



UNIVERSIDAD DE CHILE -FACULTAD DE CIENCIAS -ESCUELA DE CIENCIAS
AMBIENTALES Y BIOTECNOLOGÍA

**“Remediación de suelo contaminado con gasolina utilizando el método
Extracción de Vapores del Suelo combinado con Oxidación Catalítica”**

Seminario de Título entregado a la Universidad de Chile en cumplimiento parcial de los
requisitos para optar al Título de Química Ambiental

CONSTANZA TERESA LEÓN BARRUETO

Director del Seminario de Título:
Ing. JOSÉ MANUEL BELLALTA ARÁN

Profesora patrocinante:
M. Cs. SYLVIA COPAJA CASTILLO

Noviembre 2022
Santiago - Chile



INFORME DE APROBACIÓN SEMINARIO DE TÍTULO

Se informa a la Escuela de Ciencias Ambientales y Biotecnología de la Facultad de Ciencias, de la Universidad de Chile que el Seminario de Título, presentado por la **Sr(ta). Constanza Teresa León Barrueto**

“Remediación de suelo contaminado con gasolina utilizando el método Extracción de Vapores del Suelo combinado con Oxidación Catalítica”

Ha sido aprobado por la Comisión de Evaluación, en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al Título de Química Ambiental

Director Seminario de Título: _____

Sr. Manuel José Bellalta Arán

Profesora Patrocinante: _____

M. Cs. Sylvia Copaja Castillo

Comisión Revisora y Evaluadora

Presidente Comisión: _____

Dr. Álvaro Aliaga Cerón

Evaluador: _____

Dr. Carlos Manzano Dávila

Santiago de Chile,

RESEÑA



Constanza Teresa León Barrueto, hija de Ruby de las Mercedes Barrueto Hormazábal y Juan Ramón León Suazo, nació un 25 de septiembre de 1995 en la ciudad de Santiago, comuna de Providencia. Desde pequeña sintió gran admiración por la naturaleza y los animales teniendo como una de sus opciones cuando apenas iba en kínder el ser veterinaria. A medida que fue creciendo y adquiriendo ramos más específicos de ciencias comenzó a sentir gran admiración por la química, convirtiéndose en uno de sus ramos favoritos. Ya terminando la educación media estaba indecisa en qué estudiar, de hecho, habiendo rendido PSU aún no tenía una carrera elegida para poder seguir con sus estudios universitarios. Más tarde, junto con su grupo de amigos del colegio decidieron ir a una feria universitaria ubicada en Estación Mapocho, donde había un pequeño stand de la Universidad de Chile y le llamó la atención una carrera que se llamaba Química Ambiental. Al preguntar de qué se trataba quedó maravillada, ya que unía dos de las cosas que más le gustaban, la química y la naturaleza, por lo que decidió entrar a la carrera de Química Ambiental sin pensarlo dos veces. Con 18 años, en el año 2014 empezó la carrera universitaria tan anhelada, siendo el orgullo de su familia al haber entrado a la Universidad de Chile, ya que sus padres y abuelos no lograron tener estudios universitarios. Entre altos y bajos a lo largo de los años, logró egresar el año 2021 con distinción.

AGRADECIMIENTOS

Primero que nada, me gustaría agradecer a mi familia por estar siempre pendiente de mi desarrollo académico, apoyarme y confiar en mi para transmitir mi conocimiento a las generaciones más pequeñas de la familia.

Al Sr. José Manuel Bellalta por darme la oportunidad de poder realizar mi Seminario de Título en su empresa GB CINCO Ambiental, a mi papá por haber conseguido el dato de esta empresa que realiza remediación de suelos y aguas y a la profesora Sylvia Copaja por ser mi patrocinante y ayudarme en todo lo que necesitara.

A mi mamá por haber estado presente en todo el proceso de la universidad y haberme apoyado económicamente en lo que necesitara.

A todos mis amigos de la u, en especial a Constanza Oñate, Carol Salazar y Pamela Ayala, que siempre estuvieron ahí, incluso en los momentos más difíciles y no me dejaron rendirme pese al mal panorama que se veía en algunas situaciones.

Finalmente, me gustaría agradecer a un hombre muy importante en mi vida, Ignacio Pincheira, que me ayudó muchas veces a estudiar, quedándose conmigo hasta las 4 – 5 de la mañana para poder pasar los ramos que más me costaron, estando también presente durante toda la universidad y apoyándome cada vez que lo necesitaba, ya fuera en ámbito académico o emocional.

Muchas gracias a todos y todas, cada uno tiene un espacio en mi corazón.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE TABLAS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
LISTA DE ABREVIATURAS	ix
RESUMEN	x
ABSTRACT	xii
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Generalidades	1
1.2 Suelo.....	4
1.2.1 Composición del suelo.....	4
1.2.2 Textura del suelo.....	5
1.2.2.1 Suelo fino	5
1.2.2.2 Suelo grueso.....	7
1.3 Contaminantes Orgánicos.....	8
1.3.1 Hidrocarburos	8
1.3.2 Compuestos Orgánicos Volátiles.....	10
1.3.3 Gasolina	10
1.4 BTEX: Comportamiento en el ambiente y efectos en la salud.....	11
1.4.1 Benceno	12
1.4.2 Tolueno.....	13
1.4.3 Etilbenceno	14
1.4.4 Xilenos.....	15
1.5 Legislación sobre derrame de gasolina en suelos.....	18
1.5.1 Legislación Chilena de Suelos.....	18
1.5.2 Legislación Canadiense de Alberta.....	19
1.6 Remediación de suelos por contaminación con gasolina	20
1.6.1 Extracción de vapores del suelo.....	22
1.6.2 Tratamiento de vapores liberados del suelo.....	23
1.7 Objetivos.....	24

1.7.1 General.....	24
1.7.2 Específicos.....	24
II. MATERIALES Y MÉTODOS.....	25
2.1 Materiales utilizados.....	25
2.2 Metodología de la remediación del suelo.....	26
2.2.1 FASE I. Identificación de potencial o existente contaminación ambiental	27
2.2.2 FASE II. Evaluación y prueba de posibles impactos en el sitio.....	28
2.3 Intervención del terreno para la instalación del equipo de trabajo.....	29
2.3.1 Realización de los pozos de extracción	29
2.3.2 Construcción de zanjas	30
2.3.3 Instalación de tuberías	31
2.3.4 Instalación de líneas eléctricas.....	31
2.3.5 Construcción del manifold o colector.....	31
2.3.6 Instalación del equipo KATOX.....	32
2.3.7 Acondicionamiento térmico.....	33
2.3.8 Acondicionamiento acústico.....	33
2.4 Funcionamiento del equipo Extracción de Vapores KATOX.....	33
2.5 Medición de COV.....	37
2.5.1 Análisis en terreno	37
2.5.2 Análisis en laboratorio.....	39
III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	41
3.1 Informe Fase I.....	41
3.1.1 Antecedentes del sitio	41
3.1.2 Descripción histórica del sitio y sus operaciones	42
3.1.3 Reconocimiento del entorno del sitio	48
3.2 Informe Fase II.....	50
3.2.1 Puesta en marcha del equipo KATOX.....	52
3.2.2 Análisis de la interacción entre el suelo y los BTEX	60
3.2.3 Análisis de la oxidación catalítica de los COV.....	61
3.2.4 Muestreo de verificación	65

IV. CONCLUSIONES	69
V. REFERENCIAS	71
ANEXOS	81
ANEXO 1: Componentes de un cromatógrafo de gases.	81
ANEXO 2: Perfiles de los pozos de extracción.....	87
ANEXO 3: Datos entregados por el equipo KATOX.	90

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Tamaño de las partículas del suelo para un suelo fino.....	6
Tabla 2: Clasificación de suelo grueso, fragmentos de roca con sus tamaños.....	7
Tabla 3: Productos que se obtienen de un fraccionamiento de crudo de petróleo.	9
Tabla 4. Principales características de los BTEX.	17
Tabla 5: Niveles guía de calidad de suelos según Tabla A-9 y A-10 (AEP, Land Policy, 2016, No. 3).....	20
Tabla 6: Niveles guía de calidad de suelos según Tabla A-8 (AEP, Land Policy, 2016, No. 3).	20
Tabla 7: Potenciales de ionización de los BTEX.	38
Tabla 8: Características de la estación de servicio.....	43
Tabla 9: Certificado de aprobación de los sistemas de recuperación de vapores de combustibles.....	45
Tabla 10: Certificado de aprobación de los sistemas de recuperación de vapores de combustibles luego del cambio de estanques y líneas.	47
Tabla 11: Características actuales del SASH (Sistema de Almacenamiento Subterráneo de Hidrocarburos).	47
Tabla 12: Propiedades aledañas al sitio.	48
Tabla 13: Datos obtenidos en los pozos de extracción a diferentes profundidades.	51
Tabla 14: Valores iniciales del equipo KATOX.	52
Tabla 15: Valores obtenidos por análisis de gases en laboratorio durante la remediación.	53
Tabla 16: Consumo eléctrico mensual del equipo KATOX.	54
Tabla 17: Promedios mensuales de parámetros obtenidos del sistema de aspiración.....	55
Tabla 18: Datos utilizados para calcular masa de contaminantes destruida.	56
Tabla 19: Cantidad de tiempo en funcionamiento del equipo KATOX mensualmente. .	59
Tabla 20: Etapas de la interacción entre catalizador y contaminante.	62
Tabla 21: Valores de COV obtenidos con el PID en muestreos de verificación.	66
Tabla 22: Resultados obtenidos de los muestreos de verificación comparados con la Normativa de Alberta.....	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Composición del suelo.....	5
Figura 2: Triangulo textural para determinar textura del suelo.....	6
Figura 3: Estructura del benceno.....	8
Figura 4: Estructura de los BTEX.....	11
Figura 5: Herramientas utilizadas para la perforación del suelo.....	29
Figura 6: Proceso de construcción de zanjas.....	30
Figura 7: Instalación de cañerías y llenado de zanjas.	31
Figura 8: Manifold instalado.....	32
Figura 9: Equipo de descontaminación KATOX 1603.	32
Figura 10: Acondicionamiento térmico.	33
Figura 11: Esquematización del equipo KATOX.....	34
Figura 12: Triángulo del fuego	36
Figura 13: Toma de muestra en terreno con sensor de COV mediante fotoionización (PID).	37
Figura 14: Mapa de Santiago de Chile.....	41
Figura 15: Modelo conceptual Fuente-Ruta-Receptor de los contaminantes.	49
Figura 16: Imagen referencial del perfil del suelo obtenido de los pozos de extracción.	51
Figura 17: Representación gráfica de la disminución de los gases influentes.	53
Figura 18: Representación gráfica de la oxidación acumulada de los contaminantes.	57
Figura 19: Reacción heterogénea catalizada por un sólido.....	62
Figura 20: Zonas de muestreo posterior a la remediación.	65

LISTA DE ABREVIATURAS

SVE	Soil Vapor Extraction – Extracción de Vapores del Suelo
BTEX	Benceno, Tolueno, Etilbenceno, Xileno
COV	Compuestos Orgánicos Volátiles
ASTM	American Society for Testing and Materials – Sociedad Americana de Ensayos de Materiales
SPC	Suelos con Presencia de Contaminantes
LEL	Límite Inferior de Explosividad
ISO	International Organization for Standardization – Organización Mundial de Estandarización.
RAE	Real Academia Española
USDA	U.S. Department of Agriculture - Departamento de Agricultura de los Estados Unidos
EPA	United States Environmental Protection Agency – Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos
ILO	International Labour Organization
IARC	International Agency for Research on Cancer – Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer
CL	Combustibles líquidos derivados del petróleo y biocombustibles
GC	Cromatografía de gases
FID	Detector de ionización de llama
GC-MS	Cromatografía de gases con detector de espectrometría de masas
SASH	Sistema de Almacenamiento Subterráneo de Hidrocarburos
UST	Underground storage Tank – Tanque de Almacenamiento Subterráneo
WCOT	Wall Coated Open Tubular – Tubular Abierta con Pared Recubierta
PLOT	Porous Layer Open Tubular – Tubular Abierta con película Porosa
SCOT	Support Coated Open Tubular – Tubular Abierta con Soporte Recubierta

RESUMEN

Un suelo se puede encontrar contaminado con compuestos peligrosos como la gasolina, de la cual emanan gases que pueden ser perjudiciales, tanto para la salud de las personas como para el ecosistema. Por esto es necesario remediar el suelo contaminado por hidrocarburos, especialmente Compuestos Orgánicos Volátiles (COV) como la gasolina. Para lograr su remediación existen diferentes métodos, como, por ejemplo, la Extracción de Vapores del Suelo mediante vacío (SVE), técnica física de bajo costo que comprende un periodo de remediación entre 6 meses y 2 años, dependiendo de las características del suelo y de las concentraciones que se pretende alcanzar. Este método requiere conocer las características y condiciones en las que se encuentra el suelo para determinar cuánto tiempo podría demorar su remediación. Además, se utiliza la Oxidación Catalítica con un equipo KATOX, proceso químico de oxidación por el que pasan las moléculas extraídas desde el suelo transformándose en agua y dióxido de carbono, lo que permite que no sean perjudiciales al ser liberadas a la atmósfera.

En este seminario de título se evaluó un derrame de gasolina ocurrido en una estación de servicio de una zona urbana, teniendo como objetivo principal la descontaminación del suelo. Para ello se realizaron perforaciones en el suelo con el fin de conocer la pluma de contaminación y determinar dónde se posicionarían los pozos de extracción, alcanzando una profundidad de 11 m. En cuanto a la determinación del contaminante, en primera instancia se utilizó un sensor de COV por fotoionización (PID) en forma cualitativa en terreno, donde se encontró que la mayor concentración de contaminantes se hallaba entre los 5 y 6 metros de profundidad. Posterior a ello, durante el periodo de remediación

realizado con el equipo KATOX, se enviaron a analizar mensualmente muestras extraídas de gases influentes al equipo, al laboratorio ALS LIFE SCIENCES CHILE S.A., quienes realizan la especiación con benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos (BTEX), mediante cromatografía de gases con detector de ionización de llama (GC-FID). Para finalizar la remediación, se analizaron BTEX en muestras de suelo mediante cromatografía de gases con detector de masa (GC-MS), obtenidas de nuevos pozos realizados como verificación de la efectividad del tratamiento. El tratamiento del suelo contaminado con gasolina por el método de Extracción de Vapores del Suelo se realizó por 6 meses, para poder lograr una descontaminación efectiva, llegando a obtener resultados favorables respecto a los parámetros propuestos por la normativa canadiense de Alberta (AEP, Land Policy, 2016, No. 3), en cuanto a inhalación de gases en suelo de uso comercial/industrial y suelo de uso residencial. No se logró comprobar presencia de benceno en las muestras de suelo mediante GC-MS, en el rango superior a 0,4 mg/kg, sin embargo, no se puede aseverar su presencia en valores menores; el parámetro propuesto en la normativa canadiense de Alberta es 0,14 mg/kg.

ABSTRACT

A soil can be contaminated with dangerous compounds such as gasoline, from which gases emanate that can be harmful, both for the human health and the ecosystem. For this reason, it is necessary to remediate the contaminated soil with hydrocarbons, especially Volatile Organic Compounds (VOC) such as gasoline. To achieve its remediation there are different methods, such as, for example, Soil Vapor Extraction by vacuum (SVE), low-cost physical technique that includes a remediation period of 6 months and 2 years, depending on the characteristics of the soil and the concentrations to be achieved. This method requires knowing the characteristics and conditions of the soil to determine how long it could take to remediate. In addition, Catalytic Oxidation is used with KATOX equipment, a chemical oxidation process through which the molecules extracted from the soil pass, transforming into water and carbon dioxide, which allows them not to be harmless when released into the atmosphere.

In this title seminar, a gasoline spill occurred in a service station in an urban area was evaluated, with the main objective of decontamination the soil. For this purpose, soil borings were made to know the contamination plume and to determine where the extraction wells would be positioned, reaching a depth of 11 m. Regarding the determination of the contaminant, in the first instance a photoionization VOC sensor (PID) was used qualitatively in the field, where it was found that the highest concentration of contaminants was observed between 5 and 6 meters deep. After that, during the remediation period carried out with the KATOX equipment, samples extracted form influent gases to the equipment were sent to analyzed monthly, to the external laboratory

ALS LIFE SCIENCES CHILE S.A., where they perform the speciation with benzene, toluene, ethylbenzene and xylenes (BTEX), using gas chromatography with flame ionization detector (GC-FID). Then to finalize the remediation, BTEX was analyzed in soil samples by gas chromatography with a mass detector (GC-MS), obtained from new wells carried out as verification of the effectiveness of the treatment. The treatment of soil contaminated with gasoline by the Soil Vapor Extraction method was carried out for 6 months to achieve an effective decontamination, obtaining favorable results with respect to the parameters proposed by the Canadian regulations of Alberta (AEP, Land Policy, 2016, No. 3) in terms of gas inhalation in soil for a commercial/industrial use and for a residential use soil. It was not possible to verify the presence of benzene in the soil samples by GC-MS, in the range greater than 0.4 mg/kg, however, its presence cannot be asserted in lower values; the parameter proposed by the Canadian Alberta regulation is 0.14 mg/kg.

I. INTRODUCCIÓN

1.1 Generalidades

Las personas requieren vivir en armonía con su entorno, compatibilizando los avances tecnológicos con el cuidado del medio ambiente. Las últimas décadas, se rompió la armonía con su entorno, incrementando la presencia de diversos compuestos en el ambiente, superando lo que se podría considerar natural, dando cuenta de contaminantes en zonas urbanas e industriales.

A lo largo de los años, la sociedad ha ido creando normas para poder regular la concentración de contaminantes que se presentan en suelo, agua y atmósfera. En Chile, con la ley 19300, sobre las Bases Generales del Medio Ambiente, se estipuló que todas las personas tenemos “el derecho a vivir en un ambiente libre de contaminación”, entendiéndose por contaminación “la presencia en el ambiente de sustancias, elementos, energía o combinación de ellos, en concentraciones o concentraciones y permanencia superiores o inferiores, según corresponda, a las establecidas en la legislación vigente” (Ley 19300, 2010).

En el caso del sistema suelo, Chile no cuenta con una legislación específica sobre los contaminantes que puedan afectarlo, por lo que se hace necesario utilizar una legislación internacional de referencia.

La contaminación en el suelo es diversa, en función del tipo de contaminantes y de la forma que ocurre. Algunos de los contaminantes pueden ser metales pesados,

hidrocarburos aromáticos y metales tóxicos relacionados con el petróleo. La contaminación con estos compuestos ocurre en forma directa o indirecta, tanto consecuencia de actividades planeadas como involuntarias, que pueden ser representadas como contaminación puntual o contaminación difusa. La contaminación puntual es aquella causada por un evento específico dentro de un área determinada, como la eliminación inadecuada de desechos, vertederos no controlados, entre otros. La contaminación difusa es un tipo de contaminación que se propaga por áreas extensas y se acumula en el suelo sin tener una fuente única de contaminación o de difícil identificación. Esta contaminación comprende el transporte de contaminantes a través de aire, agua y suelo, por lo que se requieren análisis complejos para poder evaluarla. Esta puede estar relacionada con efluentes contaminados liberados en cuencas o cerca de estas, el uso de plaguicidas y fertilizantes que añaden metales pesados, contaminantes orgánicos persistentes, nutrientes en exceso y agroquímicos, transportados por el agua mayormente (Rodriguez E., N. y col., 2019).

Como contaminación puntual se encuentran los hidrocarburos aromáticos, dentro de los que destacan los compuestos orgánicos volátiles (COV), los cuales, si no se tratan a tiempo, podrían afectar más áreas ambientales, no tan solo el suelo, sino que también el agua superficial, subterránea, o la atmósfera por volatilización de estos compuestos. La forma de contaminación más común de COV es la filtración accidental de tanques de almacenamiento de petróleo o gasolina. Esto puede llegar a afectar la salud del ser humano, ya sea por el agua que bebe, el aire que respira o mediante los alimentos cultivados en suelos contaminados. El poder disminuir a tiempo la expansión del

contaminante, permitirá minimizar la contaminación a aguas subterráneas, sin embargo, seguiría afectando la atmósfera, por lo que es fundamental la remediación de suelos.

