados de Modelamiento - Tolueno en fase líquida

Fuente: propia

10.3.2.3 Perfil de concentración - Etilbenceno - Fase Líquida

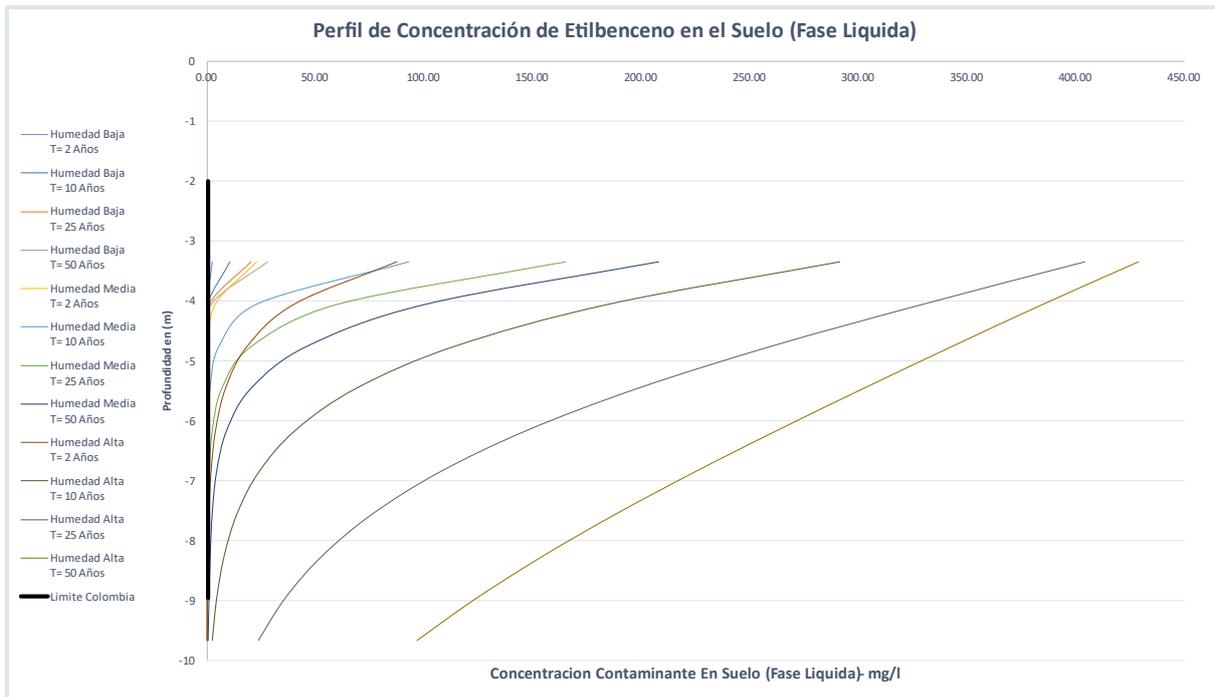


Ilustración 54. Resultados de Modelamiento – Etilbenceno en fase líquida

Fuente: propia

10.3.2.4 Perfil de concentración - Xileno - Fase Líquida

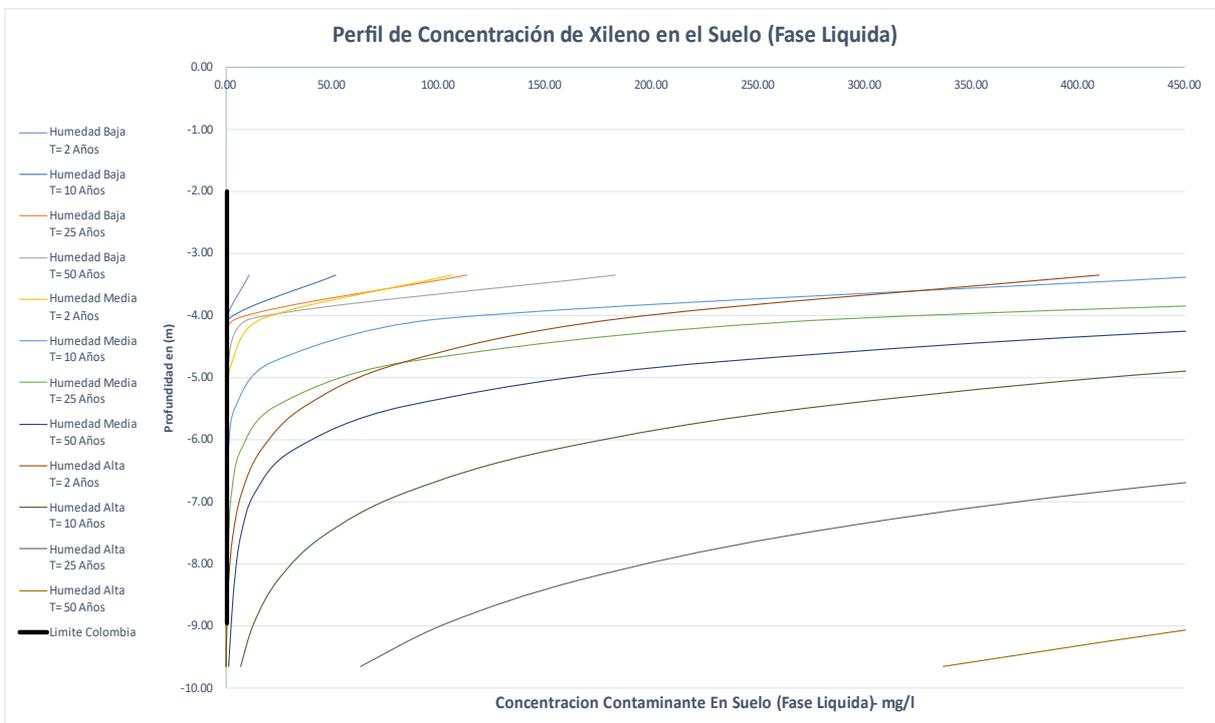


Ilustración 55. Resultados de Modelamiento – Xileno en fase líquida

Fuente: propia

Se representan las concentraciones de contaminantes BTEX en las diferentes graficas en fase líquida para una fuga continua. La línea vertical negra corresponde con la máxima concentración de benceno en el agua admisible para el consumo humano según la normativa colombiana en la Resolución 631 de 2015. Se comprueba que, en los distintos escenarios con diferentes humedades y conductividades, las concentraciones de todos los compuestos BTEX en la fase líquida superan ampliamente los estándares de la normativa colombiana y la normativa internacional de la USEPA.

Se resume en la siguiente tabla los tiempos de actuación antes de que se contamine totalmente la fase líquida del suelo en el estrato de limos, por contaminante y escenario.

