

## 1. INTRODUCCIÓN

Según el Centro para Procesos Biológicos en Suelos y Sedimentos Contaminados de Dinamarca,<sup>1</sup> en la actualidad aún se siguen utilizando sustancias catalogadas como peligrosas, tanto para la salud del hombre como para los ecosistemas, a pesar de que algunos compuestos identificados como tóxicos ya están siendo reemplazados. En muchos procesos industriales se utilizan productos químicos peligrosos de los que aún no se han encontrado los substituyentes adecuados, por lo que la liberación de estas sustancias al medio ambiente debe ser minimizada haciendo uso de tecnologías limpias, particularmente selectivas para los compuestos peligrosos.

Algunos compuestos químicos se consideran peligrosos por el riesgo de incendio o explosión que conllevan; se los considera peligrosos por una cuestión de seguridad, más que por su toxicidad. La toxicidad de una sustancia es su potencial de causar daño y es sólo uno de los factores para determinar su peligrosidad.<sup>2</sup>

Según la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA) de México,<sup>3</sup> los materiales peligrosos son aquellos elementos, sustancias, compuestos, residuos o mezclas de ellos que, independientemente de su estado físico, representen un riesgo para el ambiente, la salud o los recursos naturales, por sus características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables o biológico-infecciosas.

### 1.1 TOXICIDAD DE UNA SUSTANCIA

Según el organismo "California Occupational Health Branch de U.S.A.",<sup>4</sup> la toxicidad de una sustancia es la habilidad de causar efectos dañinos. Estos efectos pueden ser sobre una sola célula, un grupo de células, un órgano, o sobre todo el cuerpo. El efecto tóxico puede dañar visiblemente, disminuir el rendimiento de una persona o ser detectado sólo a través de estudios. Cuando una sustancia química causa daño sólo cuando la persona se expone a grandes cantidades, se considera que esta sustancia es

relativamente no tóxica, pero cuando una pequeña cantidad de sustancia es capaz de causar daño, entonces se la considera tóxica.

La toxicidad de una sustancia depende de tres factores: su estructura química, la cantidad de sustancia absorbida por el cuerpo y la habilidad del cuerpo para eliminar esta sustancia o convertirla en una sustancia menos tóxica. De éstos, el factor más importante es su estructura química: cómo está hecha, qué tipo de átomos y moléculas contiene y cuál es su estructura cristalina.

La toxicidad de una sustancia es sólo uno de los factores utilizados para determinar si es peligrosa. Su peligrosidad depende de los siguientes factores:

- **Toxicidad:** qué cantidad de sustancia se necesita para causar daño
- **Ruta de exposición:** cómo entra la sustancia al cuerpo
- **Dosis:** la cantidad que entra al cuerpo
- **Duración:** tiempo de exposición
- **Reacción e interacción:** otras sustancias a las que se está expuesto
- **Sensibilidad:** cómo reacciona el cuerpo a la sustancia, en comparación a otras personas.

### 1.1.1 RUTAS DE EXPOSICIÓN

La exposición a una sustancia química generalmente ocurre por inhalación, contacto con la piel u ojos o ingestión.

- **Inhalación:** la exposición más común se presenta cuando se introduce una sustancia a los pulmones, a través de la respiración. En el caso de estudio, puede haber pequeñas partículas en forma de polvos o neblinas presentes en el aire. Algunas de estas partículas, dependiendo del tamaño, pueden depositarse en los bronquios y/o alvéolos, pudiendo causar daños pulmonares. Otras partículas

pueden disolverse y ser absorbidas por el torrente sanguíneo, afectando a otras partes del cuerpo.

- **Contacto dérmico:** la piel actúa como una barrera protectora contra las sustancias químicas extrañas. Sin embargo, algunas sustancias pueden atravesar la piel y penetrar al torrente sanguíneo. La absorción dérmica es una de las rutas más comunes de exposición por contacto con suelos contaminados. La exposición dérmica puede seguir tres mecanismos: contacto directo, contacto indirecto a través de una superficie contaminada y transporte a la piel a través de polvos, humos o neblinas.
- **Ingestión:** La fuente de exposición más común en el trabajo es la ingestión de sustancias químicas. Éstas pueden ingerirse por haber tenido contacto con las manos, con la ropa o por haber contaminado, accidentalmente, la comida, la bebida o los cigarrillos. Los polvos metálicos, como plomo o cadmio, son fácilmente ingeridos.