La remediación de un suelo contaminado por COV, específicamente por gasolina, puede ser realizada requiriendo traslado del suelo (*ex situ*) o en el mismo sitio (*in situ*). En los métodos *ex situ* tenemos, por ejemplo, el compostaje, la biolabranza y la disposición final del suelo contaminado en un sitio apto. En los métodos *in situ* tenemos, por ejemplo, la electrocinética (FCH, 2019) y la Extracción de Vapores del Suelo (SVE), técnica implementada para extraer COV del suelo.

En la gasolina, los principales contaminantes de interés son el benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos, conocidos como BTEX. Estos contaminantes son de especial cuidado ya que sus presiones de vapor altas (entre 0,7 y 10 kPa) indican que se volatilizan con facilidad, existiendo como gas en la atmósfera, liberándose en esta y pudiendo perjudicar la salud de las personas que se encuentren cercanas a estos compuestos, ya que son inflamables, irritantes, tóxicos y nocivos para la salud, pudiendo algunos afectar al sistema nervioso central y/o producir cáncer (PubChem, 2021a; PubChem, 2021b; PubChem, 2021c; PubChem, 2021d; PubChem, 2021e; PubChem, 2021f).

Para poder realizar una remediación por SVE es recomendable seguir la metodología estandarizada por la Sociedad Americana de Ensayos y Materiales, o ASTM por sus siglas en inglés y realizar una Caracterización o Evaluación Ambiental del Sitio, donde en la Fase I, o ASTM E1527, se busca la identificación de la potencial o existente contaminación ambiental y en la Fase II, o ASTM E1903, se realiza una evaluación y

prueba de posibles impactos en el sitio. Esto con el fin de poder cuantificar y/o delimitar la afección y así encontrar la mejor alternativa para la posterior remediación. Con estos antecedentes ya es posible desarrollar un modelo conceptual Fuente-Ruta-Receptor para determinar las potenciales vías de exposición y tipos de receptor.

1.2 Suelo

El suelo tiene diferentes significados dependiendo del profesional que lo utilice. Según la Real Academia Española, el término de agricultura, indica que el suelo es un “conjunto de materias orgánicas e inorgánicas de la superficie terrestre, capaz de sostener vida vegetal” (RAE, 2021). Otra definición según la ISO 11074:2015 es que corresponde a la capa superior de la corteza terrestre, transformada por meteorización y procesos físicos/químicos y biológicos y compuesta por partículas de minerales, materia orgánica, agua, aire y organismos vivos organizados en horizontes genéricos del suelo (ISO 11074, 2015).

1.2.1 Composición del suelo

El suelo se compone por una fase sólida, una líquida y una gaseosa. Entre las partículas sólidas que componen el suelo se encuentra la materia orgánica y los minerales, que pueden formar entre la mitad y dos tercios del volumen del suelo, donde aproximadamente el 90% son compuestos inorgánicos, excepto en Histosoles (suelos de turba y fango) donde la materia orgánica corresponde a más del 50% de la materia sólida. Por otro lado, el agua y el aire forman parte del uno o dos tercios del volumen del suelo. Cuando las partículas de suelo se juntan entre ellas generan poros, los cuales pueden contener aire y/o agua, dependiendo de la saturación del suelo. Un suelo no saturado es

aquel que contiene poros con aire y agua, mientras que un suelo saturado contiene poros llenos de agua (Sposito G., 2008).

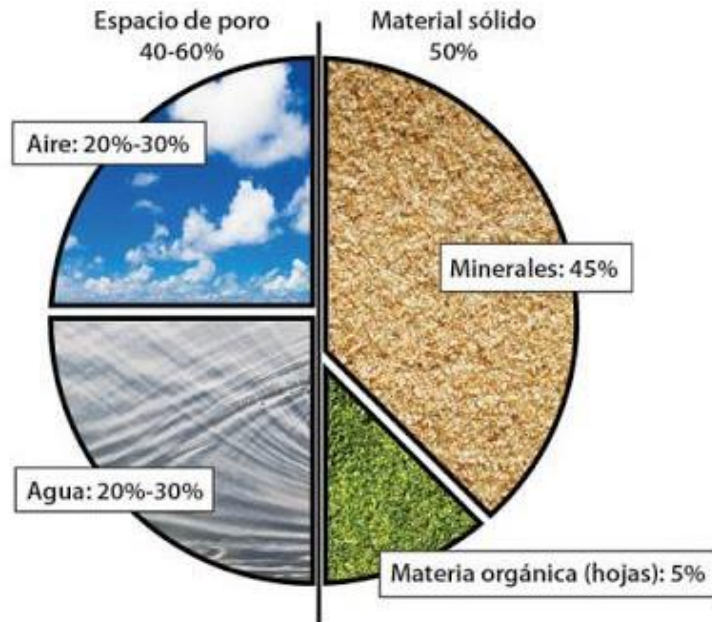


Figura 1: Composición del suelo. Imagen disponible en Cajal, A., 2017.

1.2.2 Textura del suelo

Una de las características principales para clasificar el suelo es la granulometría, la cual se basa en el tamaño de las partículas. Existen dos grandes grupos principales, donde se diferencian los suelos gruesos y los finos. Los suelos gruesos son mayores a 2 mm, mientras que los suelos finos indican partículas menores a 2 mm, según el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) (USDA, 2017).

1.2.2.1 Suelo fino

La USDA separa al suelo fino en fracciones que van desde un tamaño menor o igual a los 0,0002 mm, hasta un tamaño menor a los 2,0 mm (USDA, 2017). En la tabla 1 se pueden ver las diferentes fracciones de suelo fino con sus respectivos tamaños.

Tabla 1: Tamaño de las partículas del suelo para un suelo fino. Datos disponibles en USDA, 2017.

Facción de suelo	Tamaño	Facción de suelo	Tamaño
Arcilla fina	$\leq 0,0002$ mm	Arena muy fina	0,05 a 0,10 mm
Arcilla gruesa	0,0002 a 0,002 mm	Arena fina	0,10 a 0,25 mm
Limo fino	0,002 a 0,02 mm	Arena media	0,25 a 0,5 mm
Limo grueso	0,02 a 0,05 mm	Arena gruesa	0,5 a 1,0 mm
		Arena muy gruesa	1,0 a 2,0 mm

Hay diversos métodos para determinar la textura de un suelo, siendo el más utilizado el método de la pipeta, donde se calcula el tiempo de sedimentación de cada fracción de suelo, que ha pasado a través de un tamiz de 2 mm (separada solo en arcilla, limo y arena) y luego se lleva a un triángulo textural, para determinar por porcentajes que textura tiene el suelo estudiado (USDA, 2014).

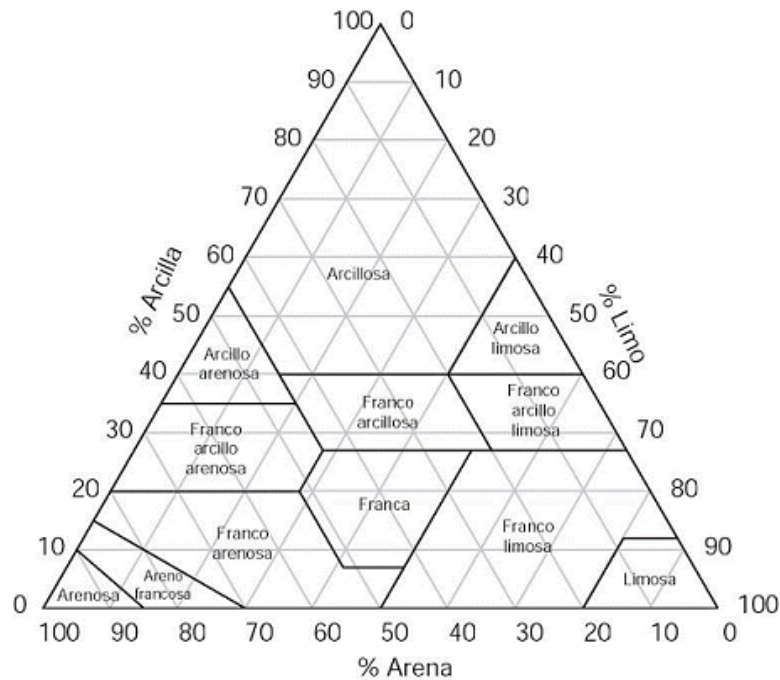


Figura 2: Triángulo textural para determinar textura del suelo. Imagen disponible en Agromática, 2022.

Otro método para determinar la textura de un suelo es el que se basa en criterios cualitativos, donde se observa cómo se siente el suelo al tacto (arenoso, liso o pegajoso) y como responde al frotar el suelo entre los dedos para formar cilindros y anillos. Si el suelo resulta ser más arenoso se notarán partículas grandes en este. Si resulta ser más limoso, se notará un tacto suave en los dedos. Si es un suelo más arcilloso se sentirá más pegajoso (USDA, 2017).

1.2.2.2 Suelo grueso

Los suelos gruesos corresponden a partículas superiores a 2 mm, comprendiendo en ellos a los fragmentos de roca. Los fragmentos de roca son aquellos que tienen una fuerte cementación, es decir, poseen una alta resistencia a la deformación, siendo rocas muy duras (USDA, 2017). En la siguiente tabla se muestran los diferentes fragmentos de roca con sus respectivos tamaños.

Tabla 2: Clasificación de suelo grueso, fragmentos de roca con sus tamaños. Datos disponibles en USDA, 2017.

Fragmentos de roca no planos	Tamaño (diámetro)	Fragmentos de roca planos	Tamaño (largo)
Grava	2 a 76 mm	Canales	2 a 150 mm
Adoquines	76 a 250 mm	Losas	150 a 380 mm
Piedras	250 a 600 mm	Piedras	380 a 600 mm
Cantos rodados	≥ 600 mm	Cantos rodados	≥ 600 mm

1.3 Contaminantes Orgánicos

1.3.1 Hidrocarburos

Los hidrocarburos son compuestos orgánicos formados por carbono e hidrógeno. El carbono tiene la capacidad de formar enlaces simples, dobles y triples consigo mismo, formando así cadenas o estructuras cíclicas. Considerando su estructura, los hidrocarburos se separan en dos tipos, que son los alifáticos y los aromáticos. Los hidrocarburos alifáticos comprenden a los alcanos (compuestos con enlace carbono-carbono simple), alquenos (compuestos con al menos un enlace carbono-carbono doble), alquinos (compuestos con al menos un enlace carbono-carbono triple) y cicloalcanos (cadenas de carbonos que se unen formando anillos de enlaces carbono-carbono simples). Por otro lado, los hidrocarburos aromáticos son aquellos que tienen como base al benceno, compuesto que posee seis carbonos unidos en un ciclo, teniendo un enlace carbono-carbono simple y uno doble intercalados (Chang, R., 2010), representándose de diferentes formas como se muestra en la figura 3.

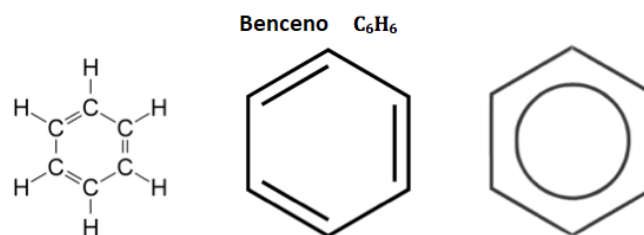


Figura 3: Estructura del benceno. Imagen disponible en Química en casa, 2022.

El petróleo contiene diferentes hidrocarburos, que van desde el C₁ al C₄₅, es decir, compuestos que contienen desde un carbono hasta cadenas con 45 carbonos, que se evaporan a diferentes temperaturas por lo que posee partes más volátiles hasta partes más

densas como el asfalto (Lladó Fernández, S., 2012). En la Tabla 3 se pueden apreciar los diferentes productos que se obtienen de una destilación fraccionada de crudo de petróleo, donde se encuentra la gasolina, objeto de estudio en este trabajo, que va desde C₆ a C₁₁, es decir, posee compuestos desde los seis carbonos hasta los once carbonos y es una de las fracciones más volátiles.

Tabla 3: Productos que se obtienen de un fraccionamiento de crudo de petróleo.
 Datos disponibles en Ortega Romero, M., 2012; Lladó Fernández, S., 2012 y
 Chang, R., 2010.

Gas natural	-161 a 20	C ₁ -C ₄	Combustible y gas de cocina
Éter de petróleo	30-60	C ₅ -C ₆	Disolvente
Gasolina ligera	20-100	C ₅ H ₁₂ -C ₇ H ₁₆	Disolvente
Benzina	70-90	C ₆ -C ₇	Lavado en seco
Ligroína	80-120	C ₆ -C ₈	Disolvente
Gasolina	20-180	C ₆ -C ₁₁	Carburante
Queroseno, jet fuel	200-300	C ₁₂ -C ₁₆	Iluminación y carburante
Gasoil, Diesel	200-350	C ₁₃ -C ₁₈	Carburante
Aceite lubricante	200-350	C ₁₆ -C ₂₀	Lubricantes
Grasas, vaselinas	250-400	C ₁₈ -C ₂₂	Farmacéutica
Cera de parafina	245-540	C ₂₀ -C ₄₅	Velas
Betún asfáltico (35% peso)	>540	C ₃₀ -C ₄₅	Alquitrán asfáltico Coque de petróleo

1.3.2 Compuestos Orgánicos Volátiles

Los Compuestos Orgánicos Volátiles (COV), son una parte importante de los compuestos orgánicos y se encuentran constituidos principalmente por carbono. Estos compuestos se convierten fácilmente en vapor o gas, teniendo a una temperatura de 20°C una presión de vapor de 0,01 kPa o más. Generalmente, sus puntos de ebullición van desde los 50°C a los 260°C. Los COV agrupan compuestos de hidrocarburos alifáticos y aromáticos, pudiendo ser estos últimos clorados o no clorados, además de otros compuestos como aldehídos, cetonas, alcoholes, éteres y ácidos. Estos compuestos orgánicos pueden ser liberados por quema de combustibles, como la gasolina, madera carbón o gas natural, además de otros tipos de fuente, como los solventes, pegamentos y pinturas entre otros.

Los COV se emiten principalmente por combustión parcial de carburantes, como la gasolina, y por la evaporación de solventes orgánicos. Estos compuestos en general, al mezclarse con óxidos de nitrógeno reaccionan formando ozono a nivel del suelo. (Sánchez M, J. y Alcántara L., A., 2007).

1.3.3 Gasolina

La gasolina es una mezcla de hidrocarburos que forma parte de la fracción ligera del crudo petróleo (Lladó Fernández, S., 2012). Se compone principalmente de compuestos aromáticos, considerándose entre un 20 y un 50% del volumen total. También contiene otro tipo de hidrocarburos, pero en menor proporción, como los alcanos (4 – 8%), alquenos (2 – 5%), isoalcanos (25 – 40%), cicloalcanos (3 – 7%) y cicloalquenos (1 – 4%) (Echevarría, M. y Molano, C., 2005). Entre los compuestos aromáticos que forman parte

de COV se encuentran los denominados BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno y xileno), los cuales son de interés ya que son peligrosos para la salud de las personas al estar en contacto con altas concentraciones de estos compuestos. Sus estructuras moleculares se encuentran en la figura 4.

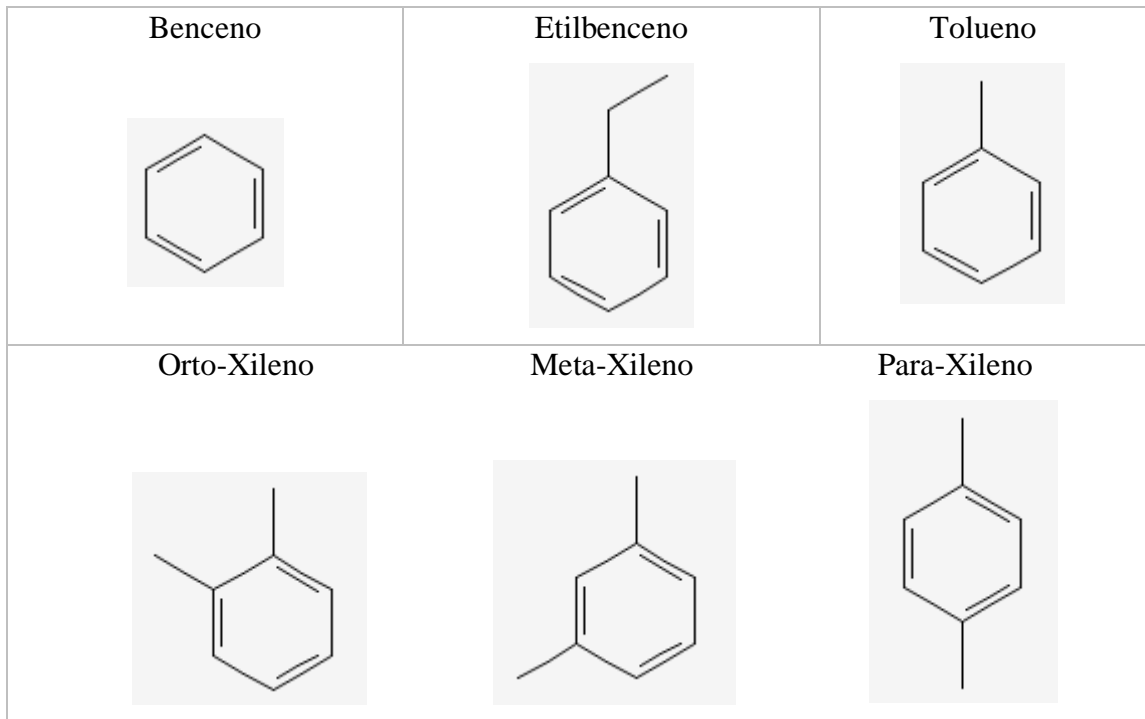


Figura 4: Estructura de los BTEX. Imágenes disponibles en PubChem, 2021.

La mayoría de los compuestos de la gasolina son insolubles en agua, o muy poco solubles, ya que suelen ser cadenas largas de hidrocarburos, sin embargo, hay compuestos que son solubles en agua, como el etanol y metanol (Echevarría, M. y Molano, C., 2005).

1.4 BTEX: Comportamiento en el ambiente y efectos en la salud

Los BTEX son los principales representantes de los COV, que al estar en estado líquido a temperatura ambiente, se caracterizan por tener contribución importante en estado gaseoso, y ser insolubles o ligeramente solubles (como el benceno) en agua. Estos

compuestos se encuentran clasificados como contaminantes peligrosos del aire según la EPA (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos), ya que se ha demostrado que algunos son cancerígenos o posibles carcinógenos (EPA, 2016).

En general, cada uno de estos contaminantes son de especial cuidado ya que existen únicamente como gas en la atmósfera, dado que sus presiones de vapor son superiores a 0,01 kPa (Sánchez M, J. y Alcántara L., A., 2007), lo cual puede perjudicar la salud de las personas que interactúen con estos compuestos.

1.4.1 Benceno

Tiene un punto de ebullición de 80°C (PRTR España, 2007a), un punto de inflamación de -11 °C y una presión de vapor de 10 kPa a 20°C (ILO, 2016). Es altamente inflamable, irritante y peligroso para la salud (PubChem, 2021a). Se evapora rápidamente y es poco soluble en agua, ya que es un compuesto no polar. En el medio ambiente se puede encontrar benceno de forma natural, pero también puede aumentar su concentración por procesos industriales, sobre todo en sectores más urbanizados. Cuando el benceno se encuentra en el suelo, puede ser biodegradado bajo condiciones aeróbicas, pero la mayor parte de este se evapora por su alta volatilidad y no se bioacumula en plantas ni animales. Una vez en el aire el benceno reacciona con los radicales hidroxilos que se encuentran en la atmósfera y se degrada en un par de días (IDEAM, 2003a). Es nocivo para los organismos acuáticos, con efectos duraderos (ILO, 2016). Con respecto a la salud, el benceno es considerado un compuesto muy tóxico, que puede entrar al cuerpo a través de los pulmones, el tubo digestivo o la piel (ATSDR, 2007a). Puede ser mortal en caso de ingesta y de penetración en vías respiratorias. Puede provocar irritación cutánea, ocular

grave, defectos genéticos, daño en el sistema inmunitario, en la médula ósea y el sistema nervioso central, luego de exposiciones prolongadas o repetitivas (ILO, 2016; PRTR España, 2007a). Exposición a niveles bajos puede producir mareo, aceleración del latido del corazón, dolor de cabeza, temblores, confusión y pérdida del conocimiento. El Departamento de Salud de Servicios Humanos ha determinado mediante estudios que el benceno es un carcinógeno en seres humanos, provocando leucemia mieloide aguda, debido a una exposición prolongada a este contaminante (ATSDR, 2007a).