Tabla 41. Tiempo (años) para actuar en caso de fuga continua, fase líquida

Fuente: propia

BTEX	C1 (θ bajas)	C2 (θ medias)	C3 (θ altas)
Benceno	2	2	-2
Tolueno	2	2	-2
Etilbenceno	2	2	-2
Xileno	2	2	-2

10.3.3 Resultados en Fase Gas

10.3.3.1 Perfil de concentración - Benceno - Fase Gas

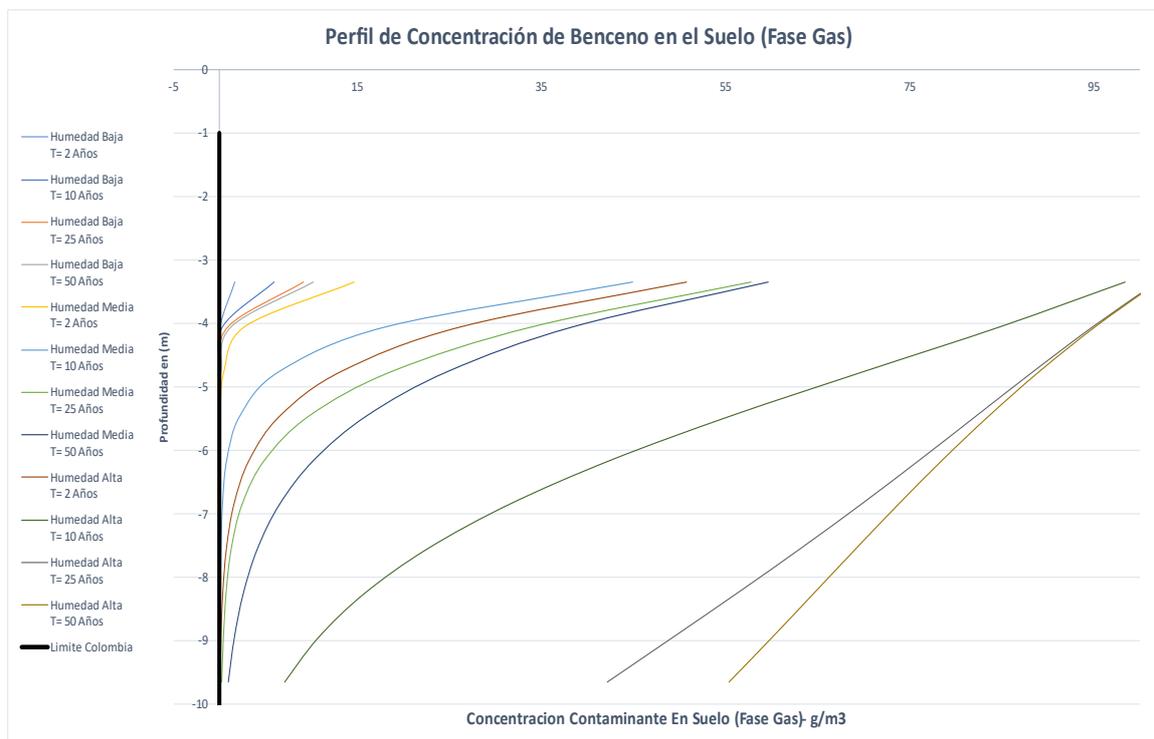


Ilustración 56. Resultados de Modelamiento – Benceno en fase gas

Fuente: propia

10.3.3.2 Perfil de concentración - Tolueno - Fase Gas

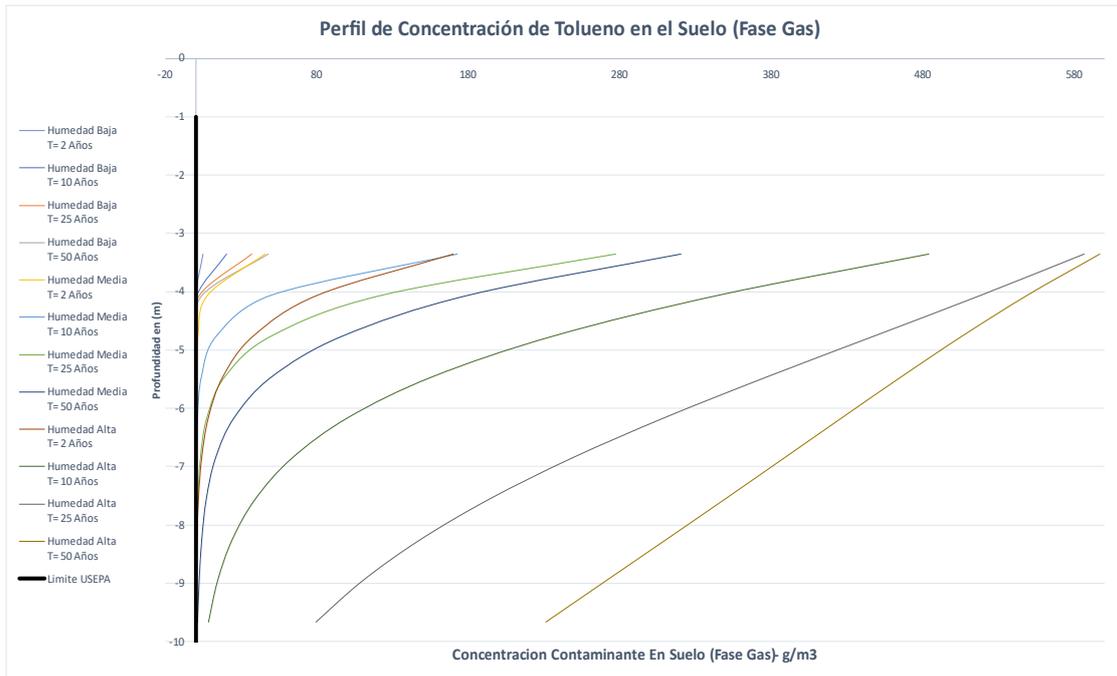


Ilustración 57. Resultados de Modelamiento – Tolueno en fase gas
Fuente: propia

10.3.3.3 Perfil de concentración - Etilbenceno- Fase Gas

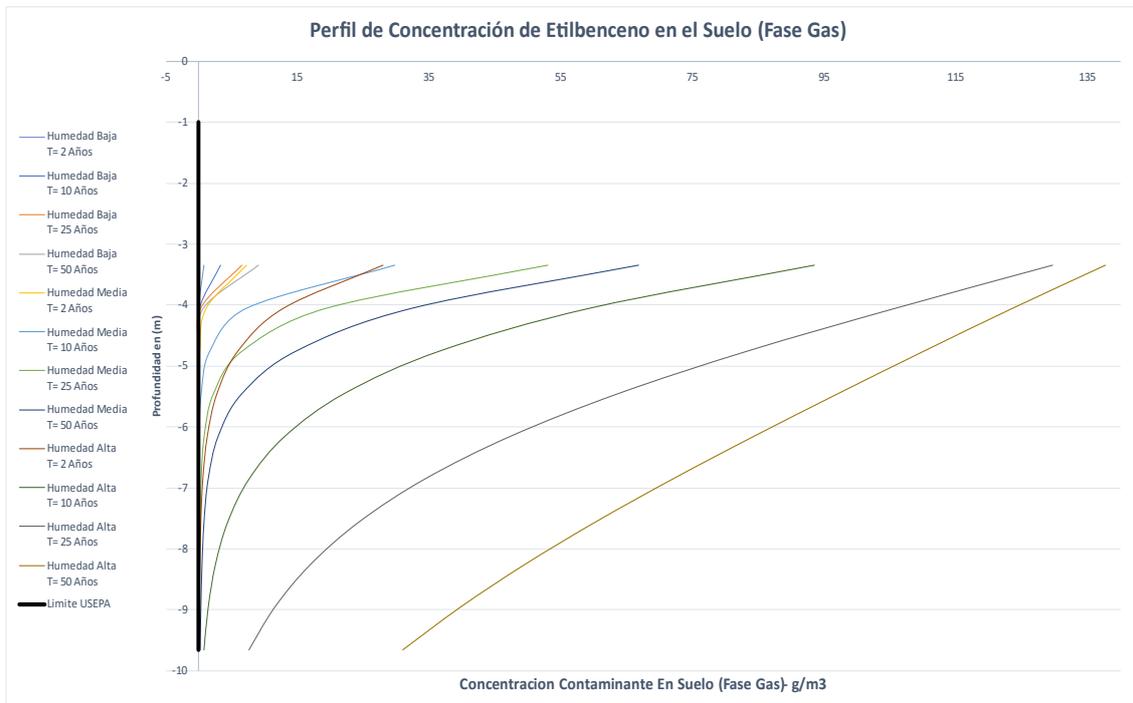


Ilustración 58. Resultados de Modelamiento – Etilbenceno en fase gas
Fuente: propia