Los niños en edad preescolar y los fetos en gestación son los segmentos de población más vulnerables a la exposición con metales.<sup>5</sup> Lo anterior se debe a una combinación de factores:

1. El sistema nervioso todavía en desarrollo en los fetos y los neonatos incrementa la susceptibilidad a los efectos neurotóxicos de metales como el plomo.
2. Los niños son más propensos a jugar en lugares sucios y a poner sus manos y otros objetos en la boca, incrementando la posibilidad de ingestión de sustancias presentes en el suelo.
3. La eficiencia de absorción de metales por el tracto intestinal es mayor en los niños que en los adultos.
4. Las deficiencias nutricionales en calcio y hierro, prevalentes en los niños, facilitan la absorción de plomo y exacerban los efectos tóxicos del mismo.

### **1.1.2 DOSIS**

En general, mientras mayor es la cantidad de sustancias que ingresan al cuerpo, mayor es el efecto producido. A esta relación se le denomina dosis. La dosis depende de cuatro factores, en el caso de que un compuesto químico tóxico ingrese por inhalación:

- La concentración de sustancias químicas en el aire
- La forma de respirar de la persona
- La proporción de la sustancia inhalada que permanece en los pulmones y la cantidad que de ella se absorbe por el torrente sanguíneo
- La duración de la exposición

Como algunas sustancias son más tóxicas que otras, es necesario que la exposición sea mínima. La menor concentración capaz de causar efectos nocivos se denomina concentración límite y este factor es diferente para cada sustancia química. Concentraciones por encima de la concentración límite indican que se podría afectar la salud.

### **1.1.3 EXPOSICIÓN**

Mientras mayor es la exposición a una sustancia, mayor es la probabilidad de que ésta afecte la salud. Si la dosis es pequeña, no habrá efectos, independientemente del tiempo de exposición. A mayores concentraciones puede no haber efectos con períodos de exposición cortos, pero la exposición repetitiva puede causar daños. La exposición continua, por largos períodos de tiempo, a menudo es muy peligrosa porque algunas sustancias pueden acumularse en el cuerpo o porque no hay oportunidad de que se

repare el daño causado. La combinación de dosis y exposición es lo que se llama nivel de exposición.

Los efectos de una sustancia pueden no aparecer inmediatamente después de la exposición, incluso pueden pasar años antes de que aparezcan. La demora entre el inicio de la exposición y la aparición de los efectos se denomina período latente.

Una sustancia química puede producir efectos por exposición aguda o crónica. Los primeros son los que aparecen inmediatamente después de la exposición o, a lo sumo, después de algunas semanas. Los efectos crónicos son los que aparecen por exposiciones repetitivas y tienen un período latente extenso.

#### **1.1.4 REACCIÓN E INTERACCIÓN**

Dependiendo del tipo de trabajo se puede estar expuesto a más de una sustancia química. Una reacción ocurre cuando las sustancias químicas se combinan para dar una nueva sustancia con propiedades distintas de las originales, pudiendo ser esta última aún más peligrosa. Una interacción ocurre cuando la exposición a más de una sustancia produce efectos en la salud distintos de los efectos que cada una de las sustancias aisladas pueden producir .

#### **1.1.5 EFECTOS TÓXICOS**

Los efectos tóxicos pueden ser de dos tipos, dependiendo del lugar donde se muestra la toxicidad. Efecto local es aquel que se presenta cuando una sustancia química causa daño donde se produjo el contacto. Los puntos donde el efecto local se produce con mayor frecuencia son la piel, los ojos, la nariz, la garganta y los pulmones. Las sustancias tóxicas también pueden ingresar a los órganos internos, a través del torrente sanguíneo y estos efectos se denominan sistémicos. Los órganos internos más

comúnmente afectados son el hígado, los riñones, el corazón, el sistema nervioso y el sistema reproductivo.

Por otra parte, los efectos tóxicos pueden variar, dependiendo de la forma de la sustancia. En el caso de estudio, las formas físicas de interés son sólidos, polvos, humos y neblinas.