1.4.2 Tolueno

Tiene un punto de ebulición de 111°C, un punto de inflamación de 4°C y una presión de vapor de 3,8 kPa a 25°C (ILO, 2002a), es altamente inflamable, irritante y peligroso para la salud (PubChem, 2021b). Es casi inmisible en agua (PRTR España, 2007c) y se evapora fácilmente. Si se coloca en sitios de disposición final puede percolar en el suelo hacia aguas subterráneas, pero también puede ser degradado por microorganismos que se encuentren en este (ATSDR, 2015). A pesar de ello, en altas concentraciones presenta toxicidad sobre la vida acuática, por lo que se cataloga como sustancia peligrosa (PRTR España, 2007c). Su permanencia en el suelo es baja por su alta volatilidad, y dependerá de la temperatura, humedad y el tipo de suelo, pero su permanencia en este es de alrededor de 24 horas. Una vez en la atmósfera es degradado por radicales hidroxilo, generando como resultado final hidrocarburos simples, en un periodo entre medio día y cuatro días y medio, dependiendo de las condiciones atmosféricas (IDEAM, 2003b). El tolueno es considerado dañino, teniendo una toxicidad inferior a la del benceno, que puede ocasionar serios daños a la salud (PRTR España, 2007c). Puede absorberse por inhalación, a través

de la piel y por ingesta, llegando a irritar los ojos y el tracto respiratorio, pudiendo ocasionar neumonitis química por aspiración. Exposición a concentraciones elevadas puede causar arritmia cardíaca y pérdida del conocimiento (ILO. 2002a). Puede afectar el sistema nervioso, provocando síntomas pasajeros como dolores de cabeza, mareo o pérdida del conocimiento. Además, puede producir incoordinación, alteraciones mentales y pérdida de la visión y audición si se está expuesto constantemente a esta sustancia. Si la exposición al tolueno es muy elevada puede sentirse somnoliento o perder el conocimiento, hasta el punto de poder llegar a fallecer. Si se expone a pequeñas cantidades diariamente se podría producir cansancio, confusión, debilidad, sensación de embriaguez, pérdida de la memoria, náuseas y pérdida del apetito, desapareciendo una vez que la exposición cesa. En personas embarazadas puede aumentar la probabilidad de tener abortos espontáneos (ATSDR, 2015).

1.4.3 Etilbenceno

Tiene un punto de ebullición de 136°C, un punto de inflamación de 18°C y una presión de vapor de 0,9 kPa a 20°C (ILO, 2007) es altamente inflamable, irritante y peligroso para la salud (PubChem, 2021c). Es poco soluble en agua (PRTR España, 2007b) y es altamente volátil, por lo que se moviliza fácilmente desde el suelo, o el agua, hacia la atmósfera y demora aproximadamente 3 días en degradarse en esta. Tiene la facilidad de percolar desde el suelo, donde puede ser degradado por bacterias, hacia aguas subterráneas (ATSDR, 2010). Este compuesto es nocivo para los organismos acuáticos, por lo que debe controlarse su exposición. Con respecto a la salud, es nocivo si se inhala o si se ingiere, puede generar irritación cutánea, irritar las vías respiratorias, provocar

somnolencia y vértigo (ILO 2007), además, puede producir irritación de los ojos y garganta, pudiendo llegar a sentir mareos por concentraciones altas (ATSDR, 2010). Es posible que afecte a riñones e hígado, dando lugar a alteraciones funcionales (ILO, 2007). También es posible que se absorba por la piel provocando dermatitis, si es una exposición prolongada o repetitiva, por aspiración a través de los pulmones puede provocar neumonitis química, además de afectar al sistema nervioso central (PRTR España, 2007b). Según la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC), es posible que el etilbenceno sea carcinogénico en seres humanos (ATSDR, 2010).

1.4.4 Xilenos

Se forman por el o-xileno, m-xileno y p-xileno, los cuales se diferencian por la posición de los grupos metilo, figura 4.

El punto de ebullición del o-xileno es de 144°C, tiene un punto de inflamación de 32°C y una presión de vapor de 0,7 kPa a 20°C (ILO, 2002b). Es altamente inflamable, irritante y peligroso para la salud (PubChem, 2021d).

El m-xileno tiene un punto de ebullición de 139°C, un punto de inflamación de 27°C y una presión de vapor de 0,8 kPa a 20°C (ILO, 2002c). Es altamente inflamable, corrosivo, irritante y peligroso para la salud (PubChem, 2021e).

Finalmente, el p-xileno tiene un punto de ebullición de 138°C, un punto de inflamación de 27°C y una presión de vapor de 0,9 kPa a 20°C (ILO, 2002d). Es altamente inflamable, irritante y peligroso para la salud (PubChem, 2021f).

Al liberarse a la atmósfera, ya que se evaporan fácilmente, pueden descomponerse en otras sustancias menos dañinas. Es por ello que se encuentran en muy baja concentración en el suelo. Son poco solubles en agua, por lo que es poco probable que se acumulen en la vida acuática, pero de igual forma se puede acumular una pequeña cantidad en plantas (Texas DSHS, 2015) y son tóxicos para los organismos acuáticos (ILO, 2002b; ILO, 2002c; ILO, 2002d). Con respecto a la salud, si se está expuesto a altos niveles de xileno durante periodos cortos o prolongados, puede ocasionar dolores de cabeza, falta de coordinación muscular, mareo, confusión, alteraciones del equilibrio, irritación en la piel, ojos, nariz, garganta, dificultad para respirar, problemas pulmonares, malestar estomacal, posibles alteraciones en hígado y riñones y podría ocasionar hasta la muerte (ATSDR, 2007b). Puede llegar a afectar al sistema nervioso central. Puede provocar neumonitis química (ILO, 2002b; ILO, 2002c; ILO, 2002d). Podría ser dañino para las mujeres embarazadas y para el feto (Texas DSHS, 2015). Sin embargo, la información que se encuentra disponible, según la IARC y la EPA, es insuficiente para determinar si los xilenos son carcinogénicos (ATSDR, 2007b).

A continuación, se presenta un resumen con las características de los BTEX.

Tabla 4. Principales características de los BTEX.

Parámetro	Benceno	Tolueno	Etilbenceno	O-xileno	M-xileno	P- xileno
Fórmula molecular	C ₆ H ₆	C ₇ H ₈	C ₈ H ₁₀	C ₈ H ₁₀	C ₈ H ₁₀	C ₈ H ₁₀
Punto de ebullición (°C)	80	111	136	144	139	138
Punto de inflamación (°C)	-11	4	18	32	27	27
Presión de vapor a (kPa)	10 a 20°C	3,8 a 25 °C	0,9 a 20°C	0,7 a 20°C	0,8 a 20°C	0,9 a 20°C
Solubilidad en agua	Ligeramente soluble	Insoluble	Insoluble	Insoluble	Insoluble	Insoluble
Bioacumulable	No	---	---	Si	Si	Si
Tóxicos para organismos acuáticos	Si	Si	Si	Si	Si	Si
Irritante	Si	Si	Si	Si	Si	Si
Inflamable	Si	Si	Si	Si	Si	Si
Peligroso para la salud	Si	Si	Si	Si	Si	Si
Corrosivo	---	---	---	---	Si	---
Afecta el sistema nervioso	Si	Si	Si	Si	Si	Si
Riesgo de cáncer	Si	No	Si	Falta información	Falta información	Falta información
Probabilidad de muerte a altas concentraciones	Si	Si	---	Si	Si	Si

1.5 Legislación sobre derrame de gasolina en suelos

En Chile, el Decreto 160 del Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción y la Subsecretaría de Economía, Fomento y Reconstrucción, indica en el artículo 15° que “Los operadores de las instalaciones de CL (combustibles líquidos derivados del petróleo y biocombustibles), deberán velar por su correcta operación, mantenimiento e inspección, a objeto de desarrollar las actividades en forma segura, eliminando o controlando los eventuales riesgos que la operación presente para las personas y cosas”, además, debe informarse el accidente dentro de las 24 horas siguientes, como se indica en el artículo 33°. Este decreto sólo es válido para estaciones de servicio (Decreto 160, 2009).

1.5.1 Legislación Chilena de Suelos

Desde 1994 Chile se ha empezado a interesar cada vez más por el medio ambiente, creando la ley 19300 sobre las Bases Generales del Medio Ambiente y posterior a ello, en 1996 entrando en vigor el Reglamento para la Dictación de Normas de Calidad Ambiental y Emisión. Desde entonces la Comisión Nacional del Medio Ambiente, hasta el 2010, ahora transformada en el Ministerio del Medio Ambiente, el Servicio de Evaluación Ambiental y la Superintendencia del Medio Ambiente, han dictado un número importante de regulaciones ambientales, dentro de las cuales se encuentran normas de calidad y emisión, principalmente para contaminantes atmosféricos y contaminación de aguas. Pero el suelo a nivel nacional ha quedado desprotegido de la contaminación. Esto puede tener relación con que el suelo de Chile es muy diverso desde norte a sur, con diferentes concentraciones de compuestos que se encuentran en forma natural en los suelos. Como no hay normativa nacional con respecto a la concentración de contaminantes en suelos, se

hace necesario utilizar una normativa externa, que permita a la población vivir en un medio ambiente libre de contaminantes sin verse afectada su salud.

1.5.2 Legislación Canadiense de Alberta

La pauta utilizada para lograr una remediación efectiva del suelo objeto de estudio es Suelo y Aguas Subterráneas de Alberta Tier I, donde se busca la protección ecológica y la salud humana, en la que se tabulan valores simples que requieren información mínima del sitio para su uso (AEP, 2016). Para su realización hay 2 legislaciones claves, la Ley de mejora y protección del medio ambiente (Gobierno de Alberta, 2006) y la Ley de agua (Gobierno de Alberta, 2000) que forman la base legislativa de las políticas ambientales de Alberta sobre gestión de contaminación en suelos y aguas subterráneas. Esta normativa es utilizada ya que es una de las más completas que hay, considerando que en Chile no hay restricciones con respecto a los valores que deben tener los contaminantes en el suelo, así, esta norma tiene valores para uso comercial, industrial y residencial, con valores para proteger la salud de las personas.

En las siguientes tablas se encuentran valores máximos para una calidad de suelo óptima con respecto a la salud humana.

Tabla 5: Niveles guía de calidad de suelos según Tabla A-9 y A-10 (AEP, Land Policy, 2016, No. 3).

Sustancia	Uso comercial/Industrial Inhalación de Vapores (mg/kg)
Benceno	1,2
Tolueno	1.600
Etilbenceno	760
Xilenos totales	210

Tabla 6: Niveles guía de calidad de suelos según Tabla A-8 (AEP, Land Policy, 2016, No. 3).

Sustancia	Uso residencial Inhalación de Vapores (mg/kg)
Benceno	0,14
Tolueno	180
Etilbenceno	86
Xilenos totales	23

1.6 Remediación de suelos por contaminación con gasolina

Para la remediación de un suelo contaminado por hidrocarburos, específicamente por gasolina, hay diferentes métodos que dependiendo del lugar de aplicación del proceso puede ser un tratamiento *in situ*, cuando la remediación se realiza directamente en el sitio contaminado o *ex situ*, cuando se requiere la extracción del medio contaminado para su tratamiento, como el compostaje, que es una biorremediación *ex situ* en la fase sólida. Este es un proceso biológico por el cual se puede tratar el suelo por acción de poblaciones microbianas presentes en este, estimulando su actividad biodegradadora,

transformándolos en subproductos inocuos estables, pero tiene algunas desventajas, como la necesidad de un espacio amplio para realizar el compostaje con el suelo contaminado, excavar el suelo contaminado lo que podría generar la liberación de los COV y se incrementaría el volumen del material a tratar. Otro método de remediación *ex situ* es la biolabranza, que consiste en disponer el suelo contaminado en otro terreno para posteriormente ser tratado con ayuda de maquinaria agrícola comercial, como tractores y arados. El tratamiento debe contar con características especiales para optimizar la degradación de los contaminantes, pero también posee desventajas, como el hecho de que se debe remover todo el suelo contaminado para poder llevarlo a un sitio diferente para ser tratado, lo cual implica poseer un gran sitio para el tratamiento, los contaminantes volátiles deben ser pretratados por la volatilización que se efectuaría al remover el suelo, las condiciones del lugar deben ser óptimas para que la contaminación no pase a aguas subterráneas (debe contar con pozos de monitoreo) ni tampoco se propague de forma horizontal (debe tener un área limitada). Por último, hay una remediación *ex situ* que consiste en extraer el suelo contaminado y llevarlo a un sitio de disposición final apto para el tipo de contaminación que posee, cumpliendo con todas las normas necesarias para que no siga contaminando por infiltración en el suelo o evaporación de gases. Para ello el sitio remediado se debe rellenar con suelo sin contaminación, pero como los métodos anteriores, se requiere de un gran espacio para poder dejar el suelo contaminado, donde se debe cumplir una serie de requisitos para que ese suelo no siga contaminando, además de que se debe tener suelo sin contaminación para poder rellenar el sitio que se encontraba contaminado.

También hay métodos de remediación *in situ*, como la electrocinética que es una técnica que se puede implementar tanto en la zona saturada como en la no saturada del suelo. Este método se basa en la aplicación de una corriente directa de baja intensidad a través de pares de electrodos distribuidos en una matriz definida, haciendo que los contaminantes se desplacen hacia estos electrodos, para concentrar los contaminantes en estos puntos y facilitar la posterior eliminación y tratamiento *ex situ*, pero también posee desventajas, como que la ruta de migración de los contaminantes podría ser demasiado larga o podría haber zonas de estancamiento, lo cual podría generar una remediación incompleta, o la heterogeneidad del subsuelo pueda reducir la eficiencia de la remoción, o la presencia de conductores metálicos o aisladores enterrados en el suelo y los cambios de pH que se pueden provocar por el proceso de remediación pueden reducir la eficiencia del tratamiento (FCH, 2019). Finalmente, dentro de los métodos físicos destaca la Extracción de Vapores del Suelo o SVE, que es una técnica *in situ* implementada para eliminar principalmente los COV's del suelo, la cual al ser un tipo de remediación que se realiza en el mismo sitio posee costos menores, ya que se ahorra transporte y sitio externo de tratamiento o disposición final del suelo contaminado.

1.6.1 Extracción de vapores del suelo

La extracción de vapores del suelo es una remediación *in situ* donde se utiliza una bomba de vacío para la extracción de gases pasando a una cámara de oxidación catalítica para no liberar los contaminantes al medio ambiente, sino que antes de liberarlos se oxidan para que no sean perjudiciales en la atmósfera (GB CINCO Ambiental). Esta técnica funciona mejor en suelos con una porosidad más bien alta, como suelos arenosos, grava o

limo grueso ya que es más fácil la aireación que en suelos con mayor presencia de arcilla y limo, por lo cual en estos últimos el tratamiento sería más prolongado. Esto mismo ocurre con suelos con mayor contenido de humedad, ya que una mayor cantidad de agua en los poros hace más difícil el proceso de aireación y, por lo tanto, mayor es el tiempo que se requiere para lograr el objetivo final, por esta razón es que esta técnica se puede utilizar en suelos no saturados, pero no en suelos saturados. El tiempo que se necesita para descontaminar un suelo contaminado por hidrocarburos varía caso a caso, pudiendo ser desde seis meses hasta los dos años aproximadamente, dependiendo de las condiciones en que se encuentre este, como porosidad, saturación del suelo, compactación, entre otros (GB CINCO Ambiental).

1.6.2 Tratamiento de vapores liberados del suelo

Al extraer los vapores desde el suelo, estos podrían ser liberados a la atmósfera, lo cual sería perjudicial para los seres vivos. Para ello se realiza la oxidación catalítica implementada en el equipo de SVE, donde los contaminantes pasan a una cámara a muy altas temperaturas. La temperatura dependerá de la concentración que haya de los contaminantes, considerando una temperatura aproximada entre 300 y 400 °C. Lo que hace la cámara de oxidación es descomponer los compuestos, formándose dióxido de carbono y agua principalmente, los cuales no son perjudiciales para la salud de las personas ya que el dióxido de carbono es utilizado por las plantas para hacer su proceso de fotosíntesis y el agua es vital para los seres vivos en general. A pesar de esto, el CO₂ es un gas de efecto invernadero que se encuentra naturalmente en la atmósfera, pero en un

porcentaje pequeño que ha ido creciendo con los años por las actividades que realiza el ser humano.

1.7 Objetivos

1.7.1 General

Remediar un suelo contaminado con gasolina a través de extracción de vapores con posterior tratamiento de los contaminantes extraídos mediante oxidación catalítica.

1.7.2 Específicos

- ❖ Determinar el área de estudio mediante la medición de COV en muestras de suelo.
- ❖ Interpretar la afectación de la gasolina mediante un modelo conceptual Fuente-Ruta-Receptor, que permita apoyar la toma de decisiones en caso de derrame en suelos.
- ❖ Evaluar el tratamiento de gasolina con extracción de vapores y oxidación catalítica en suelo contaminado, en un período de seis meses mediante rendimiento de la remediación.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Para cumplir con los objetivos planteados se consideró el caso de un suelo contaminado por sobrellenado de un estanque subterráneo con gasolina, buscando su remediación en un periodo de seis meses, utilizando la Extracción de Vapores del Suelo con un equipo KATOX, que incluye una cámara de oxidación catalítica, donde se transforman en compuestos como dióxido de carbono y agua.

2.1 Materiales utilizados

- Equipos para realizar perforaciones en el suelo (testiguera, chuzo hexagonal, barreno helicoidal y martillo de fondo).
- Equipos para tomar muestras de suelo en terreno (bolsas de cierre hermético, sensor de COV mediante fotoionización, PID ION SCIENCE, TigerLT).
- Equipos para tomar muestras de gases y suelo para transportarlas a laboratorio (bolsas Tedlar, frascos de vidrio, nevera para mantener cadena de frío).
- Equipos para construcción de zanjas (cortadora en frío, demoledor neumático de uso manual, implementos para retirar escombros).
- Conexiones (líneas eléctricas, tuberías).

- Manifold o colector
- Acondicionamiento térmico (tubo de acero galvanizado, lana de vidrio con foil de aluminio)
- Acondicionamiento acústico (paneles antiruido)
- Equipo KATOX, KATOX 1603, BfU.

2.2 Metodología de la remediación del suelo

Previamente a la utilización del equipo, se deben realizar procedimientos sobre la gestión de Suelos con Presencia de Contaminantes (SPC), enfocados a los riesgos que podrían ocasionar principalmente en la salud humana. Estos procedimientos comprenden la identificación, evaluación y control de los contaminantes (FCH, 2012), llegando finalmente a realizarse un modelo conceptual Fuente-Ruta-Receptor, para determinar las potenciales vías de exposición y tipo de receptor (residencial, comercial o industrial), es decir, si las concentraciones de hidrocarburos podrían afectar a personas que viven en lugares cercanos, locales comerciales donde la gente que los concurra pueda estar expuesta a esta contaminación o industrial donde podrían ser perjudicados los trabajadores de la zona (GB CINCO Ambiental). Para realizar este procedimiento existe una guía estándar de evaluación ambiental de sitio, realizada por la Sociedad Americana de Ensayos de Materiales, o ASTM por sus siglas en inglés, donde en la Fase I, o ASTM E1527, se busca la identificación de la potencial o existente contaminación ambiental y en la Fase II, o ASTM E1903, se realiza una evaluación y prueba de posibles impactos en el sitio.

2.2.1 FASE I. Identificación de potencial o existente contaminación ambiental

En esta fase se busca evaluar si los usos actuales o históricos del terreno han impactado el suelo dentro de la propiedad y si pudiesen ser perjudiciales para el medio ambiente o para la salud humana (Redlin, J. y Moore, N., 2018), es decir, si hay contaminación presente, o no, en el sitio. Para realizar la caracterización de este, inicialmente se revisan antecedentes históricos, fotografías, se realizan visitas al terreno, su entorno y se realizan entrevistas con las personas relacionadas a la propiedad (GB CINCO ambiental, 2014).