10.3.3.4 Perfil de concentración - Xileno - Fase Gas

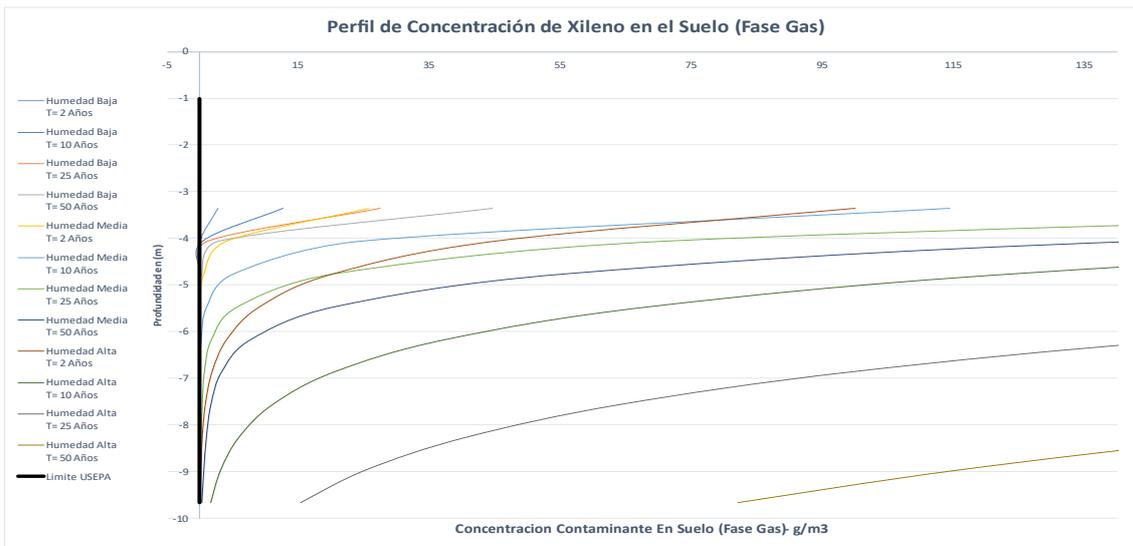


Ilustración 59. Resultados de Modelamiento – Xileno en fase gas
Fuente: propia

Estos gráficos presentan las concentraciones en fase gas de todos los contaminantes BTEX en diversos escenarios de humedad y tiempos de exposición de 2 a 50 años. Se observa que todas las concentraciones son significativamente superiores a los límites recomendados por la agencia estadounidense USEPA, evidenciado por la línea negra en los gráficos. En particular, en el caso de fuga continua se registran concentraciones en fase gas en el terreno que superan ampliamente el estándar establecido por la agencia del trabajo en EE. UU. Es decir, que podría tratarse de una situación altamente preocupante en términos de contaminación y salud pública, que requiere una acción inmediata y efectiva para controlar y reducir la exposición a estos contaminantes.

10.3.4 Afección al Nivel freático a 10 metros

10.3.4.1 Perfiles del Impacto al Agua subterránea – Benceno

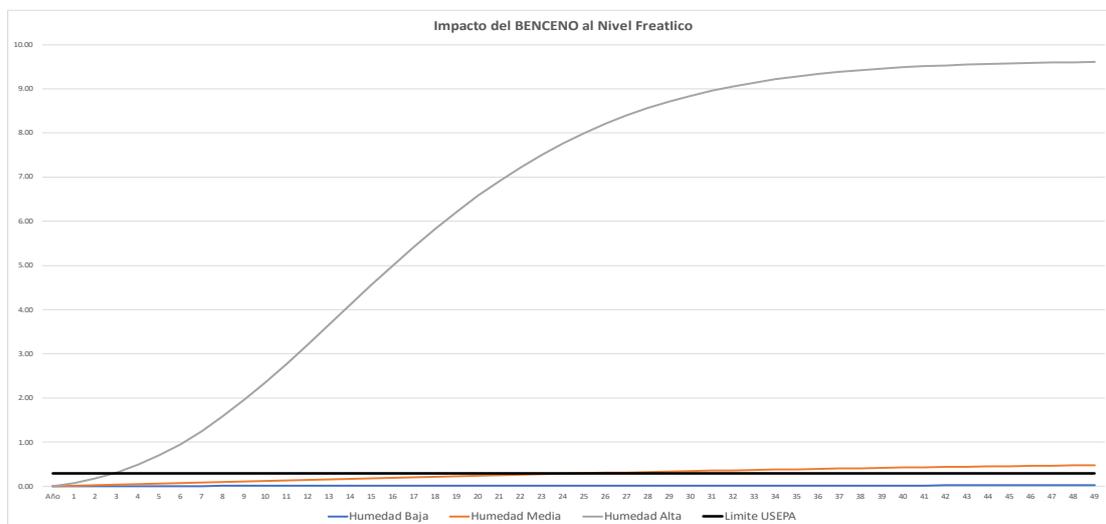


Ilustración 60. Modelamiento Impacto del Benceno al Agua subterránea (Nivel Freático)
Fuente: propia

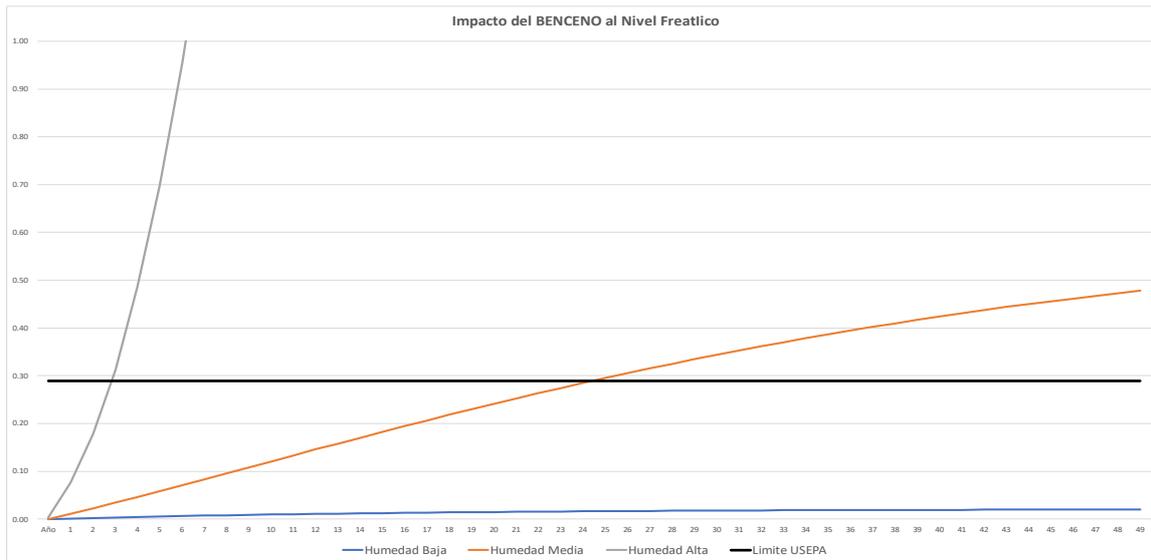


Ilustración 61. Modelamiento Impacto del Benceno al Agua subterránea (Nivel Freático)

Fuente: propia

En estos gráficos se detalla la masa de benceno como contaminante que llega al nivel freático cada año, a 7 metros del estrato de suelos bajo el tanque. Los resultados indican que la masa de contaminante que llega al nivel freático en situaciones de humedad baja es prácticamente nula. En casos de humedad media, se supera el límite después de 23 años, pero la masa que llega al nivel freático no es considerable y se normaliza en un corto periodo de tiempo a lo largo de los 50 años de modelamiento. Sin embargo, la situación crítica y desfavorable se presenta cuando las humedades son más altas, lo que está relacionado con mayores conductividades. Esto se debe a que el mecanismo de transporte que domina en este caso es la advección, debido al tipo de suelo presente en el área de estudio. En este escenario, las concentraciones de contaminantes en el nivel freático se disparan y se convierten en un riesgo significativo para la salud pública y el medio ambiente, lo que requiere la implementación inmediata de medidas efectivas de control y mitigación.