Esta investigación es evaluada por un Profesional Ambiental para identificar los posibles riesgos ambientales. La ASTM E1527 aborda las preocupaciones asociadas con la contaminación por los vapores del suelo y la posible migración del vapor hacia la atmosfera, pudiendo de esta forma llegar a seres humanos dentro y fuera del sitio, lo cual amenaza su salud.

Una vez completado este informe, el Profesional Ambiental resume el acontecimiento y recomienda acciones si fueran necesarias. En este caso concreto, al haber un sobrellenado de un estanque, y por consiguiente un derrame de gasolina, se hace necesario pasar a una Evaluación Ambiental de Sitio Fase II, con el objetivo de recolectar muestras del suelo y/o vapor del subsuelo para analizar la contaminación (Redlin, J. y Moore, N., 2018) y realizar una posterior remediación, ya que el propietario del sitio debería ser responsable por la contaminación generada, según el Decreto 160 del Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción y la Subsecretaría de Economía, Fomento y Reconstrucción (Decreto 160, 2009).

2.2.2 FASE II. Evaluación y prueba de posibles impactos en el sitio

La Fase II es la encargada de determinar la extensión tanto vertical como horizontal del área potencialmente afectada. Lo principal en esta fase es ampliar la investigación realizando pozos para poder realizar muestreo de la zona afectada, tanto en el subsuelo, analizando el suelo, gases en el suelo y/o las aguas subterráneas (si las hay), con el fin de poder delimitar la zona contaminada (GB CINCO ambiental, 2014). Básicamente esta fase permite evaluar la presencia o ausencia de productos derivados del petróleo o sustancias peligrosas en el subsuelo del sitio. Esta evaluación se realiza según la Guía estándar ASTM E1903.

La ASTM E1903 proporciona parámetros básicos para Evaluación Ambiental de Sitio Fase II, pero también queda a juicio del profesional encargado lo que irá incluido en el informe final (Macwilliams, K., 2018).

Para delimitar la zona afectada se realizaron las siguientes actividades:

- Sondeos para conocer la pluma de contaminación.
- Muestreo de suelo metro a metro, para su posterior análisis *in situ*, mediante el uso de un sensor de COV mediante fotoionización (PID); algunas muestras se enviaron a analizar al laboratorio.
- Instalación de tres pozos de monitoreo, de 9,50 m, 10,00 m y 11,00 m de profundidad. La profundidad fue evaluada según hallazgos en el sitio.
- Muestreo de gases del subsuelo.
- Análisis en laboratorio de gases (GC-FID).

2.3 Intervención del terreno para la instalación del equipo de trabajo

2.3.1 Realización de los pozos de extracción

Para poder realizar los pozos de extracción primero se realizaron 9 sondeos para saber hasta qué punto llegaba la contaminación. Luego de la realización de estos sondeos, se realizaron 3 pozos de extracción según hallazgos, con profundidades de 9,50 m, 10,00 m y 11,00 m, los cuales tuvieron un diámetro de 13,0 cm aproximadamente.

Las perforaciones se realizaron con una testiguera, la cual ejecutó el corte preciso en la losa de hormigón con su posterior extracción. Luego se continuó con perforación manual utilizando chuzo hexagonal y barreno helicoidal, terminando la perforación con martillo de fondo.



Figura 5: Herramientas utilizadas para la perforación del suelo. Imágenes disponibles en Christensen, 2022; Blumat, 2022; Coprelec, 2022 y Talleresegovia, 2022.

Posterior a la perforación de los pozos de extracción se procedió a la instalación de los filtros por donde pasan los contaminantes hacia el equipo KATOX.

Las perforaciones fueron encamisadas utilizando tubos de PVC hidráulico. El encamisado está compuesto por un tramo ciego y al final el tubo se encuentra ranurado, con una longitud total de entre los 9,00 y 11,00 m para la extracción de los contaminantes.

2.3.2 Construcción de zanjas

Para poder conectar los pozos ejecutados fue necesaria la realización de zanjas por donde irían las tuberías que conectaron los pozos de extracción con el equipo KATOX.

Primero se realizó la proyección de las zanjas para delimitar los cortes a realizar seguido de la realización de los cortes en el pavimento, y luego, se realizó la demolición con demolidores de uso manual para minimizar errores por si se encontraba alguna línea subterránea. Finalmente, se retiraron los escombros y se limpió la zona de trabajo.



Figura 6: Proceso de construcción de zanjas.

2.3.3 Instalación de tuberías

Se realizó la instalación de tuberías subterráneas que conducen los contaminantes hacia el sistema de descontaminación, y otras que permiten liberar el dióxido de carbono y agua. Luego, se rellenaron las zanjas con hormigón hasta llegar a ras de piso, terminando con un “rayado”, para hacerlo más seguro y poder evitar resbalones o caídas.



Figura 7: Instalación de cañerías y llenado de zanjas.

2.3.4 Instalación de líneas eléctricas

Se establecieron interruptores sobredimensionando el consumo del equipo. Además, se puso una parada de emergencia denominada Golpe de Puño.

Se instaló un medidor eléctrico para tener conocimiento sobre el consumo eléctrico realizado durante el periodo en funcionamiento del equipo.

2.3.5 Construcción del manifold o colector

Se fabricó un manifold o colector, el cual regula la succión de cada pozo de forma independiente, pudiendo controlar cada pozo con una válvula de paso, así se pudieron mantener los 3 pozos de extracción funcionando o solo alguno de ellos, ya sea inyectando

aire o succionando. El manifold se protegió con una reja ya que este quedó en un área al aire libre.



Figura 8: Manifold instalado.

2.3.6 Instalación del equipo KATOX

Se posicionó el equipo KATOX en un sitio que debe ser lo suficientemente amplio, como para colocar el acondicionamiento acústico, para minimizar el ruido si es necesario y poder transitar por alrededor de este sin entorpecer el trabajo en la estación de servicio. Luego de ello, se procede a realizar las conexiones eléctricas, tuberías y salida de escape de los gases al exterior.



Figura 9: Equipo de descontaminación KATOX 1603.

2.3.7 Acondicionamiento térmico

Para mitigar las emisiones de calor que produce el equipo, se instaló un tubo de acero galvanizado recubierto con aislante compuesto por lana de vidrio y aluminio, conocido como “foil de aluminio”, para absorber la carga calórica y evitar accidentes.



Figura 10: Acondicionamiento térmico.

2.3.8 Acondicionamiento acústico

Con el fin de reducir el ruido que emite el equipo se instaló en un lugar cerrado, dando como resultado un nivel de ruido mayor al de la norma establecida (55 decibeles de 7 a 21 hrs y 45 decibeles de 21 a 7 hrs (Decreto 38, 2014)), por lo que se debió apagar en las noches los primeros meses. Posteriormente se habilitó el acondicionamiento acústico con paneles antiruido.

2.4 Funcionamiento del equipo Extracción de Vapores KATOX

Para remediar el suelo contaminado con gasolina se realizó una SVE, el cual se utiliza para extraer vapores de la zona no saturada del suelo, creando una corriente de succión

para que los contaminantes que se encuentran en fase vapor se movilizan hacia esta (Echevarría, M. y Molano, C., 2005). Este tipo de remediación cuenta con un sistema de oxidación catalítica (Equipo KATOX) que destruye los COV aspirados desde el suelo, obteniéndose dióxido de carbono y agua, que posee un caudal máximo de aspiración de 500 m³/h a 0,075 bar, siendo este el equipo utilizado hasta poder llegar a las concentraciones permitidas de hidrocarburos dentro de la Normativa Canadiense de Alberta (Alberta Government, 2016; GB CINCO Ambiental).

Los pozos cumplen la función de inyectar o succionar aire, según el requerimiento del sitio, y así permitir la movilización de los gases en el suelo sin necesidad de excavar en él. Cada pozo cuenta con una válvula de paso, la que se puede ajustar en función de lo que se necesita regulando el vacío se hace en cada uno de ellos.

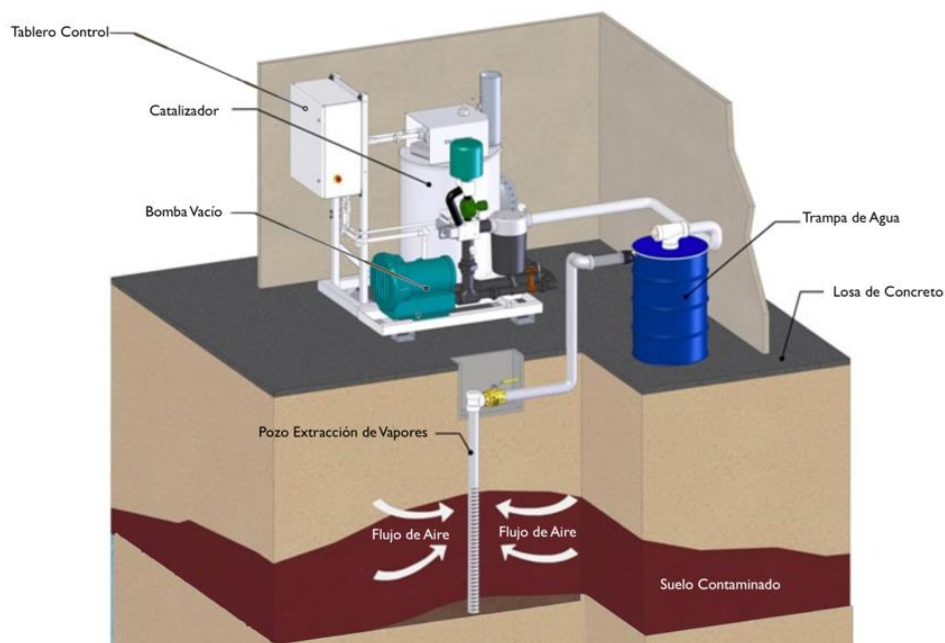


Figura 11: Esquemización del equipo KATOX. Imagen disponible en GB CINCO Ambiental – Sistema de Gestión Integrado, 2021.

En la figura 11 se muestra una esquematización del equipo utilizado instalado en el sitio de interés, donde se observa que el flujo de aire con los contaminantes pasa a un manifold o colector, el cual permite tomar muestras gaseosas y la medición de vacío en forma individual por cada pozo de extracción, luego va por las cañerías que se instalaron hacia el equipo pasando posteriormente por una trampa de agua, la cual retiene la humedad capaz de condensarse y evita que esta misma ingrese a la bomba de extracción. Esta trampa tiene un sistema de bombeo y de extracción automática de los líquidos. Finalmente, los gases entran a la bomba de extracción, la cual los conduce a la parte de la oxidación catalítica para tratar los gases extraídos. Este genera una oxidación por medio de un catalizador a una temperatura entre los 300 y 400 °C.

El diseño del sistema y su aislamiento térmico permiten al mismo realizar una recuperación de calor, de esta forma, al ponerse en marcha el equipo se produce el funcionamiento automático de este, es decir, sin consumo extra de energía eléctrica. Cuando las concentraciones ya bajan a unos 100 mg/m³, el funcionamiento deja de ser automático y se requiere de consumo de energía eléctrica para su funcionamiento.

El equipo cuenta con un sistema inteligente que monitorea temperatura y control de explosividad que hay en el equipo en tres etapas del recorrido de las fases de oxidación. Si se produjera un aumento de la concentración por encima del 20% del límite inferior de explosividad (LEL), que es la concentración mínima de un combustible cuando se mezcla con aire donde puede ocurrir una explosión (industrial scientific, 2022), o si hay un corte de energía el sistema interrumpe el funcionamiento del equipo, el cual debe reiniciarse manualmente. Básicamente el equipo mide el triángulo del fuego y dice en qué minuto se

encuentran los componentes en suficiente concentración (en proporción porcentual) para generar una explosión (GB CINCO Ambiental).

Este triángulo consta de 3 partes, como se puede apreciar en la figura 12: Combustible, comburente y calor. El combustible es la materia que se oxida o se quema, el comburente es lo que reacciona con el combustible o la fuente que lo oxida y el calor posee dos componentes: la temperatura del combustible que es la temperatura a la cual se inflama (en sólidos llamada temperatura de pirólisis) y la energía mínima de ignición que es la energía necesaria para iniciar una reacción, la cual depende del combustible (Proyecto AprendEmergencias).



Figura 12: Triángulo del fuego.

Imagen disponible en Proyecto AprendEmergencias, 2022.

La oxidación catalítica alcanza un 99,5% de eficiencia en la destrucción de COV, lo cual se relaciona profundamente con la temperatura de ingreso al catalizador. A mayor temperatura, mayor es la eficiencia de destrucción de los contaminantes. Un catalizador generalmente está compuesto por platino, paladio o rodio que a altas temperaturas destruye los vapores de hidrocarburos no clorados, obteniéndose como resultado de la reacción dióxido de carbono y agua (GB CINCO Ambiental).

2.5 Medición de COV

2.5.1 Análisis en terreno

Las muestras se recolectaron verticalmente metro a metro a partir de los 3 metros de profundidad, considerando que el impacto se presenta por debajo del contenedor de derrames y posiblemente por debajo del estanque de almacenamiento subterráneo. Las porciones de suelo recolectadas se introdujeron en una bolsa plástica de cierre hermético. Una vez cerrada la bolsa se procedió a medir la concentración de COV con sensor PID por fotoionización. Este equipo permite mediciones de compuestos orgánicos desde 0 hasta 1000 mgL^{-1} , con una aproximación de $0,1 \text{ mgL}^{-1}$.

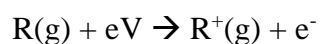


Figura 13: Toma de muestra en terreno con sensor de COV mediante fotoionización (PID).

El PID utiliza una lámpara de luz ultravioleta para ionizar los compuestos. Cuando una muestra gaseosa absorbe energía de una lámpara PID, el gas se estimula perdiendo un electrón y convirtiéndose en un ion positivo, por lo cual se dice que la sustancia está ionizada. La capacidad de una sustancia para ionizarse se determina a través del potencial

de ionización (PI) que se mide en electronvoltios (eV). Esta escala va generalmente desde un valor de 7 eV. Mientras más cercano se está a este valor, más fácil es que la sustancia se ionice (MSA, 2015).

El potencial de ionización o energía de ionización es la energía mínima necesaria para que un átomo neutro pierda un electrón en estado gaseoso. A mayor energía de ionización, más difícil será desprender el electrón.



Donde R es el compuesto, eV es la energía necesaria en electronvoltios y e^- es un electrón (Chang, R., College, W., 2010).

Los BTEX poseen un potencial de ionización que va desde los 8,44 a 9,25 eV (MSA, 2015; NJ Health, 2016a; NJ Health, 2016b).

Tabla 7: Potenciales de ionización de los BTEX.

Sustancia	PI (eV)
Benceno	9,25
Tolueno	8,82
Etilbenceno	8,76
O-xileno	8,56
M-xileno	8,56
P-xileno	8,44

El mejor método para calibrar un PID es a través del uso de un estándar del gas de interés, pero esto puede resultar poco práctico, ya que requiere el almacenamiento y disponibilidad de una colección de gases que pueden ser peligrosos. Para evitar esto se utiliza un factor de respuesta, que es una medida de la sensibilidad que tiene el PID ante

un gas específico, así se puede tener una medición de varios compuestos con un solo gas de calibración (MSA, 2015). El isobutileno es utilizado como calibrador ya que su PI de 9,24 eV (sensotran, s.l.) es cercano al punto medio de los PIs de la mayoría de los COV, además de no ser inflamable ni tóxico a las bajas concentraciones que se requieren para la calibración (MSA, 2015). Sin embargo, solo se podrían detectar los compuestos que se encuentran por debajo del PI del compuesto utilizado para calibrar.

El método utilizado para tomar las muestras de COV fue el determinado “Headspace”. Esta técnica consiste en tomar una muestra de suelo, dejando aproximadamente un tercio de la bolsa de cierre hermético vacía y luego de unos minutos se realiza la medición con el PID en el espacio libre de la bolsa. Es importante señalar que esta medición de tipo cualitativa, ya que, al utilizarse un sistema de perforación con aire, las mediciones son más bajas de lo real, entonces, estos datos solo se utilizan como indicio de contaminación.

2.5.2 Análisis en laboratorio

Previo al análisis de las primeras muestras de gases en laboratorio, estas fueron almacenadas en bolsas de Tedlar con cierre hermético y capacidad de 1L para su envío al laboratorio siendo transportadas sin cortar la cadena de frío al laboratorio independiente ALS LIFE SCIENCES CHILE S.A. La técnica utilizada para analizar los BTEX en los gases influentes a la cámara de oxidación catalítica fue la cromatografía de gases con detector de ionización de llama (GC-FID).

Para almacenar las muestras de suelo de BTEX obtenidas de los pozos realizados como muestreo de verificación se utilizaron frascos de vidrio y para su análisis se realizó una cromatografía de gases con detector de espectrometría de masas (GC-MS).

Ambos análisis de muestra utilizaron como método de referencia las EPA 8260B y EPA 5035A.

Las condiciones experimentales se describen a continuación.

GC-FID:

- Equipo utilizado: Cromatógrafo de gases Agilent 7890A.
- Gas portador: Helio.
- Inyector y sistema de inyección: Inyector automático de líquidos Agilent 7693A.
Sistema de inyección splitless.
- Columna cromatográfica: Columna capilar de sílice fundida DB-5 ((5%fenil)-metilpolisiloxano) apolar.
- Detector: Detector de ionización de llama FID.

GC-MS:

- Equipo utilizado: Cromatógrafo de gases Agilent 7890B y muestreador headspace Agilent 7697A.
- Gas portador: Helio.
- Sistema de inyección: Splitless.
- Columna cromatográfica: Columna capilar de sílice fundida DB-5 MS (fenilo al 5%, dimetil arileno siloxano al 95%) apolar.
- Detector: GC/MSD Agilent 5977B.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Informe Fase I

Cabe destacar que este Informe Fase I fue realizado previo al derrame de gasolina ocurrido en la estación de servicio, con fecha de abril del 2020.

3.1.1 Antecedentes del sitio

La estación de servicio se encuentra en la ciudad de Santiago de Chile, Región Metropolitana.



Figura 14: Mapa de Santiago de Chile. Imagen disponible en Gobierno Regional Metropolitano, 2022.

En Santiago, los recursos hídricos se dividen en subterráneos y superficiales. En este caso, los recursos superficiales corresponden al río Maipo principalmente y afluentes, donde se encuentra el río Mapocho, el cual se está relativamente próximo al sector de estudio.

3.1.2 Descripción histórica del sitio y sus operaciones

Se realizó una visita y recorrido técnico donde se hizo una inspección presencial del sitio, donde se pudo dilucidar que el sitio cuenta con oficinas, baños, minimarket, dos zonas de islas, una zona de estanques subterráneos de almacenamiento de combustible, lubricentro, lavadero de autos y cinco zonas de estacionamiento, de las cuales solo cuatro están habilitadas.

La mayor parte del terreno se encuentra constituida por losas de hormigón liso, comprendiendo islas, zona de estanques subterráneos de combustible, lubricentro y lavadero de autos. La zona de los estacionamientos está cubierta por adocreto.

Las zonas de las islas se encuentran cubiertas por marquesinas en buen estado. Además, esta zona cuenta con una canaleta perimetral alrededor de las islas y de la zona de los estanques de almacenamiento de combustible. También posee dos rejillas perimetrales, una en el lubricentro y otra en el lavadero de autos.

En la zona de estanques se encuentran dos pozos de observación, en los cuales se midió COV dando 0 mgL^{-1} .

La zona de mayores islas cuenta con cuatro surtidores, donde se expende combustible Diesel y Gasolina 93, 95 y 97 lo que abarca un total de cuatro islas. La zona de menores

islas cuenta un dispensador para la comercialización de Diesel. En total se tienen cinco islas en el sitio. La zona de mayor islas cuenta con una caseta de pago que permite comercialización de los combustibles como autoservicio.

A continuación, se muestra un resumen de las características de la estación de servicio.

Tabla 8: Características de la estación de servicio.

Actividad comercial	Estación de servicio
Servicios	Venta de combustibles líquidos: Gasolina 93, 95, 97 y Diesel
Área aproximada	2670 m ²
Estado actual	Activa con funcionamiento normal
Zonas internas	Oficinas, baños, minimarket, estacionamientos, almacenamiento y expendio de combustibles líquidos, lubricentro y lavadero de autos
Cantidad de estanques	4 estanques subterráneos
Capacidad instalada	140 m ³
Cantidad de islas	5
Cantidad de surtidores	4
Cantidad de dispensadores	1

La empresa GB CINCO Ambiental entrevistó al encargado del sitio, donde comunicó lo siguiente:

- El sitio cuenta con los servicios básicos de electricidad, teléfono y gas.
- El agua potable y alcantarillado son suministrados por la compañía Aguas Andinas.

- En el 2018 se realizó el cambio de los cuatro estanques subterráneos de almacenamiento de combustible debido al vencimiento de estos.
- Se han realizado múltiples reparaciones al dispensador de la isla 5, el cual fue reemplazado hace un par de años.
- No se han producido derrames ni accidentes ambientales que puedan generar contaminación por hidrocarburos anteriormente.
- No se han recibido requerimientos de la autoridad ambiental o quejas por parte de vecinos del sector relacionados a contaminación por hidrocarburos.
- Se cuenta con un inventario de combustibles, el cual se realiza manualmente con regla y varilla, y electrónicamente con el Veeder Root, el cual es un sensor que detecta la presencia de líquidos en un estanque, permitiendo hacer un seguimiento de su estado con mayor precisión, además de poder conocer si posee fugas peligrosas para el medio ambiente antes de que sea de riesgo.
- No se han presentado diferencias entre los inventarios de los diferentes combustibles.
- Las estructuras están conectadas al alcantarillado sin pasar por un sistema preliminar de tratamiento de aguas.

El sitio tratado no poseía un plano de las conexiones subterráneas del área, lo que dificultaba el realizar las perforaciones para tomar las muestras del suelo, ya que si se perforaba alguna se corría el riesgo de desencadenar una nueva contaminación.

La información dada sobre el cambio de los estanques se pudo corroborar con el “Certificado de aprobación de los sistemas de recuperación de vapores de combustibles” de 01/04/2016 y 04/04/2017, como se muestra en la tabla 9. En ella se presenta que los estanques al ser reemplazados pasaron los ensayos de hermeticidad y tasa volumétrica, lo que se señala que no hubo impactos en el área por instalación o producto en malas condiciones.

Tabla 9: Certificado de aprobación de los sistemas de recuperación de vapores de combustibles.

Tipo de Red	Cantidad Líneas	Cantidad bocas	Hermeticidad	Tasa volumétrica	Fecha de emisión	Vigencia
Interconectada	4	24	No Pasa	No Pasa	01-04-2016	Rechazada
Interconectada	4	24	Pasa	Pasa	04-04-2017	23-03-2018

La recuperación de vapores es un sistema para prevenir la evaporación de la gasolina y así evitar una contaminación al medio ambiente. Este sistema aparte de evitar la fuga de vapores evita la acumulación de presión que podría ocasionar daño a los estanques de almacenamiento de combustible.

La prueba de hermeticidad es aquella donde se verifica las condiciones físicas de un tanque y sus líneas de conducción hacia las bocas o pistolas expendedoras de combustible. En ella se evalúa si existe pérdida de gases o formación de atmósferas explosivas dentro de este, así como la entrada o salida de líquidos desde el sistema de almacenamiento de combustibles. Si hay una pérdida de presión después de un cierto tiempo determinado, se podría decir que el contenedor o línea no es hermético, por lo cual no pasaría la prueba.

Por otro lado, la tasa volumétrica evalúa si sale la misma cantidad de volumen de combustible a las bocas o pistolas expendedoras que el que entra a las líneas de conducción desde los estanques subterráneos. Si existe una pérdida de fluido en la salida del combustible se podría estar frente a una posible fuga lo cual podría generar una contaminación ambiental, o podría haber una obstrucción por algún cuerpo extraño dentro de la línea que esté impidiendo el paso del combustible, teniéndose un menor volumen de salida, lo cual haría que no se pasara la prueba de tasa volumétrica.

En junio del 2017 se realizó un ensayo de hermeticidad para las líneas subterráneas de cada estanque, donde se obtuvo como resultado que pasaban esta prueba, pero se debían sacar y reemplazar por fecha de vigencia.

En enero del 2018 se realizó una inspección de hermeticidad para los tanques subterráneos, lo que dió como resultado que los estanques pasaban la prueba, pero de igual forma se debían sacar y reemplazar por la fecha de vigencia de estos.

Los estanques subterráneos en el sitio tienen una vigencia de 30 años y su año de fabricación e instalación fue en 1986, por lo que el año 2016 se deberían haber reemplazado los estanques.

Posterior al cambio de los estanques subterráneos y de líneas de conducción de combustible se realizaron ensayos de hermeticidad a estos, obteniendo un certificado el 28/02/2018 con vigencia hasta el 26/02/2033.

El año 2018 después del cambio de estanques y líneas de conducción se realizaron pruebas nuevamente para la recuperación de vapores de combustible obteniendo lo siguiente.

Tabla 10: Certificado de aprobación de los sistemas de recuperación de vapores de combustibles luego del cambio de estanques y líneas.

Tipo de Red	Cantidad Líneas	Cantidad bocas	Hermeticidad	Tasa volumétrica	Fecha de emisión	Vigencia
Interconectada	4	24	Pasa	Pasa	01-03-2018	28/02/2019

Posterior a la fecha de vigencia del certificado de aprobación de los sistemas de recuperación de vapores de combustibles no se tiene más información al respecto.

La estación de servicio cuenta con cuatro estanques, de los cuales dos son de gasolina 93, uno es de gasolina 97 y uno es de Diesel, teniendo diferentes capacidades, lo cual se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 11: Características actuales del SASH (Sistema de Almacenamiento Subterráneo de Hidrocarburos).

Estanque N°	Contenido	Capacidad (m ³)	Estado	Tipo	Hermeticidad estanques**
1	Gasolina 93	30	Reemplazado	UST*	27/02/2018
2	Gasolina 93	30	Reemplazado	UST*	27/02/2018
3	Gasolina 97	40	Reemplazado	UST*	27/02/2018
4	Diesel	40	Reemplazado	UST*	27/02/2018

*: Underground storage Tank – Tanque de Almacenamiento Subterráneo

** : Fecha de ensayo de últimas pruebas presentadas por el encargado del sitio

3.1.3 Reconocimiento del entorno del sitio

Se realizó un reconocimiento general del sitio para así poder saber los recintos e instalaciones adyacentes a la estación de servicio, en un radio de 500 m. Se encontró que la estación de servicio se encuentra adyacente a una avenida principal, por lo cual el flujo de vehículos es alto y que el sector donde se encuentra es catalogado como mixto, es decir, hay tanto zona residencial como comercio. En la siguiente tabla se especifica la distancia a la cual se encuentran las diferentes propiedades.

Tabla 12: Propiedades aledañas al sitio.

Propiedades/Calles/Rio	Distancia (m)	Dirección	Clasificación
Casas	3	Norte y poniente	Receptor
Condominio de departamentos	3	Este	Receptor
Canchas de tenis, Avenida principal, Autopista	27	Sur	Receptor
Rio Mapocho	73	Sur	Receptor

Además, se encontraron alrededor de los 500 m receptores y posibles fuentes de contaminación, como universidades a 230 y 350 m, un museo a 340 m y una estación de servicio a 100 m.

En cuanto a los cuerpos de agua subterráneos, según el mapa hidrogeológico de la Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas con respecto a pozos de abastecimiento de agua subterránea de la Región Metropolitana, se encontró que no hay pozos subterráneos dentro de los 500 metros de radio. El más cercano se encuentra a 846 metros de distancia.

Con esta información se pudo realizar un modelo conceptual Fuente-Ruta-Receptor de los contaminantes.

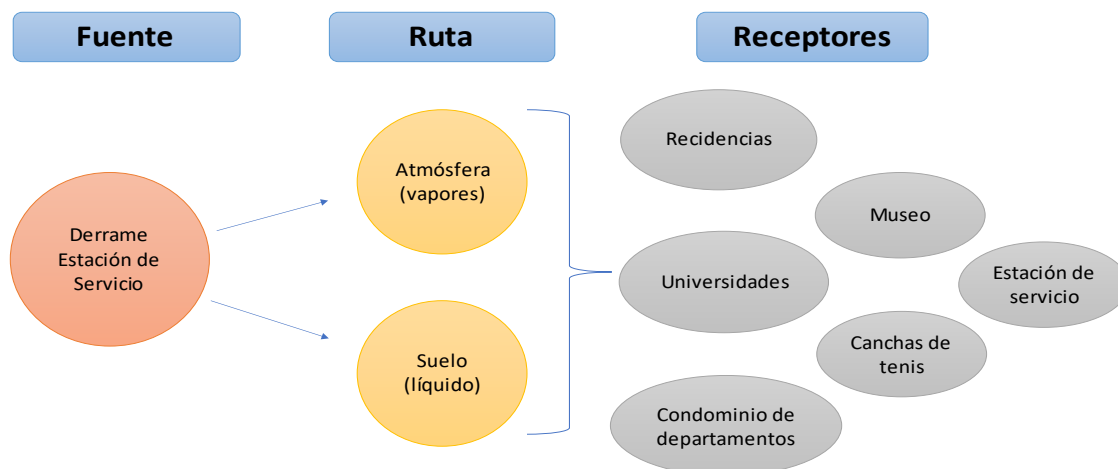


Figura 15: Modelo conceptual Fuente-Ruta-Receptor de los contaminantes.

En este modelo conceptual se muestra la fuente de la contaminación provocada por el derrame de gasolina en la estación de servicio, luego se pueden ver las posibles rutas que podría seguir esta contaminación hasta llegar a los receptores que se encuentran medianamente cerca en un rango de 500 metros de radio desde la fuente de la contaminación. No se consideró una ruta por agua ya que no hay pozos subterráneos en esta área y el acuífero más cercano se encuentra a más de 20 metros de profundidad. Este modelo conceptual es útil para poder ver las posibles vías de contaminación hacia los receptores e identificar cuáles son y así buscar la mejor forma de remediar la contaminación. En este caso, como el área es mixta, existen receptores residenciales y comerciales dentro del rango establecido.

3.2 Informe Fase II

Inicialmente, se realizó una visita al sitio para realizar una inspección presencial, donde se identificó el área del derrame de gasolina 97 para la realización de los pozos de extracción.

Se informó de un descuento en el volumen de 7000 litros de gasolina 97. Posterior a ello se revisó el contenedor de derrames del estanque N°3, correspondiente a gasolina 97, encontrando la cámara llena de combustible, la cual fue retornada al estanque. Al día siguiente se realizó una revisión del estanque y línea de gasolina 97, donde se realizó una prueba de hermeticidad, teniendo un resultado positivo para ella, clausurando la fuente de contaminación. Al día subsiguiente ya no se presentaron lecturas de diferencia en el inventario de combustible.

Se realizaron tres pozos de extracción alrededor del estanque N°3, donde se determinó que el tipo de suelo presente en la zona de estanque es principalmente suelo arenoso arcilloso con alta presencia de grava, de color 5YR 3/2 según las tablas de color de Munsell. En general el material se encontró poco húmedo, compacto y de baja plasticidad hasta una profundidad de 2,30 m. a partir de este punto el suelo cambia a grava hasta una profundidad de 4,00 m, donde se encuentra el suelo consolidado. El perfil de cada pozo de extracción se puede apreciar en el anexo 2. A continuación se muestra una referencia de cómo se vieron los perfiles extraídos de los pozos hasta una profundidad de 4 metros.



Figura 16: Imagen referencial del perfil del suelo obtenido de los pozos de extracción.

Por otro lado, si bien las concentraciones de COV halladas en el suelo fueron altas, como se muestra en la tabla 13, el escenario de impacto se contempla inmerso en la zona de estanques, por lo que el riesgo de movilidad hacia los límites del predio es bajo y teniendo en cuenta que el acuífero más cercano en las zonas de Santiago se encuentra en un promedio de más de 20,0 m de profundidad y a más de 500 m a la redonda, la probabilidad de contaminación del agua subterránea también es baja.

Tabla 13: Datos obtenidos en los pozos de extracción a diferentes profundidades.

Compuestos Orgánicos Volátiles (mgL⁻¹)			
Profundidad (m)	ID Perforación (identificación del sondeo dado por GB CINCO Ambiental)		
	PE1	PE2	PE3
3,00-4,00	0	0	0
4,00-5,00	48	155	101
5,00-6,00	120	201	189
6,00-7,00	22	45	122
7,00-8,00	0	30	90
8,00-9,00	13	22	49

Como se puede apreciar en la tabla, los valores más altos de COV se encuentran a una profundidad de 5,00 a 6,00 m. Debido a esto, la instalación de los filtros (tubería ranurada) se posicionó a dicha profundidad hasta el final del pozo de extracción para la captación de los vapores.

3.2.1 Puesta en marcha del equipo KATOX.

Al poner en marcha el equipo KATOX se obtuvieron datos como el consumo eléctrico, % LEL del equipo y el uso de la válvula de aire fresco.

Tabla 14: Valores iniciales del equipo KATOX.

Parámetro	Registro
Consumo eléctrico (kWh)	201,98
LEL KATOX (%)	11,2
Válvula aire fresco (%)	100

Además, en el tablero KATOX se pueden apreciar las temperaturas en diferentes partes del equipo, como en la entrada, centro, salida, chimenea, % de uso de la válvula de aire fresco y de concentración, entre otros, los cuales se encuentran en el anexo 3. Esto indica que el equipo se encuentra en correcto funcionamiento para iniciar la remediación, extrayendo vapores desde los tres pozos de extracción instalados.

Una vez iniciada la remediación se tomaron muestras mensuales desde la entrada de los gases al equipo para ser llevadas a laboratorio y ser analizadas por el método GC-FID.

Tabla 15: Valores obtenidos por análisis de gases en laboratorio durante la remediación.

Compuesto	Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4	Mes 5	Mes 6
Benceno (mg/m ³)	36,1	0,0201	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
Tolueno (mg/m ³)	52,7	0,0068	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
Etilbenceno (mg/m ³)	3,5	0,0183	0,0725	<0,005	<0,005	<0,005
m,p-Xileno (mg/m ³)	22,2	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
o-Xileno (mg/m ³)	11,7	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005

Como se puede apreciar, las concentraciones de los BTEX en aire fueron bajando mes a mes hasta obtenerse un valor de <0,005 mg/m³. Este valor corresponde al límite de cuantificación, por lo que es el valor mínimo que podría haber obtenido todos los compuestos, lo cual explica que los valores más bajos obtenidos fueran todos iguales.

Con estos resultados se puede realizar un gráfico que muestra la variación de los BTEX en las muestra analizadas de los gases influentes hacia el equipo KATOX.

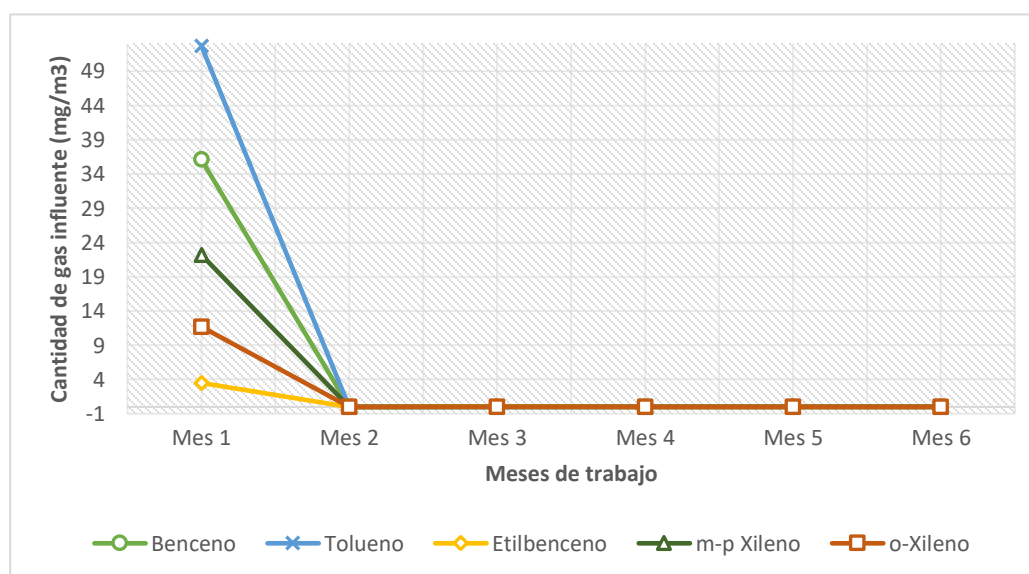


Figura 17: Representación gráfica de la disminución de los gases influentes.

Estos valores son de gran importancia debido a que en ellos se aprecia la efectividad de la remediación por el método SVE, ya que a medida que iban transcurriendo los meses la cantidad de contaminantes en el gas influente fue disminuyendo hasta el punto de llegar a una curva de forma asintótica, lo cual indica que la remediación ya está llegando a su fin.

Esto se relaciona directamente con la cantidad de consumo eléctrico del equipo, ya que a mayor cantidad de contaminantes, mayor es la temperatura que se necesita para su oxidación. Al ser la oxidación una reacción exotérmica, esta misma energía era la que ocupaba el equipo para su funcionamiento, pero a medida que la carga de contaminantes fue disminuyendo, la temperatura también fue bajando y por ende el consumo eléctrico requerido fue aumentando para poder mantener la temperatura de operación del sistema de oxidación como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 16: Consumo eléctrico mensual del equipo KATOX.

Consumo eléctrico (Kw)	
Mes 1	1870
Mes 2	2522
Mes 3	4949
Mes 4	5319
Mes 5	6788
Mes 6	8841,81
Total	30289,81

Además de las concentraciones de los contaminantes en aire y consumo eléctrico, se obtuvo un promedio mensual de parámetros como vacío, caudal de aspiración, % LEL y temperatura de control como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 17: Promedios mensuales de parámetros obtenidos del sistema de aspiración.

Parámetro	Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4	Mes 5	Mes 6
Vacío (mbar)	160	180	120	180	180	90
Caudal de aspiración (m ³ /h)	420	380	430	370	370	120
LEL KATOX (%)	10,9	2,7	0,3	0,05	0,02	0,02
Temperatura de control (C°)	370,4	320	321	321	315	120

Durante el mes 3 hubo un aumento del caudal y una disminución de vacío esto pudo haberse debido al cierre parcial o total de la válvula de regulación de alguno de los PE. El % LEL fue disminuyendo gradualmente al igual que la temperatura, esto indica que la cantidad de gases contaminantes que entraban al equipo eran cada vez menor, por lo cual se requería una menor temperatura para la oxidación de los gases, generando que el porcentaje de explosividad disminuyera ya que depende de la temperatura y de combustible, que en este caso los gases contaminantes.

Para poder evaluar si la descontaminación fue efectiva durante estos 6 meses de funcionamiento del equipo, se calcularon datos de la masa de contaminantes destruidos mensual y por ende se pudo obtener la masa acumulada mes a mes hasta el final de la remediación, utilizando los datos de caudal promedio mensual, mg/m³ y horas trabajadas durante el mes.

Tabla 18: Datos utilizados para calcular masa de contaminantes destruida.

Meses de trabajo	Caudal Promedio m ³ /h	Concentración mg/m ³				Masa destruida	Masa acumulada
			kg/h	kg/día	h/mes	kg/mes	kg/mes
Inicio mes 1	420	19.104,2	8,02	192,6	0,0	0,0	0,0
Mes 1	420	12.104,2	5,08	122,0	254,0	1664,7	1664,7
Mes 2	380	6.104,2	2,32	55,7	348,0	1288,2	2952,8
Mes 3	430	2.222,0	0,96	22,9	448,0	733,6	3686,5
Mes 4	370	1.199,0	0,44	10,6	493,0	344,9	4031,3
Mes 5	370	319,0	0,12	2,8	545,0	153,1	4184,4
Mes 6	120	1.387,0	0,17	4,0	789,0	112,2	4296,6

Realizando los cálculos para obtener los kg de contaminantes destruidos por día se multiplicó el caudal promedio con los mg/m³, obteniendo mg/h y luego se dividió por 1.000.000 para realizar la conversión de mg a kg y finalmente se multiplicó por 24 para realizar la conversión de h a día.

$$\frac{\text{m}^3}{\text{h}} * \frac{\text{mg}}{\text{m}^3} = \frac{\text{mg}}{\text{h}}$$

$$\frac{\text{mg}}{\text{h}} * \frac{1\text{g}}{1000\text{mg}} * \frac{1\text{kg}}{1000\text{g}} = \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$\frac{\text{kg}}{\text{h}} * \frac{24\text{ h}}{1\text{ día}} = \frac{\text{kg}}{\text{día}}$$

Continuando con los cálculos, las h/mes hay que convertirlas en día/mes, para posteriormente multiplicarlo con el cálculo del promedio entre los kg/día entre el mes anterior y el presente. Con ello finalmente se calcula la masa de contaminantes promedio acumulada.

$$\frac{\text{h}}{\text{mes}} * \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ h}} = \frac{\text{día}}{\text{mes}}$$

$$\frac{\text{día}}{\text{mes}} * \frac{\frac{\text{kg}}{\text{día}} \text{ Mes 1} + \frac{\text{kg}}{\text{día}} \text{ Mes 2}}{2} = \frac{\text{kg}}{\text{mes}}$$

Con estos cálculos se obtiene finalmente que la masa acumulada por mes hasta el Mes 6 es de 4296,6 kg.