10.3.4.2 Perfil del Impacto al Agua subterránea - Tolueno

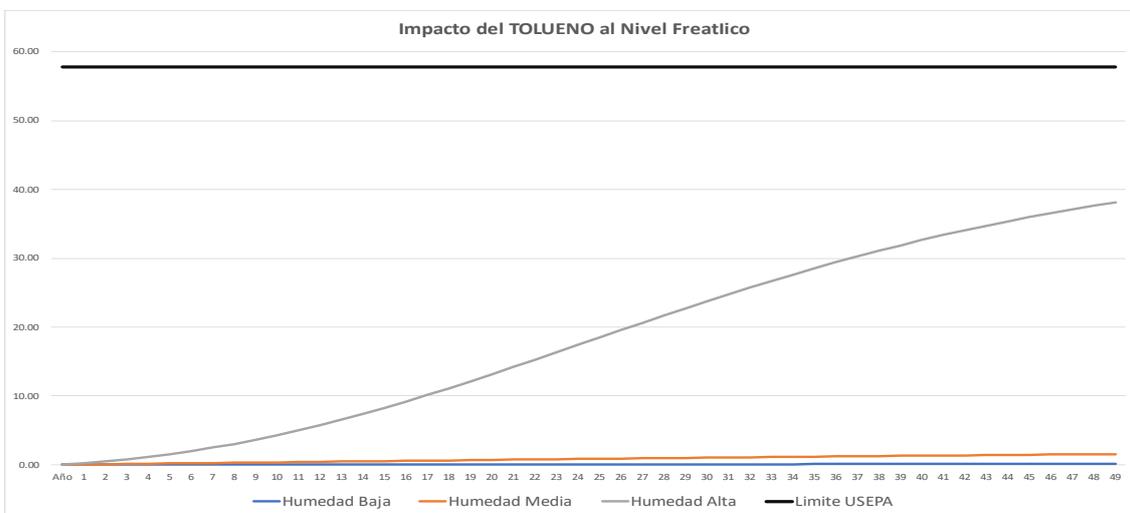


Ilustración 62. Modelamiento Impacto del Tolueno al Agua subterránea (Nivel Freático)

Fuente: propia

10.3.4.3 Perfil del Impacto al Agua subterránea - Etilbenceno

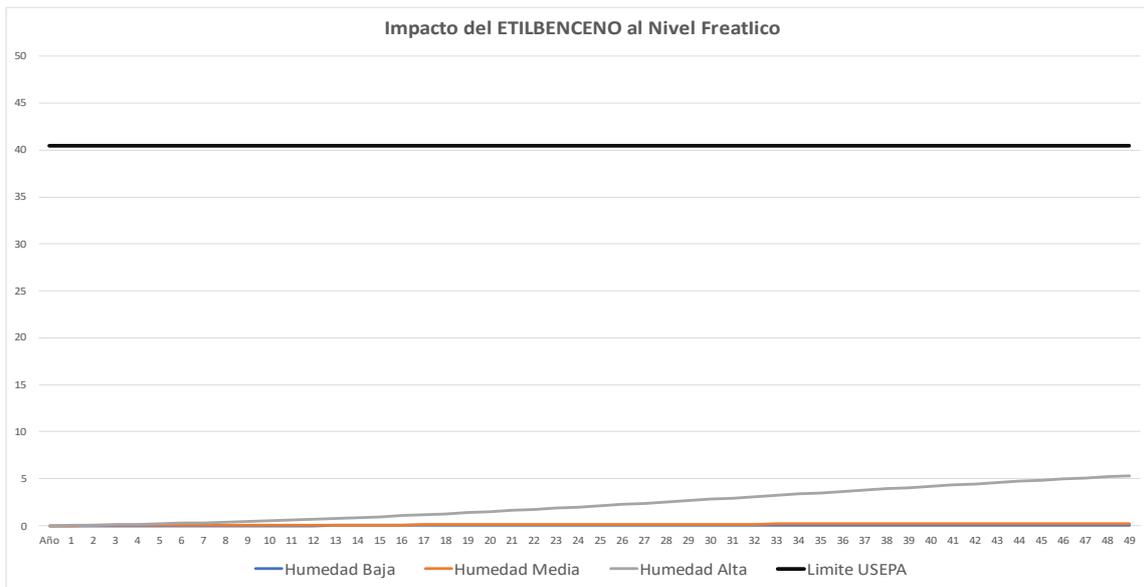


Ilustración 63. Modelamiento Impacto del Tolueno al Agua subterránea (Nivel Freático)

Fuente: propia

10.3.4.4 Perfil del Impacto al Agua subterránea - Xileno

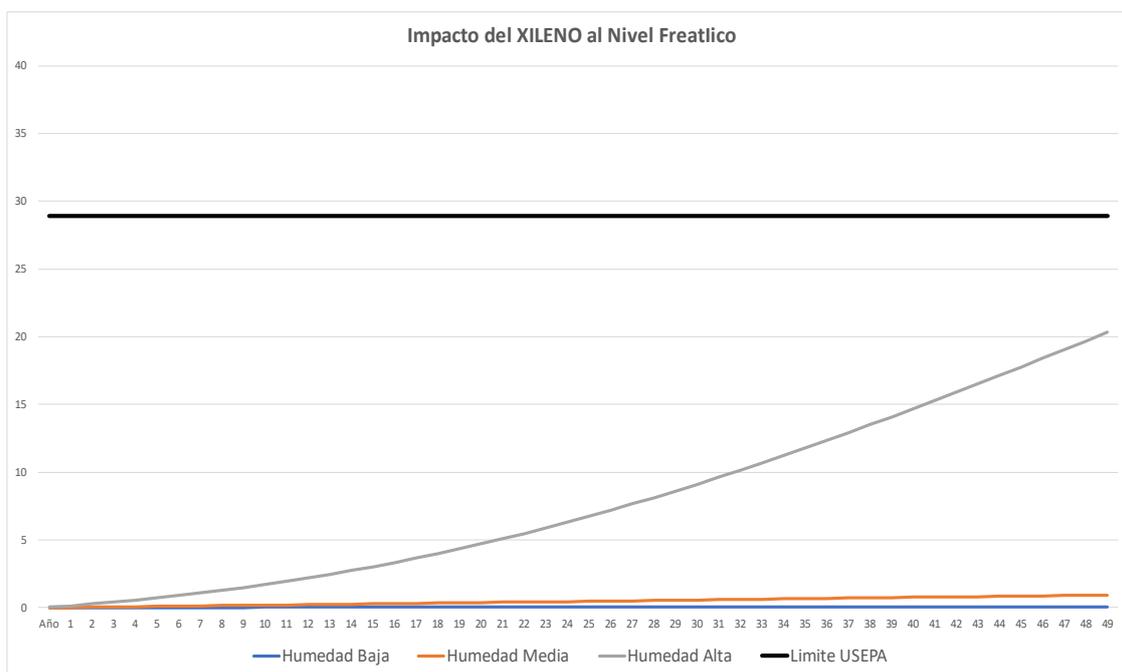


Ilustración 64. Modelamiento Impacto del Tolueno al Agua subterránea (Nivel Freático)