Con los datos de masa de contaminantes destruidos acumulada es posible realizar un gráfico que ilustre la oxidación de los contaminantes por acción del catalizador a través del tiempo.

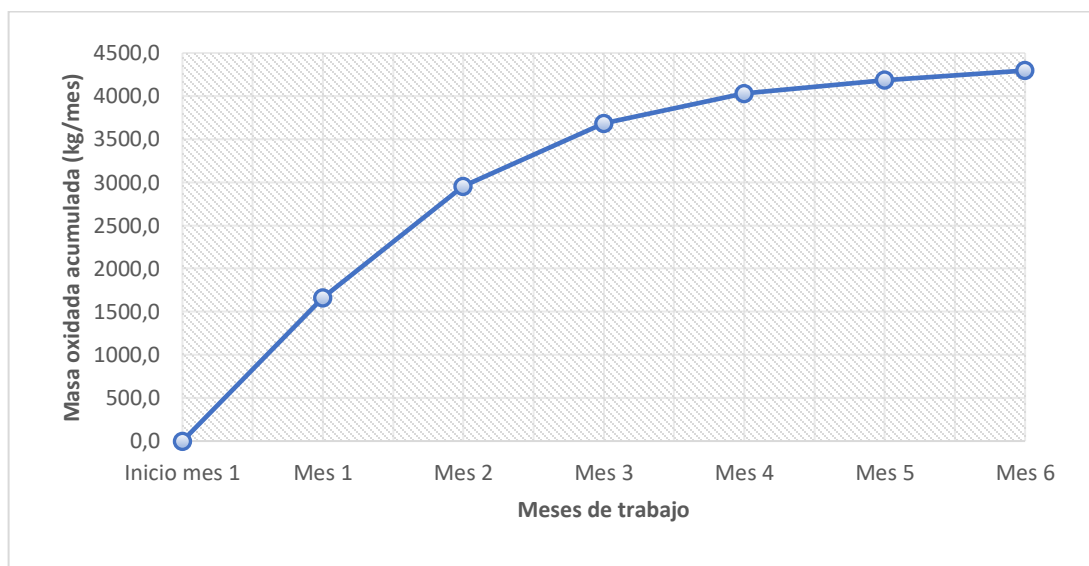


Figura 18: Representación gráfica de la oxidación acumulada de los contaminantes.

En el gráfico se puede apreciar que a medida que fue transcurriendo el tiempo, la cantidad de masa de contaminante oxidada fue disminuyendo hasta llegar a un valor relativamente estable, lo cual también es un indicador de que la remediación está llegando a su fin.

Como se mencionó anteriormente, se habían descontado 7000 litros de gasolina producido por el sobrellenado del estanque subterráneo. Esto se puede transformar a kilogramos utilizando la densidad de la gasolina, que es de 0,680 kg/L.

$$\rho = \frac{m}{v}$$

$$0,680 \frac{\text{kg}}{\text{L}} = \frac{m}{7000 \text{ L}}$$

$$0,680 \frac{\text{kg}}{\text{L}} * 7000 \text{ L} = 4760 \text{ kg}$$

Se obtuvo un total de 4760 kg de gasolina derramada.

Teóricamente se esperarí que se pudieran oxidar los 4760 kg de contaminante derramados, pero como es un ambiente abierto y hay factores externos, como la volatilización, lixiviación y la presencia de microorganismos en el suelo, no es posible. Con este valor teórico se puede calcular el rendimiento de la descontaminación del suelo utilizando el método SVE.

$$\% \text{Rendimiento} = \frac{\text{masa experimental}}{\text{masa teórica}} * 100$$

$$\% \text{Rendimiento} = \frac{4296,6 \text{ kg}}{4760 \text{ kg}} * 100$$

$$\% \text{Rendimiento} = 90,3\%$$

Con este método se alcanzó un 90,3% de rendimiento, lo cual es bastante elevado, pero se podrían tener algunas mejoras, como por ejemplo, la cantidad de tiempo trabajado del equipo mensualmente.

El equipo KATOX fue aumentando mes a mes la cantidad de tiempo trabajado. En la siguiente tabla se muestra en porcentaje la cantidad de tiempo trabajado.

Tabla 19: Cantidad de tiempo en funcionamiento del equipo KATOX mensualmente.

Tiempo en funcionamiento (%)	
Mes 1	62,20
Mes 2	66,60
Mes 3	80,6
Mes 4	86,6
Mes 5	93,5
Mes 6	99,9

El primer mes solo se llegó al 62,20% de funcionamiento del equipo, lo cual se tenía previsto debido a diferentes factores. Principalmente esto ocurrió por aumento del %LEL debido a la alta carga de contaminantes, por lo que al llegar al 20% se apagaba automáticamente. Además, el equipo operó en invierno, lo que implica un periodo de lluvias que aumenta la humedad del suelo, haciendo que la trampa de agua se llenara, lo que también llevó al apagado automático. Esto fue mejorando en el transcurso de los meses, ya que la carga de contaminantes bajó y las lluvias empezaron a cesar. En un principio, el equipo no contaba con aislamiento de sonido ya que se instaló en un sector cerrado, por lo que las residencias aledañas se vieron afectadas por el ruido que este generaba, lo que llevó a que este se debiera apagar durante la noche. Como esto ocurrió en periodo de pandemia, en la noche había menos ruido de lo habitual por el toque de queda, por lo que el ruido que generaba el equipo se escuchaba más. Otra razón es que ocurrieron cortes de luz en la zona por diversas razones. Estos factores implicaron iniciar nuevamente el equipo de forma manual. Además de lo anterior, también existe el factor humano, ya que había que ir hasta el sitio a encenderlo manualmente, demorando alrededor de 2 horas para que quedara operativo. La hora en que se apagaba el equipo,

siendo muy tarde en la noche o de madrugada y si era fin de semana fueron factores influyentes. Pese a lo anterior, el equipo alcanzó el objetivo en el plazo proyectado.

3.2.2 Análisis de la interacción entre el suelo y los BTEX

La interacción entre el suelo y los contaminantes depende tanto de las propiedades que este posea como de las características de los contaminantes lo cual lleva a que haya diferentes tipos de reacciones en el suelo. En el caso de los compuestos orgánicos como los BTEX, la adsorción es el proceso de mayor importancia que se encuentra determinada por la cantidad de compuestos orgánicos que haya en el suelo, ya sea materia orgánica, ácidos húmicos o fúlvicos, donde el adsorbato (compuesto orgánico) se adhiere al adsorbente (suelo) a través de enlaces débiles como las fuerzas de Van der Waals, enlace por transferencia de carga, interacciones hidrofóbicas y enlace de hidrógeno. Mientras mayor sea la interacción entre adsorbente y adsorbato la acumulación del contaminante será mayor (Rojas Molina, N., 2019).

Este suelo se componía mayormente de arena, grava y rocas con poca cantidad de materia orgánica. En suelos con arena y grava es más rápida la lixiviación que en suelos arcillosos debido a que tiene mayor porosidad, por lo cual si no se actúa en un corto periodo de tiempo, la gasolina podría haber alcanzado mayores profundidades, además, al ser compuestos volátiles, mientras más tiempo transcurra antes de la remediación, mayor podría haber sido el porcentaje volatilizado.

Por último, cabe destacar que en el suelo pueden existir microorganismos con la capacidad de degradar compuestos orgánicos como el tolueno (ATSDR, 2015). Estas son

algunas de las razones por las cuales no es posible llegar a oxidar la cantidad teórica de contaminantes.

3.2.3 Análisis de la oxidación catalítica de los COV

La catálisis es realizada por sustancias que no forman parte ni de los reactantes ni de los productos, interviniendo momentáneamente en la reacción para aumentar la velocidad de reacción.

Existen diferentes tipos de catálisis según la naturaleza de la sustancia. Esta puede ser molecular, autocatálisis o en superficie. La catálisis en superficie es cuando esta ocurre en los átomos superficiales de un sólido, siendo esta la que se encuentra presente en el equipo KATOX. Además, puede encontrarse o no en la misma fase de los reactantes siendo de esta forma homogénea o heterogénea. En la catálisis heterogénea reactante y catalizador se encuentran en diferentes fases, por lo tanto, se puede decir que en el equipo utilizado ocurre una catálisis en superficie heterogénea, ya que el catalizador es un sólido y los contaminantes se encuentran en fase gaseosa.

La catálisis por sólidos es un proceso cíclico, donde se empieza y se termina con el catalizador en su estado original, ocurriendo específicamente en los centros activos.

Las etapas de forma general son las siguientes:

Tabla 20: Etapas de la interacción entre catalizador y contaminante.

Etapa 1	Adsorción de reactante	Reactante + centro activo \rightarrow Reactante adsorbido
Etapa 2	Reacción en superficie	Reactante adsorbido \rightarrow Producto adsorbido
Etapa 3	Desorción del producto	Producto adsorbido \rightarrow Producto + centro activo

Lo que hace el catalizador es disminuir la energía de activación necesaria para que la reacción ocurra, haciendo que el proceso sea más fácil y ocurra a una menor temperatura (Izquierdo, J. F. y col., 2004; Castells, X. y Cadavid, C., 2012). En la siguiente imagen se muestra una reacción heterogénea con y sin catalizador sólido, donde la curva roja indica una reacción sin catalizador, mientras que la curva negra es la reacción con catalizador.

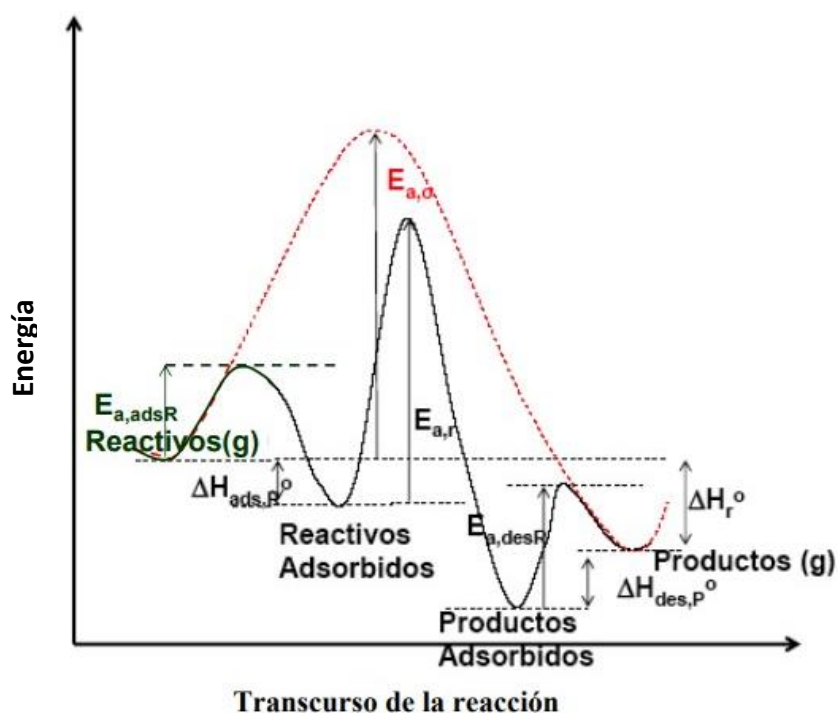


Figura 19: Reacción heterogénea catalizada por un sólido. Imagen disponible en Reactoresquímicos, 2022.

Como se aprecia en la figura, los valores energéticos de reactantes y productos no cambian, al igual que los valores termodinámicos de entalpía, solo cambia la energía de activación requerida para que la reacción ocurra y con ello la temperatura necesaria para que la reacción se lleve a cabo (Izquierdo, J. F. y col., 2004).

En el caso de los COV, para una oxidación total se debe superar una energía de activación alta, por lo que la temperatura requerida es elevada, usualmente mayor a 760 °C, pero al aplicar un catalizador la energía de activación baja, por lo que la temperatura que se necesita es significativamente menor (Rusu, A. O. y Dumitriu, E., 2003). Dependiendo del catalizador la temperatura puede llegar a ser de entre 150 a 400 °C aproximadamente (Hyo-Sik Kim y col., 2022).

Los BTEX son relativamente difíciles de oxidar ya que su estructura es estable al poseer un anillo bencénico. Los catalizadores con base en metales nobles se utilizan mayormente ya que son altamente eficaces para la oxidación de estos compuestos a temperaturas más bajas en comparación con otros materiales (Hyo-Sik Kim y col., 2022). Los más usuales son platino, paladio y rodio (GB CINCO Ambiental).

Los catalizadores a base de paladio (Pd) se usan en un rango de temperatura desde los 200 a 300 °C aproximadamente para la combustión de COV. Estudios indican que al aumentar el Pd superficial la combustión del tolueno se mantuvo en un nivel alto, por lo que se puede decir que a mayor Pd, mayor será la combustión de los BTEX, además, se obtuvo que utilizando MgO-Al₂O₃ (óxido de magnesio y óxido de aluminio) como base había una mayor oxidación (Hyo-Sik Kim y col., 2022).

Los catalizadores a base de platino (Pt) son los más eficientes para la combustión de hidrocarburos cíclicos, pudiendo combustionar a los BTEX en un rango de temperatura entre 150 y 350 °C. Mientras menor sea la partícula de Pt, la fuerza de adsorción de los COV a la superficie del catalizador será mayor. Esto ocurrirá dependiendo del soporte que se utilice para poner dicho catalizador. Estudios indican que al utilizarse Al_2O_3 (óxido de aluminio) como soporte, el tamaño de la partícula de Pt se reduce a menos de 1,2 nm (Hyo-Sik Kim y col., 2022).

Los catalizadores a base de rodio (Rh) son uno de los que poseen menos estudios. Han llamado la atención por tener un buen efecto al catalizar COV clorados, compuestos aromáticos y alcanos. Poseen una alta estabilidad con el material de soporte en comparación con otros catalizadores de metales nobles (como Pd y Pt) y según estudios realizados, su efectividad frente a COV clorados es a temperaturas sobre los 370 °C (Hyo-Sik Kim y col., 2022).

La estabilidad del catalizador a base de Pd es mayor a la del catalizador a base de Pt lo cual es mejor para la combustión de compuestos orgánicos cíclicos como lo son los BTEX. Se ha visto que aleaciones de metales funcionan mejor como catalizador que un solo metal. Un estudio indica que al utilizarse un catalizador de nanopartículas a base de Pd-Pt la combustión del benceno fue muy favorable, debido a la interacción entre los materiales activos (Hyo-Sik Kim y col., 2022).

Considerando estos tipos de catalizadores, para este caso cualquiera de los tres habría sido una buena opción para la oxidación de los compuestos, ya que la temperatura que

había al interior del equipo KATOX era de aproximadamente 330 °C como se puede ver en el anexo 3.

3.2.4 Muestreo de verificación

Los datos obtenidos de la concentración de gases influentes y la cantidad de masa de contaminante oxidada durante los seis meses de funcionamiento del equipo KATOX indican que la remediación está llegando a su fin, ya que la concentración de gases influentes llegó hasta el límite de detección creando una curva de forma asintótica y la masa de contaminantes oxidada fue disminuyendo en cuanto a la proporción que se oxidaba mensualmente.

Es por ello que se procedió a realizar dos muestreos de verificación alrededor del estanque N°3 para terminar con la remediación y desinstalar el equipo.



Figura 20: Zonas de muestreo posterior a la remediación.

Las perforaciones realizadas fueron ejecutadas de la misma forma que los PE, a diferencia de que la profundidad máxima que alcanzaron fue de 4,00 m.

Se tomaron muestras metro a metro y fueron analizadas en terreno con el PID, obteniéndose los siguientes resultados.

Tabla 21: Valores de COV obtenidos con el PID en muestreos de verificación.

Profundidad (m)	Muestreo 1 de verificación		Muestreo 2 de verificación	
	Pozo 1	Pozo 2	Pozo 3	Pozo 4
1,00	0	0	0	0
2,00	0	2	0	0
3,00	5	57	1	22
4,00	26	36	13	11

Como se puede apreciar, los niveles de COV detectados con el PID bajaron considerablemente con respecto a los datos obtenidos en los PE anteriores (tabla 13).

Para poder de determinar si efectivamente la remediación alcanzó los valores estipulados en la Normativa Canadiense de Alberta Tier I, se mandaron a analizar 4 muestras de suelo (las muestras de mayor profundidad) al laboratorio ALS por el método GC-MS. Las muestras fueron rotuladas y almacenadas en una nevera para mantener la cadena de frío de las muestras hasta llegar al laboratorio y ser finalmente analizadas.

Los resultados obtenidos de estas muestras se presentan a continuación.

Tabla 22: Resultados obtenidos de los muestreos de verificación comparados con la Normativa de Alberta.

		Benceno	Tolueno	Etilbenceno	Xilenos
Inhalación de vapores comercial/industrial (mg/kg)		1,2	1600	760	210
Inhalación de vapores residencial (mg/kg)		0,14	180	86	23
Muestreo 1 de verificación	Muestra 1	<0,4	<0,4	<0,4	<0,5
	Muestra 2	<0,4	<0,4	<0,4	<0,5
Muestreo 2 de verificación	Muestra 3	<0,4	<0,4	<0,4	<0,5
	Muestra 4	<0,4	<0,4	<0,4	<0,5
Límite de Detección		----	----	----	----
Límite de Cuantificación		0,4	0,4	0,4	0,5

Como se puede apreciar en la tabla 22, todos los valores obtenidos del análisis de suelo en laboratorio se encuentran por debajo de los valores límite de la inhalación de vapores para un suelo de uso comercial/industrial, sin embargo, el valor del benceno en la inhalación de vapores para un suelo de uso residencial solo llegó hasta 0,4 mg/kg ya que es el límite de cuantificación que se tiene, por lo cual no es posible saber si se encuentra dentro de la normativa de inhalación de vapores para suelo residencial o no. El resto de los valores de inhalación de vapores para suelo de uso residencial se encuentran dentro de los límites propuestos en la Normativa Alberta Tier I, por lo cual se puede decir que la remediación del suelo se logró exitosamente, lo que implica que no se encuentran concentraciones peligrosas para la salud humana.

Con respecto a los compuestos liberados al ambiente de forma menos dañina para la salud de las personas, se debe considerar que, como el CO₂ es un gas de efecto

invernadero, al liberarlo a la atmósfera contribuye al calentamiento global, lo cual ha ido aumentando en el tiempo debido a la emisión de gases generados por las actividades realizadas por el hombre. Para poder mitigar la liberación de dióxido de carbono al medio ambiente se podría utilizar un electrocatalizador de una aleación de los metales galio y cerio en forma líquida, cuyo propósito es reducir electroquímicamente el CO_2 en carbono sólido, permitiendo que se inyecte bajo tierra o siendo utilizado para producir combustibles. Este estudio fue realizado por investigadores australianos, publicado en Nature Communication en 2019 (Esrafilzadeh, D. y col., 2019).

IV. CONCLUSIONES

Con las condiciones bajo las cuales se trabajó, fue posible llegar hasta los parámetros indicados en la Normativa Canadiense de Alberta Tier I para inhalación de vapores en suelo de uso comercial/industrial y residencial utilizando el equipo KATOX, lo cual ayuda a que las personas que viven alrededor del sitio no tengan efectos perjudiciales para su salud y cumpliéndose los objetivos planteados en este Seminario de Título.

Al poder realizar un modelo Fuente-Ruta-Receptor fue posible identificar a los principales afectados dentro de un radio de 500 metros, concluyendo que el sector era mixto (es decir residencial y comercial).

Si se hubiera elegido un método *ex situ*, se tendría que haber parado la producción en la estación de servicio, lo que habría generado un costo demasiado alto para la empresa contratista, ya que habrían sido meses sin generar ingresos en esta, sumándole los costos por romper todo el hormigón y adocreto y extraer todo el suelo contaminado, además de pagar el sitio de disposición final o el sitio donde se trataría el suelo contaminado, el suelo sin contaminación para rellenar, la maquinaria, entre otros. El excavar hasta los 12 metros de profundidad aproximadamente, para poder retirar todo el suelo contaminado no era factible tanto por la cercanía a las residenciales aledañas, donde se tendría que haber realizado una estructura de contención provisional para que no se derrumbaran, como por el tamaño de la estación de servicio, donde se tendría que haber desmantelado toda la estación de servicio, lo cual habría elevado demasiado el costo de la remediación.

Se podría decir que este método es el mejor en cuanto a tiempo de tratamiento y costo, remediando a una mayor profundidad, ya que para poder descontaminar el sitio no se tuvo más que hacer pozos de extracción e instalación del equipo, lo que permitía que la estación de servicio siguiera operando a lo largo de los meses que demoró en remediar el suelo, por lo cual la empresa no obtuvo pérdidas en cuanto a las ventas que genera dicha estación de servicio.

No se tiene conocimiento del metal noble utilizado en el catalizador, pero el mejor para este tipo de contaminantes sería el de Pd por su rango de temperatura y su alta estabilidad, lo cual favorece a la oxidación de compuestos orgánicos cíclicos.

Como resultado se obtuvo un rendimiento de 90,3%, lo cual es bastante alto y la diferencia entre la cantidad de contaminante real y teórica puede deberse a que no es un ambiente controlado y cerrado, por lo cual pudo haber ocurrido lixiviación, volatilización y/o degradación por microorganismos, además de que algún porcentaje pudo haberse adsorbido a materia orgánica que se encontrara en el suelo.

Finalmente, como proyección a este trabajo, para poder mitigar la emisión de CO₂ al medio ambiente, se podría utilizar un electrocatalizador que convierte el dióxido de carbono en carbono sólido, el cual puede ser utilizado para la producción de combustible.

V. REFERENCIAS

- Agencia para Sustancias Tóxicas y el Riesgo de Enfermedades (ATSDR).** 2007a. Resumen de Salud Pública Benceno CAS# 71-43-2. Departamento de Salud y Servicios Humanos de los EE.UU. Servicio de Salud Pública. Véase en línea en https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs3.html. Página web visitada 8 de noviembre de 2022.
- Agencia para Sustancias Tóxicas y el Riesgo de Enfermedades (ATSDR).** 2007b. Reseña Toxicológica del Xileno CAS# 1330-20-7. Departamento de Salud y Servicios Humanos de los EE.UU. Servicio de Salud Pública. Véase en línea en https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts71.html. Página web visitada 8 de noviembre de 2022.
- Agencia para Sustancias Tóxicas y el Riesgo de Enfermedades (ATSDR).** 2010. Reseña Toxicológica del Etilbenceno CAS# 100-41-4. Departamento de Salud y Servicios Humanos de los EE.UU. Servicio de Salud Pública. Véase en línea en https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts110.html. Página web visitada 8 de noviembre de 2022.
- Agencia para Sustancias Tóxicas y el Riesgo de Enfermedades (ATSDR).** 2015. Resumen de Salud Pública Tolueno CAS#: 108-88-3. Departamento de Salud y Servicios Humanos de los EE.UU. Servicio de Salud Pública. Véase en línea en https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs56.html. Página web visitada 8 de noviembre de 2022.
- Agromática.** Véase en línea en <https://www.agromatica.es/textura-del-suelo/>. Página web visitada 8 de noviembre de 2022.
- Alberta Environment and Parks (AEP).** 2016. Alberta Tier I Soil and Groundwater Remediation Guidelines. Land Policy Branch. Policy and Planning Division. 197 pp.
- Altamirano, C.** 2017. Determinación de benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos (BTEX) en aire ambiente del Distrito Metropolitano de Quito mediante cromatografía de gases con detector de ionización de llama. Tesis de Licenciatura PUCE. Quito. Véase en línea en [http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/13799/Determinaci%
c3%
b3n%
20de%
20BTEX%
20en%
20aire%
20ambiente%
20del%
20DMQ%
20por%
20cromatogr
afia%
20de%
20gases%
20FID-](http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/13799/Determinaci%c3%b3n%20de%20BTEX%20en%20aire%20ambiente%20del%20DMQ%20por%20cromatograf%20de%20gases%20FID-)

%20Camila%20Altamirano.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Página web visitada 8 de noviembre de 2022.

Baird, C. 2001. Química Ambiental. Editorial Reverté S.A. University of Western Ontario. pp. 200.

Barquero Quirós, M. 2006. Principios de la cromatografía de gases. 1 ed. Universidad de Costa Rica. Facultad de Ciencias. Escuela de Química. pp 31.

Blumat. Chuzo Hexagonal 11/8" 1,80m. Abastecimiento y soluciones logísticas. Véase en línea en <http://www.blumat.cl/product/chuzo-hexagonal-1-1-8-180m/>. Página web visitada 8 de noviembre de 2022.

Bolivar, G. 2018. Cromatografía de gases. Lifeder. Véase en línea en <https://www.lifeder.com/cromatografia-de-gases/>. Página web visitada 8 de noviembre de 2022.

Cajal, A. 2017. ¿Cuál es la Composición del Suelo?. Lifeder. Véase en línea en <https://www.lifeder.com/composicion-del-suelo/>. Página web visitada 8 de noviembre de 2022.

Castells, X. y Cadavid, C. 2012. Tratamiento térmico de gases. Monografía. Tratamiento y valorización energética de residuos. Madrid. pp 790. Véase en línea en https://books.google.com.bo/books?id=O4l_J4ymlpsC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false. Página web visitada 8 de noviembre de 2022.

Chang, R., College, W. 2010. Química 10ª. EDICIÓN pp 338, 1026-1039.

Christensen. Máquinas y equipos. Testiguera DM14. Industrial Products. Véase en línea en <https://www.chrisco.cl/productos/maquinas-y-equipos/maquinas-para-la-construccion/testiguera-dm14.php>. Página web visitada 8 de noviembre de 2022.

Coprelec. Barreno Helicoidal C-754 Coofeste. Véase en línea en <https://coprelec.cl/product/barreno-helicoidal-c-754-coofeste/>. Página web visitada 8 de noviembre de 2022.

Cromatografía de gases. Véase en línea en https://www.mncn.csic.es/docs/repositorio/es_ES/investigacion/cromatografia/cromatografia_de_gases.pdf. Página web visitada 8 de noviembre de 2022.

Decreto 38. 2014. Establece norma de emisión de ruidos generados por fuentes que indica, elabora a partir de la revisión del Decreto N° 146, de 1997, del Ministerio Secretaría

General de la Presidencia. Ministerio del Medio Ambiente. Véase en línea en <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1040928>. Página web visitada 8 de noviembre de 2022.

Decreto 160. 2009. Aprueba reglamento de seguridad para las instalaciones y operaciones de producción y refinación, transporte, almacenamiento, distribución y abastecimiento de combustibles líquidos, Art. 15°, Art. 33°. Véase en línea en <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1004120>. Página web visitada 8 de noviembre de 2022.

Decreto Supremo 90. 1996. Aprueba reglamento de seguridad para el almacenamiento, refinación, transporte y expendio al público de combustibles líquidos derivados del petróleo. Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción. Cap. I, II, V y VI. Véase en línea en https://www.cne.cl/archivos_bajar/ds_90_de_seguridad_de_instalaciones_de_hc_de_1996.pdf. Página web visitada 8 de noviembre de 2022.

Departamento Estatal de Servicios de Salud de Texas (Texas DSHS). 2015. Información sobre los xilenos. Publicación No. 09-14653A. Programa de Evaluación y Consulta de Salud Pública. Véase en línea en <https://www.dshs.texas.gov/epitox/educational/XyleneSp.doc#:~:text=Los%20xileno s%20pueden%20introducirse%20en,de%20desechos%20en%20un%20vertedero.&text=Los%20xileno s%20no%20se%20mezclan%20bien%20con%20el%20agua>. Página web visitada 8 de noviembre de 2022.

Echevarría, M. y Molano, C. 2005. Modelo de Remediación de Subsuelos Contaminados con Gasolina. Tesis (Magister en Ingeniería Civil). Universidad de los Andes. Bogotá. Véase en línea en <https://repositorio.uniandes.edu.co/handle/1992/10609?show=full>. Página web visitada 8 de noviembre de 2022.

EPA (United States Environmental Protection Agency). 2016. TRIListed Chemicals. Toxics Release Inventory (TRI) Program. Véase en línea en <https://www.epa.gov/toxics-release-inventory-tri-program/tri-listed-chemicals>. Página web visitada 8 de noviembre de 2022.

Esrafilzadeh, D., Zavabeti, A., Jalili, R., Atkin, P., Choi, J., Carey, B., Brkljača, R., O'Mullane, A. P., Dickey, M. D., Officer, D. L., MacFarlane, D. R., Daeneke, T., Kalantar-Zadeh, K. 2019. Room temperature CO₂ reduction to solid carbon species on liquid metals featuring atomically thin ceria interfaces. *Nature Communications* 10. Artículo número 865. Véase en línea en <https://www.nature.com/articles/s41467-019-08824-8>. Página web visitada 8 de noviembre de 2022.

- FCH (Fundación Chile).** 2012. Guía Metodológica para la Gestión de Suelos con Potencial Presencia de Contaminantes. Ministerio del Medio Ambiente. Gobierno de Chile. Véase en línea en <https://fch.cl/wp-content/uploads/2019/10/guia-metodologica-suelos-digitalbaja-1.pdf>. Página web visitada 8 de noviembre de 2022.
- FCH (Fundación Chile).** 2019. Manual de Tecnologías de Remediación de Sitios Contaminados. Gobierno de Chile. Véase en línea en https://fch.cl/wp-content/uploads/2019/10/manual-de-tecnologias-de-remediacion-de-sitios-contaminados_baja-1.pdf. Página web visitada 8 de noviembre de 2022.
- GB CINCO Ambiental.** Sistema de remediación de suelos mediante SVE (Soil Vapor Extraction) y BioVenting.
- GB CINCO ambiental.** 2014. Estudios Ambientales en terreno, Caracterización de sitios Fase I y II. Descripción del servicio. Véase en línea en <http://gb5.cl/estudios-ambientales-en-terreno/caracterizacion-de-sitios-fase-i-y-ii/>. Página web visitada 8 de noviembre de 2022.
- Gobierno de Alberta.** 2000. Water Act. Revised Statutes of Alberta 2000.
- Gobierno de Alberta.** 2006. Ley de mejora y protección del medio ambiente. Estatutos revisados de Alberta 2000, Capítulo E-12. con modificaciones vigentes a partir del 24 de mayo de 2006.
- Gobierno Regional Metropolitano.** Datos Geográficos. Véase en línea en <https://www.gobiernosantiago.cl/datos-geograficos/>. Página web visitada 8 de noviembre de 2022.
- Hyo-Sik Kim, Hyun-Ji Kim, Ji-Hyeon Kim, Jin-Ho Kim, Suk-Hwan Kang, Jae-Hong Ryu, No-Kuk Park, Dae-Sik Yun, Jong-Wook Bae.** 2022. Noble-Metal-Based Catalytic Oxidation Technology Trends for Volatile Organic Compound (VOC) Removal. *Catalysts*, 12, 63. Véase en línea en <https://www.mdpi.com/2073-4344/12/1/63/htm#>. Página web visitada 8 de noviembre de 2022.
- ILO (International Labour Organization).** 2002a. ICSC: 0078. Tolueno. Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo. Ministerio de trabajo y economía social. Gobierno de España. Véase en línea en https://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_lang=es&p_card_id=0078&p_version=2. Página web visitada 8 de noviembre de 2022.
- ILO (International Labour Organization).** 2002b. ICSC: 0084. o-Xileno. Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo. Ministerio de trabajo y economía social. Gobierno de España. Véase en línea en

https://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_lang=es&p_card_id=0084&p_version=2. Página web visitada 8 de noviembre de 2022.

ILO (International Labour Organization). 2002c. ICSC: 0085. m-Xileno. Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo. Ministerio de trabajo y economía social. Gobierno de España. Véase en línea en https://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_lang=es&p_card_id=0085&p_version=2. Página web visitada 8 de noviembre de 2022.

ILO (International Labour Organization). 2002d. ICSC: 0086. p-Xileno. Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo. Ministerio de trabajo y economía social. Gobierno de España. Véase en línea en https://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_lang=es&p_card_id=0086&p_version=2. Página web visitada 8 de noviembre de 2022.

ILO (International Labour Organization). 2007. ICSC: 0268. Etilbenceno. Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo. Ministerio de trabajo y economía social. Gobierno de España. Véase en línea en https://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_lang=es&p_card_id=0268&p_version=2. Página web visitada 8 de noviembre de 2022.

ILO (International Labour Organization). 2016. ICSC: 0015. Benceno. Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo. Ministerio de trabajo y economía social. Gobierno de España. Véase en línea en https://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_card_id=15&p_version=2&p_lang=es. Página web visitada 8 de noviembre de 2022.

Industrial Scientific. glosario educación general sobre gases. véase en línea <https://www.indsci.com/es/capacitacion/educacion-general-sobre-gases/glossary/>. Página web visitada 8 de noviembre de 2022.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). 2003a. 4.7 Benceno. Gobierno de Colombia. Véase en línea en <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/018903/Links/Guia7.pdf>. Página web visitada 8 de noviembre de 2022.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). 2003b. 4.25 Tolueno. Gobierno de Colombia. Véase en línea en <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/018903/Links/Guia25.pdf>. Página web visitada 8 de noviembre de 2022.

- ISO 11074.** 2015. Soil quality. Vocabulary. Véase en línea en <https://www.iso.org/standard/59259.html>. Página web visitada 8 de noviembre de 2022.
- Izquierdo, J. F., Cunill, F., Tejero, J., Iborra, M., Fité, C.** 2004. Cinética de las Reacciones Químicas. Edicions Universitat de Barcelona. 143 - 151 pp. Véase en línea en https://www.researchgate.net/publication/337602300_Cinetica_de_las_Reacciones_Quimicas. Página web visitada 8 de noviembre de 2022.
- Ley 19300.** 2010. Aprueba ley sobre bases generales del medio ambiente. Art. 1°, Art. 2° c). Véase en línea en <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=30667>. Página web visitada 8 de noviembre de 2022.
- Lladó Fernández, S.** 2012. Biorremediación de Suelos Contaminados por Hidrocarburos Pesados y Caracterización de Comunidades Microbianas Implicadas. Universidad de Barcelona. Facultad de Biología. Departamento de Microbiología. España. Véase en línea en http://diposit.ub.edu/dspace/bitstream/2445/42417/5/SLLF_TESIS.pdf. Página web visitada 8 de noviembre de 2022.
- Macwilliams, K.** 2018. What is a phase II environmental site assessment?. PARTNER. Engineering and Science, Inc. Véase en línea en <https://www.partneresi.com/resources/blog/what-is-a-phase-ii-environmental-site-assessment>. Página web visitada 8 de noviembre de 2022.
- McNair, H. M.** 1981. Cromatografía de gases. Secretaría general de la OEA. Washington, D.C.
- MSA, the safe company.** 2015. Detectores de fotoionización (PIDs), Teoría, usos y aplicaciones. México Véase en línea en [http://s7d9.scene7.com/is/content/minesafetyappliances/Teor%C3%ADa,%20usos%20y%20aplicaciones%20de%20Detectores%20de%20fotoionizaci%C3%B3n%20\(PIDs\)](http://s7d9.scene7.com/is/content/minesafetyappliances/Teor%C3%ADa,%20usos%20y%20aplicaciones%20de%20Detectores%20de%20fotoionizaci%C3%B3n%20(PIDs)). Página web visitada 8 de noviembre de 2022.
- NJ Health.** 2016a. Derecho a saber. Hoja Informativa sobre Sustancias Peligrosas. Etilbenceno. New Jersey Department of Health. Véase en línea en <https://www.nj.gov/health/eoh/rtkweb/documents/fs/0851sp.pdf>. Página web visitada 8 de noviembre de 2022.
- NJ Health.** 2016b. Derecho a saber. Hoja Informativa sobre Sustancias Peligrosas. Xilenos. New Jersey Department of Health. Véase en línea en <https://www.nj.gov/health/eoh/rtkweb/documents/fs/2014sp.pdf>. Página web visitada 8 de noviembre de 2022.

Ortega Romero, M. 2012. Modelización de un Proceso de Biorremediación de suelos contaminados con gasoil. Tesis doctoral. Departamento de Ingeniería Química y Combustibles. Véase en línea en <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.14727>. Página web visitada 8 de noviembre de 2022.

Proyecto AprendEmergencias puedes salvar una vida. Teoría del fuego. véase en línea <https://www.aprendemergencias.es/incendios/teor%C3%ADa-del-fuego/>. Página web visitada 8 de noviembre de 2022.

PubChem. 2021a. National Center for Biotechnology Information. Compound Summary for CID 241, Benzene. Véase en línea en <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Benzene>. Página web visitada 22 de octubre de 2021.

PubChem. 2021b. National Center for Biotechnology Information. Compound Summary for CID 1140, Toluene. Véase en línea en <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Toluene>. Página web visitada 22 de octubre de 2021.

PubChem. 2021c. National Center for Biotechnology Information. Compound Summary for CID 7500, Ethylbenzene. Véase en línea en <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Ethylbenzene>. Página web visitada 22 de octubre de 2021.

PubChem. 2021d. National Center for Biotechnology Information. Compound Summary for CID 7237, o-Xylene. Véase en línea en <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/o-Xylene>. Página web visitada 22 de octubre de 2021.

PubChem. 2021e. National Center for Biotechnology Information. Compound Summary for CID 7929, m-Xylene. Véase en línea en <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/m-Xylene>. Página web visitada 22 de octubre de 2021.

PubChem. 2021f. National Center for Biotechnology Information. Compound Summary for CID 7809, p-Xylene. Véase en línea en <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/p-Xylene>. Página web visitada 22 de octubre de 2021.

Química en casa. Hidrocarburos aromáticos: Benceno y derivados. Benceno-Fórmula. Véase en línea en <https://quimicaencasa.com/hidrocarburos-aromaticos-benceno-y-derivados/benceno-formula/>. Página web visitada 8 de noviembre de 2022.

- RAE (Real Academia Española).** 2021. Diccionario de la Lengua Española. Suelo. Véase en línea en <https://dle.rae.es/suelo>. Página web visitada 15 de septiembre de 2021.
- Reactoresquímicos.** Unidad IV. Véase en línea en <https://reactorquimico.wordpress.com/unidad-iv/cinetica-quimica-de-reacciones-heterogeneas/>. Página web visitada 8 de noviembre de 2022.
- Redlin, J. y Moore, N.** 2018. What is a phase I enviromental site assessment. PARTNER. Engineering and Science, Inc. Véase en línea en <https://www.partneresi.com/resources/blog/what-is-a-phase-i-environmental-site-assessment>. Página web visitada 8 de noviembre de 2022.
- Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes (PRTR España).** 2007a. Benceno. Ministerio para la Transmisión Ecológica y el Reto Demográfico. Gobierno de España. Véase en línea en <https://prtr-es.es/Benceno-715112007.html>. Página web visitada 8 de noviembre de 2022.
- Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes (PRTR España).** 2007b. Etilbenceno. Ministerio para la Transmisión Ecológica y el Reto Demográfico. Gobierno de España. Véase en línea en <https://prtr-es.es/Etilbenceno-712112007.html>. Página web visitada 8 de noviembre de 2022.
- Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes (PRTR España).** 2007c. Tolueno. Ministerio para la Transmisión Ecológica y el Reto Demográfico. Gobierno de España. Véase en línea en <https://prtr-es.es/Tolueno,15660,11,2007.html#>. Página web visitada 8 de noviembre de 2022.
- Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes (PRTR España).** 2007d. Xilenos. Ministerio para la Transmisión Ecológica y el Reto Demográfico. Gobierno de España. Véase en línea en <https://prtr-es.es/Xilenos,15665,11,2007.html>. Página web visitada 8 de noviembre de 2022.
- Rodríguez E., N., McLaughlin, M., Pennock, D.** 2019. La contaminación del suelo: una realidad oculta. FAO. Roma. pp 3-4. Véase en línea en <https://www.fao.org/3/i9183es/i9183es.pdf>. Página web visitada 8 de noviembre de 2022.
- Rojas Molina, N.** 2019. Validación de una metodología para determinación de benceno en suelos mediante HS-GC-FID y su aplicación en biorremediación en suelos co-contaminados con Hg (II). Seminario de Título. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias. Véase en línea en

<https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/168732/Nataly%20Rojas%20Molina.pdf?sequence=1>. Página web visitada 8 de noviembre de 2022.