Fuente: propia

Según el modelamiento realizado para el tolueno, etilbenceno y xileno, la masa de estos contaminantes que llega al acuífero anualmente no supera las concentraciones máximas permitidas por la USEPA. En estos casos, el transporte debido a la difusión en fase gas es más importante que la advección. Además, en el agua del nivel freático, solo el benceno tendría un impacto negativo y tardío, siempre que el nivel freático no sufra modificaciones

significativas. De hecho, el nivel freático permanecería sin cambios y tardaría varios años en sufrir un impacto negativo, lo cual es alentador. Sin embargo, en caso de una fuga continua de pequeña cantidad de combustible, esta podría pasar desapercibida durante mucho tiempo al no detectarse un impacto negativo en el nivel freático. Esto implicaría un vertido constante al terreno durante un periodo prolongado, lo que resultaría en un impacto preocupante en términos de contaminación y medio ambiente. Por lo tanto, se deben tomar medidas preventivas y de control para evitar este tipo de situaciones y garantizar la protección del medio ambiente y la salud pública.

10.4 Síntesis de resultados

En condiciones normales, es posible detectar una fuga y evitar que cualquiera de los compuestos del BTEX contamine la fase sólida del primer estrato del suelo, ya que se dispone de al menos 2 años. Este resultado es una validación importante del criterio utilizado y de la importancia de los mecanismos de control de contaminación de suelo en grandes depósitos de combustible.

Sin embargo, en condiciones desfavorables con alta humedad, únicamente se dispondría de menos de 2 años para detectar y evitar la contaminación de la fase sólida del estrato de arenas limosas.

En estas circunstancias, el agua contenida afectada no sería apta para el consumo humano, ya que los límites de la normativa colombiana e internacional para el benceno son sobrepasados en menos de 2 años. Es importante resaltar que no existe un estándar específico para las máximas concentraciones de un contaminante en agua contenida en la zona vadosa, lo que hace difícil determinar un umbral preciso para este tipo de contaminación.

Por otro lado, las concentraciones en fase gas del terreno son varias veces superiores a las que establece la agencia del trabajo estadounidense USEPA. Esto también era esperable, ya que no hay un estándar específico para las concentraciones en fase gas en el terreno. Por lo tanto, las concentraciones obtenidas deben ser transformadas a concentraciones en la atmósfera, donde sí existen estándares.

En el caso de que el nivel freático se mantenga estable, la llegada de contaminantes al acuífero se produciría lentamente y supondría un impacto considerable, superando las concentraciones de benceno en agua establecidas para el consumo humano por la EPA después de un periodo de 23 a 25 años.

Tabla 42. Tiempos para actuar sobre el suelo o para que se contamine el acuífero en fuga continua

Fuente: propia

Situación	Tiempo de Actuación (años)
Actuar sobre el suelo (situación normal)	2
Actuar sobre el suelo (situación desfavorable)	-2
Contaminar el acuífero (situación normal)	25
Contaminar el acuífero (situación desfavorable)	<10

11. CONCLUSIONES Y ANÁLISIS

El análisis de un fenómeno de contaminación por hidrocarburos en la zona no saturada del suelo es una tarea complicada debido a la complejidad del medio. Una forma de acercarse a la realidad es mediante el uso de modelos sencillos como VLEACH; sin embargo, estos modelos tienen hipótesis simplificadoras que reducen la precisión de los resultados. Por ello, la utilización de modelos más complejos con un mayor número de parámetros puede aportar más exactitud en los resultados si se cuenta con suficiente información para caracterizar las propiedades del suelo.

La incorporación de al menos 15 parámetros en VLEACH implica una gran cantidad de incertidumbre en su estimación, lo que hace necesario analizar los resultados desde una perspectiva cualitativa. Esta herramienta resulta útil para comparar escenarios y para la toma de decisiones preliminares como el tiempo disponible para actuar antes de la contaminación total del suelo.

La humedad del suelo es un parámetro clave que influye en los fenómenos de transporte en la zona vadosa, y su variabilidad cambia los resultados del transporte hidráulico, la magnitud de los impactos, la velocidad de transporte y el mecanismo predominante.

La evaluación de los riesgos ambientales asociados a procesos de contaminación de suelos por hidrocarburos requiere una caracterización precisa de la zona de estudio y una gran inversión económica. Además, las fugas continuas en los tanques subterráneos pueden tener graves impactos a largo plazo, por lo que es importante invertir en monitorización no solo del tanque sino también del suelo circundante para su detección temprana.

En conclusión, el desarrollo de nuevos modelos matemáticos en la zona vadosa para la caracterización de la distribución de contaminantes en las fases permitiría considerar medios heterogéneos y obtener mejores aproximaciones sin aumentar en exceso el número de parámetros necesario.

Los mecanismos de control de contaminación de suelos por hidrocarburos en almacenamientos de gasolina pueden incluir el diseño y mantenimiento adecuado del tanque de almacenamiento, la prevención de derrames mediante la realización de inspecciones y pruebas regulares, la implementación de sistemas de contención y recuperación de derrames, la gestión adecuada de residuos y la identificación y monitoreo de fuentes de contaminación. Además, existen leyes y regulaciones en Colombia que buscan prevenir y controlar la contaminación de suelos por hidrocarburos, tales como la Ley 1333 de 2009 y el Decreto 2270 de 2012. Es importante que los almacenamientos de gasolina cumplan con estos requisitos y cooperen en la prevención y control de la contaminación del suelo.

Algunas de las medidas específicas incluyen la identificación y monitoreo de fuentes de contaminación, la implementación de políticas de uso del suelo, la promoción de prácticas sostenibles, la implementación de programas de educación y concienciación ambiental, la prevención de derrames de petróleo y la recuperación de hidrocarburos.

Los mecanismos de control de contaminación de suelos por hidrocarburos en Colombia pueden incluir la promoción de la certificación ISO 14001 y el cumplimiento de las leyes y regulaciones ambientales para los empresas y depósitos que requieren del almacenamiento de este tipo de hidrocarburos.



Es importante tener en cuenta que el éxito en la implementación de mecanismos de control de contaminación de suelo depende en gran medida de la cooperación y el compromiso de todos los actores involucrados, incluyendo a las empresas, las autoridades gubernamentales y la sociedad en general.

Los procedimientos de manipulación segura de los hidrocarburos y las normativas específicas son cruciales para garantizar la protección del medio ambiente y la seguridad de las personas. En Estados Unidos, existen agencias gubernamentales encargadas de regular y supervisar las actividades relacionadas con hidrocarburos, como la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA). Además, se llevan a cabo programas de monitoreo para detectar posibles fugas y evitar la contaminación del suelo y las aguas subterráneas. La remediación de suelos contaminados también es un tema importante en este país, y existen diversas tecnologías y estrategias disponibles para tal fin. En resumen, la protección del medio ambiente y la seguridad en los almacenamientos de gasolina es una preocupación constante tanto en Estados Unidos como en otros países.

12. LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

Teniendo en cuenta la relevancia que tiene la contaminación del suelo y del agua subterránea en la actualidad, es fundamental realizar estudios e investigaciones que permitan conocer con mayor profundidad dichos fenómenos. Estas investigaciones son necesarias para identificar las principales causas y efectos de la contaminación, evaluar los riesgos asociados y proponer soluciones efectivas para minimizar los impactos negativos en el medio ambiente y en la salud humana. En este sentido, las líneas de investigación mencionadas anteriormente son de gran importancia, ya que se enfocan en aspectos clave como la evaluación de la calidad de los suelos y las aguas subterráneas, el comportamiento de los pesticidas y la restauración de los ecosistemas. Por tanto, es imprescindible continuar promoviendo y fomentando la investigación en este campo, para avanzar hacia un futuro sostenible y asegurar la protección del medio ambiente y de la salud pública.

Análisis de los resultados de programas de monitorización de calidad de suelos en el entorno de tanques de almacenamiento subterráneo: Esta línea de investigación busca evaluar la calidad de los suelos en zonas cercanas a tanques de almacenamiento subterráneo, con el fin de detectar posibles fugas y reducir los impactos de la contaminación.

Desarrollo de nuevos modelos matemáticos en zona vadosa para la caracterización de la distribución de contaminantes orgánicos en las fases y que permita considerar medios heterogéneos: Esta línea de investigación se centra en la creación de modelos matemáticos que permitan predecir la distribución de contaminantes orgánicos en la zona vadosa, con el objetivo de caracterizar y entender mejor el transporte de contaminantes en medios heterogéneos.

Investigación de la contaminación del suelo en función del riesgo para la salud: Esta línea de investigación se enfoca en evaluar la contaminación del suelo en función del riesgo para la salud humana, buscando identificar los contaminantes que representan un mayor riesgo y proponiendo estrategias para reducir dicho riesgo.

Estudio del comportamiento de pesticidas en el suelo y aguas subterráneas: Esta línea de investigación tiene como objetivo estudiar el comportamiento de los pesticidas en el suelo y en las aguas subterráneas, con el propósito de entender mejor su movimiento y los posibles efectos negativos en el medio ambiente.

Evaluación de las concentraciones de pesticidas y contaminantes emergentes en aguas subterráneas y suelos: Esta línea de investigación busca evaluar la concentración de pesticidas y contaminantes emergentes en el suelo y en las aguas subterráneas, con el fin de determinar su impacto en el medio ambiente y en la salud humana.

Estudio sobre la calidad de las aguas subterráneas en relación con la contaminación del suelo: Esta línea de investigación se enfoca en estudiar la calidad de las aguas subterráneas en relación con la contaminación del suelo, considerando los posibles impactos en los ecosistemas y en la salud pública.

Desarrollo de tecnologías y estrategias de descontaminación y restauración de suelos y aguas subterráneas: es fundamental desarrollar tecnologías y estrategias de descontaminación y restauración que permitan minimizar los efectos negativos de este fenómeno. A través de la investigación y el estudio de las diferentes técnicas disponibles, es posible diseñar soluciones específicas y efectivas para recuperar los suelos y las aguas subterráneas contaminadas.

13. BIBLIOGRAFÍA

- Alcaldía de Barranquilla. (2005). *DECRETO No. 0117 de Julio 29 de 2005 - 0154 del 6 de septiembre de 2000 fue adoptado el Plan de Ordenamiento Territorial del Distrito Especial, Industrial y Portuario de Barranquilla*. Recuperado de <https://www.cideu.org/wp-content/uploads/2019/12/dec0117.pdf>
- Alcaldía de Barranquilla. (2014). *Decreto No. 0212 de 2014: Adopción del Plan de Ordenamiento Territorial (POT) del Distrito de Barranquilla*. Recuperado de <https://barranquilla.eregulations.org/media/Decreto%200212%20de%202014%20ad%20opta%20POT.pdf>
- Anria, M., González, A., & Quintero, R. (s.f.). *Modelado de la isoterma de adsorción de zanahorias deshidratadas*. Panamá. Obtenido de <https://revistas.utp.ac.pa/index.php/id-tecnologico/article/view/2093/3530>
- ATSDR. (s.f.). *Hojas Informativas de Salud Pública: Hidrocarburos totales de petróleo (TPH)*. Recuperado de https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_ph123.html
- Autor desconocido, "Operación, Cierre y Post Cierre de Depósitos de Relaves," Servicio Nacional de Geología y Minería, Gobierno de Chile, julio de 2018, <https://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2018/07/NormativasInternacionalesRelaves.pdf>.
- Autor desconocido. (2017). *Residuos de construcción y demolición (RCD), una perspectiva de gestión integrada y sostenible*. *Ingeniería y Universidad*, 32(2), 275-303. Recuperado de <http://www.scielo.org.co/pdf/inde/v35n2/2145-9371-inde-35-02-00533.pdf>
- Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. (s. f.). *Leychile. Consulta de Normas vigentes por temas*. Recuperado de https://www.bcn.cl/leychile/consulta/listado_n_sel?agr=1020
- Boletín Oficial del Estado. (2003, 21 de febrero). Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano. BOE nm. 45. Referencia: BOE-A-2003-3596. Recuperado de <https://www.boe.es/buscar/pdf/2003/BOE-A-2003-3596-consolidado.pdf>
- Boletín Oficial del Estado. (2022, 27 septiembre). *Real Decreto 1040/2022, de 26 de septiembre, por el que se aprueba el Plan Nacional de Reducción del Uso de Productos Fitosanitarios*. Boletín Oficial del Estado, no. 234, pp. 66391-66426. Recuperado de https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2022-23052
- Catálogo Mexicano de Normas. *Secretaría de Economía, Gobierno de México*, <http://www.2006-2012.economia.gob.mx/comunidad-negocios/normalizacion/catalogo-mexicano-de-normas>.
- Centro de Información de Plaguicidas y Productos Tóxicos. (s.f.). *Propuesta Anexo 1 [Documento en PDF]*. Recuperado el 20 de junio de 2023 de <https://www.cip.org.ec/attachments/article/1579/PROPUESTA%20ANEXO%201.pdf>.
- Código Internacional para la Protección de los Buques y de las Instalaciones Portuarias (*Código PBIP*). FAO, 2004, www.fao.org/faolex/results/details/es/c/LEX-FAOC051711/.