Rusu, A. O. y Dumitriu, E. 2003. Destruction of volatile organic compounds by catalytic oxidation. *Environmental Engineering and Management Journal*. Vol 2. No 4. 273-302 pp. Véase en línea en <http://www.eemj.icpm.tuiasi.ro/pdfs/vol2/no4/2oana%20rusu.pdf>. Página web visitada 8 de noviembre de 2022.

Sánchez M., J. y Alcántara L., A. 2007. Compuestos orgánicos volátiles en el medio ambiente. *Monografías de la Real Nacional de Farmacia*. Véase en línea en <https://core.ac.uk/download/pdf/230313907.pdf>. Página web visitada 8 de noviembre de 2022.

Sensotran, s.l. Factores de Corrección, Potenciales de Ionización y características de calibración. *Sensores y transductores de gases*. Revisión 02/00. Véase en línea en <https://studylib.es/doc/6581330/potenciales-de-ionizaci%C3%B3n--ip--y-factores-de>. Página web visitada 8 de noviembre de 2022.

Skoog, D., Holler, F. y Nieman, T. 2001. *Principios de Análisis instrumental*. Quinta edición. España. pp 759-770.

Skoog, D., Holler, F. y Nieman, T. 2008. *Principios de Análisis instrumental*. Sexta edición. España. pp 550-555, 791-800.

Sposito, G. 2008. *The Chemistry of Soils*. Segunda edición. Oxford University Press EE.UU. Véase en línea en <http://base.dnsgb.com.ua/files/book/Agriculture/Soil/The-Chemistry-of-Soils.pdf>. Página web visitada 8 de noviembre de 2022.

Stashenko, E. y Martínez, J. 2009. Aspectos prácticos de la ionización con electrones en la obtención de espectros de masas y su interpretación. *Scientia Chromatographica*. Volumen 1. n° 4. pp 19-36. Véase en línea en <https://www.iicweb.org/scientiachromatographica.com/files/v1n4a3.pdf>. Página web visitada 8 de noviembre de 2022.

Talleres Segovia. Herramientas de perforación/Martillo de fondo. Véase en línea en https://www.talleresegovia.com/es/drilling_experts/herramientas_de_perforacion/martillo_en_fondo. Página web visitada 8 de noviembre de 2022.

USDA. 2014. *Soil survey field and laboratory methods manual*. Soil Survey Investigations Report No. 51, version 2. Natural Resources Conservation Service. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. Véase en línea en https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb1244466.pdf. Página web visitada 8 de noviembre de 2022.

USDA. 2017. Soil Survey Manual, By Soil Science Division Staff. Departamento de Agricultura de Estados Unidos. EE.UU. Véase en línea en <https://www.iec.cat/mapasols/DocuInteres/PDF/Llibre50.pdf>. Página web visitada 8 de noviembre de 2022.

ANEXOS

ANEXO 1: Componentes de un cromatógrafo de gases.

La cromatografía de gases es un método físico de separación que permite determinar los diferentes compuestos de una mezcla de gases. En este la muestra se volatiliza y se inyecta en la cabeza de una columna cromatográfica (Skoog, D. y col., 2001). La inyección se realiza a temperatura elevada para asegurar la volatilización de la muestra y se transporta en una corriente de gas inerte, transportando los analitos a través de la columna cromatográfica, la cual, a través de mecanismo de partición, separa los compuestos (Altamirano, C., 2017). La fase móvil no interactúa con el analito, lo único que hace es transportarlo a través de la columna (Skoog, D. y col., 2001). Luego de ello, los componentes ya separados llegan al detector donde la señal es amplificada para poder ser interpretada.

Un cromatógrafo de gases se compone básicamente de un gas portador, inyección de la muestra, columna cromatográfica, horno y detector para finalmente llegar a un amplificador y obtener un cromatograma, que es un registro del analito en estudio como se muestra en la siguiente figura.

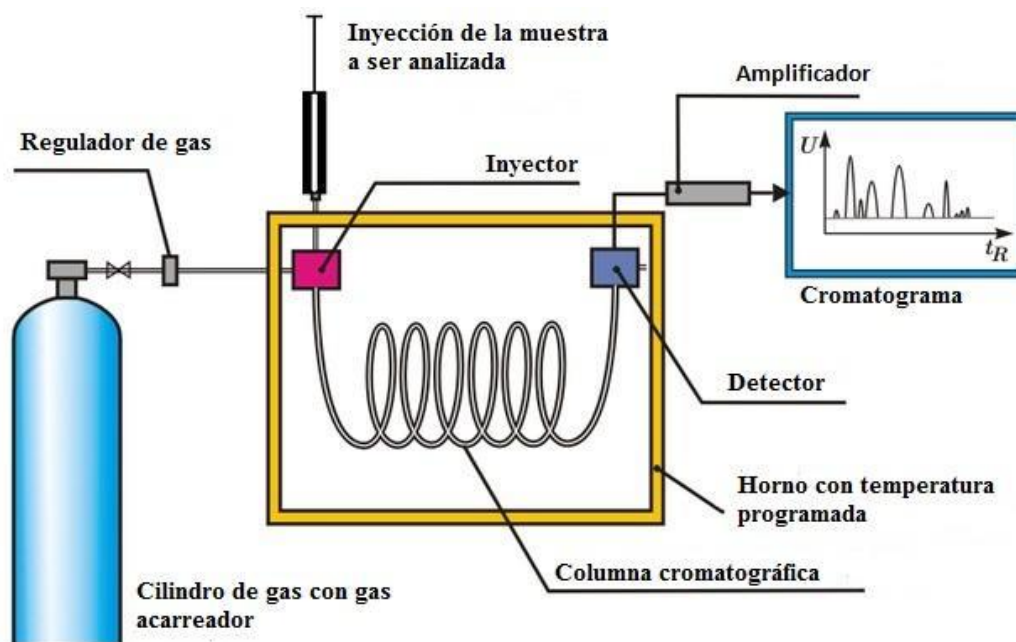


Figura 1: Cromatógrafo de gases. Imagen disponible en Bolivar, G., 2018.

- Gas portador.

El gas portador o fase móvil es el encargado de transportar el analito a través de la columna cromatográfica, para ello el gas debe ser inerte y de alta pureza para que no exista interacción con el analito ni con la fase estacionaria, que es el que retiene las moléculas de analito por adsorción (Altamirano, C., 2017). La fase estacionaria utilizada comúnmente para hidrocarburos es el polidimetilsiloxano. Por lo general como fase móvil se utiliza helio o nitrógeno (Skoog, D. y col., 2008).

- Sistema de inyección de la muestra

La inyección de la muestra se debe realizar como un tapón de vapor, ya que una inyección lenta implicaría una mala resolución y un ensanchamiento de las bandas. Para la inyección de la muestra generalmente se utiliza una microjeringa que permite inyectar

una muestra líquida o gaseosa a través de un diafragma de goma de silicona en una cámara de vaporización instantánea que se encuentra en la cabeza de la columna. Esta cámara se encuentra generalmente a una temperatura de 50 °C más que el punto de ebullición del componente de la muestra menos volátil (Skoog, D. y col., 2001). Hay diferentes tipos de inyección, split, splitless y on column. El split o con división de flujo es mayormente utilizado cuando la concentración del analito es alta, ya que ingresa solo una pequeña parte del volumen inyectado y el resto es desechado. El splitless o sin división de flujo se utiliza mayormente para analizar trazas, ya que la mayor parte de la muestra entra en la columna. El on column se utiliza en cromatografía de gases con capilares donde la muestra al ser inyectada se vaporiza al programar la temperatura de la columna o entrada y por consiguiente el analito se separa del solvente por efecto térmico. Generalmente la temperatura inicial es baja, produciéndose un aumento brusco de la temperatura (Skoog, D. y col., 2008).

- Columna capilar

La columna capilar es un tubo capilar abierto de acero inoxidable, vidrio o sílice fundida, que cumple la función de separar los analitos mediante la fuerza de interacción entre la fase móvil y la fase estacionaria a medida que va avanzando a través de ella. La fase estacionaria es la que se encuentra al interior de la columna, pudiendo ser un líquido que recubre la columna con una película uniforme (WCOT), un sólido que se une a la pared de la columna (PLOT) o un líquido sobre un sólido inerte, que puede ser sílice o alúmina, que actúa como soporte (SCOT). Este último diseño de columna es el más recomendable al momento de analizar trazas y posee un mayor factor de retención por lo

cual su resolución es mejor. Para elegir el indicado se debe tomar en cuenta la polaridad de los solutos respecto a la fase móvil, ya que esto afectará directamente la separación (Altamirano, C., 2017; Skoog, D. y col., 2008).

- Horno

La columna se sitúa en un horno al que se le puede aplicar una temperatura controlada. La temperatura de este dependerá de la temperatura de ebullición de la muestra y del grado de separación requerido, siendo el determinante para la elución de los compuestos y el tiempo de análisis. Si la temperatura es igual o ligeramente superior al punto de ebullición promedio de la muestra se obtendrá un tiempo de elución desde unos 2 a 30 minutos. Si la temperatura de ebullición es muy diferente, se puede realizar una programación de temperatura, donde se aumenta la temperatura de la columna de forma continua o por etapas (Skoog, D. y col., 2001).

- Sistema de detección

El detector de ionización de llama es el más utilizado para compuestos orgánicos. En este se quema en una llama de hidrógeno-aire, produciéndose iones y electrones que conducen la electricidad (Barquero Quirós, M., 2006). Este detector se basa en el principio de que la conductividad eléctrica de un gas es directamente proporcional a la concentración de las partículas cargadas dentro del gas (McNair, H. M., 1981). Si se aplica una diferencia de potencial entre el extremo del quemador y un electrodo colector sobre la llama se crea una corriente de iones que posteriormente se moviliza hacia un amplificador. La cantidad de iones producidos es proporcional a la cantidad de átomos de carbono pirolizados en la llama por unidad de tiempo, por lo cual es más sensible a la

masa que a la concentración. Posee una sensibilidad alta y una respuesta lineal, pero destruye la muestra durante la combustión (Barquero Quirós, M., 2006). La figura 2 muestra como está compuesto un detector de ionización de llama.

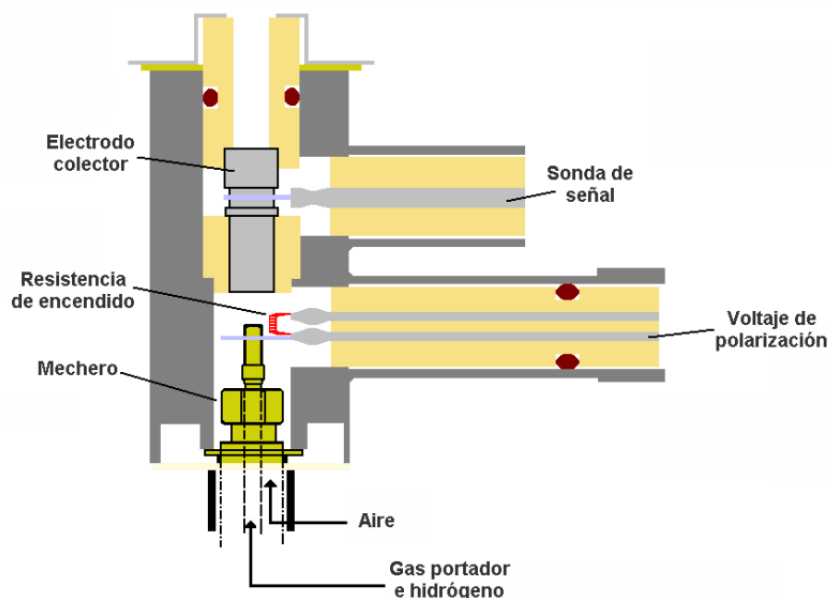
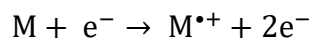


Figura 2: Detector de ionización de llama. Imagen disponible en *Cromatografía de gases*, 2022.

El detector de espectrometría de masas se basa en la formación de iones a partir de las moléculas de analito para hallar su masa molecular. Para ello se bombardea el vapor del analito con un haz de electrones de 70 eV, provocando una pérdida de un electrón de este, lo cual forma un ion con una única carga positiva que se genera cuando los electrones de elevada energía se acercan lo suficiente a las moléculas para hacerles perder electrones por repulsión electrostática. Si se alcanza la energía o PI necesaria para retirar un electrón de la molécula neutra en fase vapor ocurre la formación de un ion molecular, cuya masa es igual a la de la molécula.



Donde M es la molécula del analito y $M^{•+}$ es su ion. Hay diferentes fuentes de iones para lograr la ionización del analito, siendo el más utilizado el Impacto de Electrones, que es una fuente de tipo gaseosa donde en un principio la muestra se hace vapor y luego se ioniza. Las fuentes de tipo gaseosas suelen utilizarse para compuestos térmicamente estables y volatilizables con una temperatura de ebullición bajo los 500°C (Skoog, D. y col., 2008; Stashenko, E. y Martínez, J., 2009).

Los iones positivos que se producen por la ionización pasan a través de la rendija del espectrómetro de masas, donde se clasifican de acuerdo a su relación masas-carga (m/z) originando un espectrómetro de masas. El espectrómetro de masas barre la masa en forma repetida durante el experimento cromatográfico, es por ello que se pueden obtener diferentes cromatogramas de un momento exacto para identificar las especies que salen en este o se puede sumar la abundancia de ion graficarla en función del tiempo para obtener un cromatograma de iones totales. (Skoog, D. y col., 2008).

ANEXO 2: Perfiles de los pozos de extracción.

Tabla 1: Perfil de pozo de extracción 1 (PE1).

Ilustración	Profundidad (m)	Descripción Litológica	Descripción organoléptica
	0,00-0,20	Hormigón	Con olor e impregnación
	0,20-1,40	Suelo arenoso con presencia de grava de baja plasticidad y porosidad alta.	Presenta olor a hidrocarburo.
	1,40-3,50	Suelo rocoso de color 5YR 3/2 duro, sin plasticidad, seco y porosidad alta.	Presenta olor a hidrocarburo.
	3,50-9,50	Suelo rocoso de color 5YR 3/2, muy duro, seco y porosidad alta.	Presenta olor a hidrocarburo.

Tabla 2: Perfil de pozo de extracción 2 (PE2).

Ilustración	Profundidad (m)	Descripción Litológica	Descripción organoléptica
	0,00-0,20	Hormigón	Con olor e impregnación
	0,20-1,40	Suelo arenoso con presencia de grava de baja plasticidad y porosidad alta.	Presenta olor a hidrocarburo.
	1,40-3,50	Suelo rocoso de color 5YR 3/2 duro, sin plasticidad, seco y porosidad alta.	Presenta olor a hidrocarburo.
	3,50-11,00	Suelo rocoso de color 5YR 3/2, muy duro, seco y porosidad alta.	Presenta olor a hidrocarburo.

Tabla 3: Perfil de pozo de extracción 3 (PE3).

Ilustración	Profundidad (m)	Descripción Litológica	Descripción organoléptica
	0,00-0,20	Hormigón	Con olor e impregnación
	0,20-1,40	Suelo arenoso con presencia de grava de baja plasticidad y porosidad alta.	Presenta olor a hidrocarburo.
	1,40-3,50	Suelo rocoso de color 5YR 3/2, duro, sin plasticidad, seco y porosidad alta.	Presenta olor a hidrocarburo.
	3,50-10,00	Suelo rocoso de color 5YR 3/2, muy duro, seco y porosidad alta.	Presenta olor a hidrocarburo.

ANEXO 3: Datos entregados por el equipo KATOX.

Tablero Katox:

		1				
Control T°	Temp Control	358C°	C°	C°	C°	C°
Temp. control Unit Eberle	Valor teórico (Soll)	320C°	C°	C°	C°	C°
Estado	Autotérmico	SI				
	endotérmico	NO				
Actual Data 1	React. entrada inlet	473.3C°	C°	C°	C°	C°
	React. centro center	497.4C°	C°	C°	C°	C°
	React. salida outlet	504.6C°	C°	C°	C°	C°
Actual Data 2	Recup. termica outlet	362.6C°	C°	C°	C°	C°
	Chimenea chimeney	210.9C°	C°	C°	C°	C°
	Calentador alta T° High T° Heater	359.5C°	C°	C°	C°	C°
Actual Data 3	Contol Unid. Calentador (°C) Temp. Control unit heater	358.6C°	C°	C°	C°	C°
	Concentración % Ex concentration %	11.5%	%	%	%	%
	Valvula Aire fresco % fresh air valve shut %	100%	%	%	%	%
Muestras	Marcar momento de muestra	NO				
Contador horas	Lectura contador dentro del tablero	hs	hs	hs	hs	hs

Figura 2: Información entregada por el tablero KATOX.

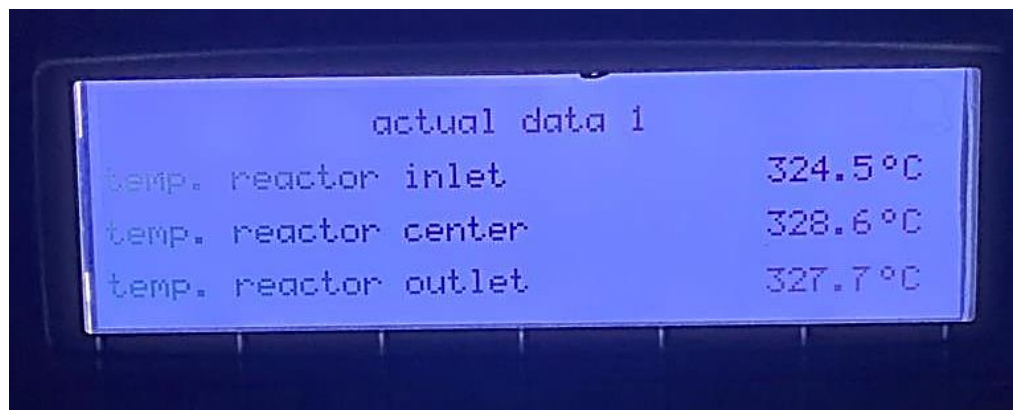
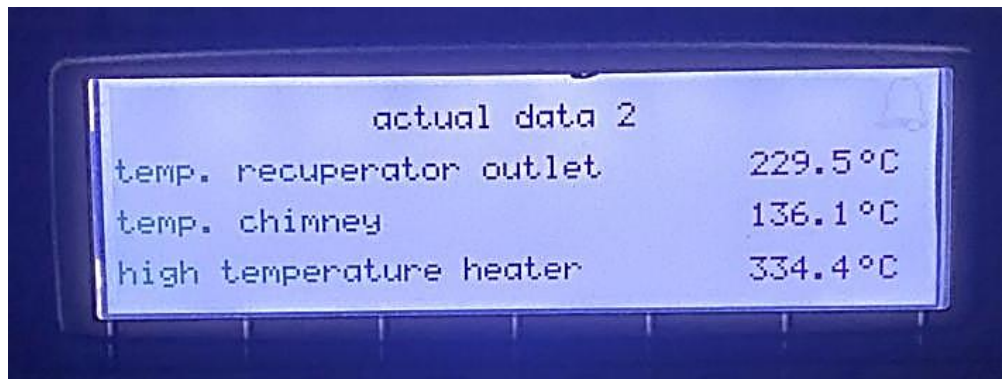


Figura 3: Data 1, temperatura de entrada, centro y salida.



actual data 2	
temp. recuperator outlet	229.5 °C
temp. chimney	136.1 °C
high temperature heater	334.4 °C

Figura 4: Data 2, temperatura de salida del recuperador, chimenea y mayor temperatura.