- Comunidad Andina. (2022). *Informe del Observatorio Andino del Mercurio*. Roco Santibez Acosta - Ministerio del Ambiente del Perú. Elizabeth Huanca - Secretara General de la Comunidad Andina SGCAN. Recuperado de <https://www.comunidadandina.org/wp-content/uploads/2022/08/I-Informe-Observatorio-Andino-del-Mercurio.pdf>
- Coronas, V. (2013). *Tema 6. Adsorción*. Obtenido de <https://www.cartagena99.com/recursos/alumnos/apuntes/ADSORCION.pdf>
- Corporación Integral del Medio Ambiente. (2015). *Informe de monitoreo de hidrocarburos totales de petróleo (TPH) sobre el suelo en un sector de San Salvador, Colombia*. Revista Colombiana de Química, 44(3), 27-32. <http://dx.doi.org/10.15446/rev.colomb.quim.v44n3.55605>
- Corporación Integral del Medio Ambiente. (2015). *Informe de monitoreo de hidrocarburos totales de petróleo (TPH) sobre el suelo en un sector de San Salvador, Colombia*. Revista Colombiana de Química, 44(3), 27-32. Recuperado de <http://www.scielo.org.co/pdf/rcq/v44n3/v44n3a02.pdf>
- Corte Interamericana de Derechos Humanos. (s.f.). *Referencia a determinada categoría de personas, de objetos o de relaciones*. Recuperado de <https://www.corteidh.or.cr/tablas/29157.pdf>
- Diario Oficial de la Federación. (2013). *Reto docente: diseño de proyectos didácticos para la enseñanza*. Recuperado el 20 de junio de 2023 de https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5313544&fecha=10/09/2013.
- EL BENZO(A)PIRENO UN GENOTXICO DE IMPORTANCIA EN LA CONTAMINACION AMBIENTAL Y UN POSIBLE RIESGO PARA LA SALUD HUMANA*. Diario Oficial de la Federación, Gobierno de México, 10 de septiembre de 2013, https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5313544&fecha=10/09/2013#gsc.tab=0.
- Fetter, C. W. (1999). *Contaminant Hydrogeology*. Prentice Hall.
- FETTER, C. W. (2001). *Applied Hydrogeology*. Prentice Hall.
- FREEZE, R. A. & CHERRY, J. A. (1979). *Groundwater*. Prentice Hall.
- FRIED, J. J. (1975). *Groundwater Pollution*. Elsevier Scientific Publishing Company.
- Fundamentos modelo ambiental 1*. (s.f.). En Scribd. Recuperado el 20 de junio de 2023, de <https://es.scribd.com/document/520860912/FUNDAMENTOS-MODEL-AMBIENTAL-1>.
- Gámez Salazar, J. M. (2011). *Descontaminación por extracción de vapores a vacío de diferentes compuestos orgánicos volátiles en aguas residuales. (Tesis de maestría)*. Universidad de Málaga, España.
- Geankoplis, C. (1998). *Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias*. Minnesota.
- GHANBARIAN-ALAVIJEH, B. et al. (2010). *Estimation of the van Genuchten Soil Water Retention Properties from Soil Textural Data*. Soil Science Society of China.
- HILLEL, D. (1980). *Fundamentals of Soil Physics*. Academic Press.

- IDEAM. (2017). *Resolución 2254 - Niveles calidad del aire*. Recuperado de <http://www.ideam.gov.co/documents/51310/527391/2.+Resoluci%C3%B3n+2254+de+2017+-+Niveles+Calidad+del+Aire..pdf/c22a285e-058e-42b6-aa88-2745fafad39f>
- Instituto Geológico y Minero de España. (s.f.). *Evaluación del riesgo geológico*. Recuperado de http://info.igme.es/SidPDF/067000/080/67080_0001.pdf
- Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo [INSHT]. (s, f.). *Capítulo 74. Minas y Canteras*
<https://www.insst.es/documents/94886/161971/Cap%C3%ADtulo+74.+Minas+y+canteras>
- La Moncloa. (27 de diciembre de 2022). *Referencia del Consejo de ministros*. Recuperado de <https://www.lamoncloa.gob.es/consejodeministros/referencias/Paginas/2022/refc20221227.aspx>
- LAHVIS, M. A. & GAEHR, A. L. (1997). *Documentation of R-Unsat, a computer model for the simulation of reactive, multispecies transport in the unsaturated zone*. U. S. Geological Survey.
- Lamas, V. I. (2021). *Proceso de implementación del Sistema de Gestión Documental en la Universidad Garcilaso de la Vega. CORE*. Recuperado de <https://core.ac.uk/download/pdf/230572406.pdf>
- LAWRENCE, S. J. (2006). *Description, Properties, and Degradation of Selected Volatile Organic Compounds Detected in Ground Water. A review of Selected Literature*. U. S. Geological Survey.
- LEUSCH, F. Y BARTKOW, M. (2010). *A short primer on benzene, toluene, ethylbenzene and xylenes (BTEX) in the environment and in hydraulic fracturing fluids*. Griffith University. Smart Water Research Centre.
- Ley de Recursos Hídricos - LEY N 29338 de 2009. Recuperado de https://www.ana.gob.pe/sites/default/files/normatividad/files/ley_29338_0_2.pdf.
- Libro Blanco del Agua en España: *Plan de Recuperación del Júcar*. Confederación Hidrográfica del Júcar. Recuperado de : https://www.chj.es/eses/medioambiente/planificacionhidrologica/Documents/Plan%20de%20Recuperaci%C3%B3n%20del%20J%C3%BAcar/Cap.3_part2._Libro_blanco_del_agua.pdf
- LYMAN, W. J., REEHL, W. F. & ROSENBLATT D. H. (1990). *Handbook of chemical property estimation methods*. American Chemical Society.
- Maldonado, J. H. (2020). *Políticas de Suelo, Derecho Urbanístico y Cambio Climático: Una Introducción*. Lincoln Institute of Land Policy. Recuperado de https://www.lincolninst.edu/sites/default/files/pubfiles/maldonado_wp20mm1sp.pdf
- Marco Normativo. Secretaría del Medio Ambiente, Gobierno de la Ciudad de México, <https://sedema.cdmx.gob.mx/secretaria/marco-normativo>.

MIKE POWERED BY DHI. *Feflow* <http://releasenotes.dhigroup.com/2017/FEFLOWrelinf.htm?utm_source=download&utm_medium=website&utm_campaign=mpbd-rel-2017> [Consulta: 30/07/2018].

MINAM. (2014). *Guía para muestreo de suelos*. Recuperado de https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2014/04/GUIA-MUESTREO-SUELO_MINAM1.pdf

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2018). *Informe integral de seguimiento a las políticas de gestión y manejo ambiental de 2014 a 2018*. Recuperado de https://archivo.minambiente.gov.co/images/planeacion-y-seguimiento/pdf/Informes_de_Gesti%C3%B3n/Informe_de_Gesti%C3%B3n_MADS/Informe_integral_de_seguimiento_Pol%C3%ADticas_2014_-_2018.pdf

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (s.f.). *Contaminación atmosférica*. Recuperado el 20 de junio de 2023 de <https://www.minambiente.gov.co/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/contaminacion-atmosferica/>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (s.f.). *Vertimientos y reuso de aguas residuales*. Recuperado de <https://www.minambiente.gov.co/gestion-integral-del-recurso-hidrico/vertimientos-y-reuso-de-aguas-residuales/>

Ministerio de Transición Ecológica y Reto Demográfico. (2015). *Manual para la gestión de vertidos*. Recuperado de https://www.miteco.gob.es/es/agua/publicaciones/Manual_para_la_gestion_de_vertidos_tcm30-137170.pdf

Ministerio del Ambiente del Perú. (s, f.). *Límite Máximo Permisible (LMP)*. Recuperado de <https://infoaireperu.minam.gob.pe/limite-maximo-permisible-lmp/>

Ministerio del Medio Ambiente, Gobierno de Chile, "*Guía Metodológica para la Investigación de Suelos Contaminados en Chile*", octubre de 2019, <https://fch.cl/wp-content/uploads/2019/10/guia-metodologica-suelos-digitalbaja-1.pdf>.

Ministerio para la Transición Ecológica, Gobierno de España, "*Guía Técnica para la Declaración de Suelos Contaminados*", septiembre de 2020, https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/suelos-contaminados/guia_tecnica_contaminantes_suelo_declaracion_suelos_tcm30-185726.pdf.

NACE, R. L. (1971). *Scientific framework of world water balance*. UNESCO Tech Papers Hydrology.

National Human Rights Commission [CNDH]. (2018). *Estudio sobre protección de ríos, lagos y acuíferos* https://www.cndh.org.mx/sites/all/doc/Informes/Especiales/ESTUDIO_RIOS_LAGOS_ACUIFEROS.pdf

NING, L. & LIKOS, W. J. (2004). *Unsaturated soil mechanics*. Wiley.

NORMA Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, *Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio*

y vanadio en sitios con actividad industrial, comercial y de servicios. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 30 de diciembre de 2005.

Normatividad Sanitaria. Secretaría de Salud, Gobierno de México, www.gob.mx/salud/en/documentos/normas-oficiales-mexicanas-9705.

OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH ADMINISTRATION (OSHA). *Occupational Exposure Limits.* <<https://www.osha.gov/>> [Consulta: 13/06/2018].

OFFICE OF TECHNOLOGY ASSESSMENT (1995). Cleaning up contaminated wood-treating sites. Congress of The United States.

OGATA, A. & BANKS, R. B. (1970). *A solution of the differential equation of longitudinal dispersion in porous media.* U. S. Geological Survey Professional Paper 411-A.

OGATA, A. (1970). *Theory of dispersion in a granular medium.* U. S. Geological Survey Professional Paper 411-I.

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (1996). *Ley General del Ambiente : [Ley núm. 25.675].* Recuperado el 20 de junio de 2023 de <https://www.fao.org/faolex/results/details/es/c/LEX-FAOC051711/>

Organización de los Estados Americanos. (s.f.). *Armonización de los estándares de agua potable en las Américas.* Recuperado de <https://www.oas.org/dsd/publications/classifications/Armoniz.EstandaresAguaPotable.pdf>

ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD (1989). *Indoor air quality: organic pollutants.*

ORREGO, X. C. & ARUMÍ, J. L. (2005). *Transporte de agua y soluto en la zona no saturada. Ciencia Ahora.*

Peña, M. (2017). *Informe 107 de la Honorable Cámara de Diputados de la Nación - Tomo I [Informe],* https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/informe_107_hcdn_tomo-i.pdf.

Profepa. (2004). *Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004.* Recuperado el 20 de junio de 2023 de https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/1392/1/nom-147-semarnat_ssa1-2004.pdf.

PROPUESTA ANEXO 1: *PLAN DE MONITOREO DE EFLUENTES DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES,* Corporación de Investigación y Proyectos Ambientales CIPA, <https://www.cip.org.ec/attachments/article/1579/PROPUESTA%20ANEXO%201.pdf>.

RAVI, V & JOHNSON, J. A. (1997). *A One-Dimensional Finite Difference Vadose Zone Leaching Model.* U. S. Environmental Protection Agency.

RODRIGO, J. (2016). *Conceptos básicos de hidrogeología. No publicado.* Universidad Politécnica de Valencia. Máster de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos. Ingeniería Ambiental.

SCHWARZENBACH, R. P., GSCHWEND, P. M. & IMBODEN D. M. (1993). *Environmental Organic Chemistry.* Wiley.

- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT]. (2013). *Norma Oficial Mexicana NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012, Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y lineamientos para el muestreo en la caracterización y especificaciones para la remediación*, https://www.sea.gob.cl/sites/default/files/migration_files/Normas_secundarias/Anejo_documental/Estados_Unidos_Mexicanos/Suelo/ME-SU-01-138.pdf
- Secretaría del Medio Ambiente. (s.f.). *Marco normativo*. Recuperado el 20 de junio de 2023 de <https://sedema.cdmx.gob.mx/secretaria/marco-normativo>.
- SPATIAL ANALYSIS AND DECISION ASSISTANCE (SADA). <<https://www.sadaproject.net>> [Consulta: 30/07/2018].
- SPEIGHT, J. (2011). *Handbook of Industrial Hydrocarbon Processes*. Gulf Professional Publishing.
- STANFORD GEOSTATISTICAL MODELING SOFTWARE (SGEMS). <<http://sgems.sourceforge.net/>> [Consulta: 30/07/2018].
- TERRACOTTEM. (23 de 06 de 2021). *Curva de retención de agua*. Obtenido de <https://www.terracottem.com/es/preguntas-frecuentes-blog/cuanto-mayor-sea-la-capacidad-de-retencion-de-agua-de-un-acondicionador-de-suelo-mas-agua-estara>
- The United States Environmental Protection Agency. (1997). *A One-Dimensional Finite Difference Vadose Zone Leaching Model*. Version 2.2, Office of Research and Development, Ada, Oklahoma 74820. Obtenido de <https://www.epa.gov/sites/default/files/2014-08/documents/vleach.pdf>
- TINDALL, J. A. & KUNKEL, J. R. (1999). *Unsaturated zone hydrology*. Prentice Hall.
- TREFY, M. G. & MUFFELS, C. (2007). *Feflow: A finite-element ground water flow and transport modeling tool*. Wiley.
- Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos (UAESP). (2021). *Modelo de aprovechamiento*. Recuperado de Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (s.f.).
- UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. *Software*. <<https://www.ars.usda.gov/research/software/>> [Consulta: 30/07/2018].
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (1998). *Innovative site remediation technology*. Volume 1: Bioremediation.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (1998). *Innovative site remediation technology*. Volume 7: Vacuum Extraction and Air Sparging.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (2000). *Contaminant Sorption by Soil and Bed Sediment*. <<https://toxics.usgs.gov/pubs/FS-087-00/fs-087-00.pdf>> [Consulta: 20/06/2017].
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Benzene* <<https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-09/documents/benzene.pdf>> [Consulta: 05/06/2017].

- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Ethylbenzene*. <<https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-09/documents/ethylbenzene.pdf>> [Consulta: 05/06/2017].
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Frequent Questions About Underground Storage Tanks*. <<https://www.epa.gov/ust/frequent-questions-about-underground-storage-tanks#pane-2>> [Consulta: 30/07/2018].
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. National Primary Drinking Water Regulations. <<https://www.epa.gov/ground-water-and-drinking-water/national-primary-drinking-water-regulations>> [Consulta: 05/06/2018].
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Technical Overview of Volatile Organic Compounds*. <<https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/technical-overview-volatile-organic-compounds>> [Consulta: 02/06/2017].
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Toluene* <<https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-09/documents/toluene.pdf>> [Consulta: 05/06/2017].
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Typical Wastes Generated by Industry Sectors* <<https://www.epa.gov/hwgenerators/typical-wastes-generated-industry-sectors>> [Consulta: 07/06/2017].
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Xylene*. <<https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-09/documents/xylenes.pdf>> [Consulta: 05/06/2017].
- UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. *Software* <<https://www.usgs.gov/products/software/water>> [Consulta: 30/07/2018].
- UPME. (s.f.). *Normatividad ambiental*. Recuperado de http://www.upme.gov.co/guia_ambiental/carbon/gestion/politica/normativ/normativ.htm
- VAN GENUCHTEN, M. TH. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*.
- Voisin, L., Marambio, E., Pavez, V., & Pavez, K. (2011). *Conductividad Térmica y Ley de Fourier*. Obtenido de https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2011/2/MI3010/1/material_docente/bajar?id_material=396193
- WEIGHT, W. Y SONDEREGGER, J. (2000). *Manual of Applied Field Hydrogeology*. McGraw-Hill.
- YANG, Y., LI, J., XI, B., WANG, Y., TANG, J., WANG, Y., ZHAO, C., (2017) *Modeling BTEX migration with soil vapor extraction remediation under low-temperature conditions*. *Journal of environmental management*.