- **Sólidos:** La mayoría de los sólidos de tamaño de partícula mayor a 250 micrones no son peligrosos, debido a que no pueden ser absorbidos por el cuerpo.
- **Polvos:** Consisten en pequeñas partículas sólidas suspendidas en el aire y pueden formarse cuando se pulverizan los sólidos o cuando el aire levanta las partículas depositadas. Estos polvos pueden ser peligrosos debido a que pueden inhalarse y retenerse dentro del tracto respiratorio. Las partículas más grandes generalmente quedan retenidas en la nariz, pero las más pequeñas pueden llegar a los pulmones y dañarlos. Algunos polvos, como los de plomo, pueden ingresar al torrente sanguíneo a través de los pulmones; otros, como los polvos orgánicos, pueden explotar en el aire cuando se alcanzan altas concentraciones.
- **Humos:** Consisten en partículas muy pequeñas de sólidos (a menudo de metales) en el aire, que son peligrosos debido a la facilidad con que se inhalan. El tamaño de las partículas que componen los humos es mucho menor que el tamaño de las partículas en los polvos.
- **Neblinas:** Consisten en partículas líquidas de distintos tamaños, producidas por agitación o vaporización de líquidos.

## 1.2 CONTAMINACIÓN DE SUELOS

Los suelos contaminados constituyen un problema muy conocido, pero difícil de resolver en el área de la protección ambiental. Estos suelos a menudo contienen una mezcla de compuestos tóxicos tales como disolventes, hidrocarburos poliaromáticos, hidrocarburos aromáticos clorados y metales pesados procedentes de la actividad

industrial, actual o pasada, los cuales deben ser remediados utilizando la tecnología adecuada.

Los sitios contaminados no sólo encierran un problema ambiental en sí mismos, sino que también representan un importante problema ecológico. Los diferentes contaminantes provocan un problema complejo en la comunidad biológica y en la salud humana. Las comunidades presentes en el suelo se ven afectadas de manera directa e indirecta. Por ejemplo, una bacteria puede no verse afectada directamente, pero si se ven afectados los protozoos con los que se alimenta, el número de bacterias disminuirá debido a la liberación del contaminante en cuestión. Además, algunos contaminantes pueden persistir en el suelo, por muchos años, sin degradarse.

Datos provenientes de estudios de salud de 951 sitios contaminados, realizados por la Agencia de Substancias Tóxicas y Registro de Decesos de Estados Unidos,<sup>5</sup> mostraron que los metales y los compuestos orgánicos volátiles (VOCs de sus siglas en Inglés) fueron los contaminantes más detectados, los cuales, a su vez, comúnmente migraban desde las áreas de disposición hacia el agua subterránea. Los metales estaban presentes en 564 (59%) de los 951 sitios, incluyendo plomo, cromo, arsénico y cadmio, entre los metales encontrados con mayor frecuencia.

Según la Administración de Salud y Seguridad Ocupacional de Estados Unidos (OSHA),<sup>2</sup> las substancias peligrosas y tóxicas pueden definirse como aquellas presentes en el lugar de trabajo, que son capaces de causar daño. En esta definición, el término "substancias químicas" incluye polvos, mezclas y materiales comunes como pinturas, combustibles y solventes. La OSHA actualmente regula la exposición a aproximadamente 400 substancias y, además, contiene información sobre unos 1 500 productos. Por otra parte, el inventario de substancias químicas de la Environmental Protection Agency (EPA) contiene información sobre 62 000 substancias químicas, mientras que existen Hojas de Seguridad (MSDS) para más de 100 000 substancias químicas.

Cada sitio contaminado con sustancias peligrosas requiere un examen particular para determinar los riesgos para la salud de las personas expuestas a ellas. Este examen debe considerar la extensión de la contaminación y el posible contacto con la gente, la toxicología de las sustancias liberadas y la naturaleza y extensión de la posible exposición por parte de la población vulnerable.

Las sustancias químicas peligrosas presentes en el suelo, en el sitio que se estudiará durante el desarrollo de este trabajo, son:

- **Metales Pesados:** arsénico, cadmio, plomo, mercurio, bario, cromo, plata, aluminio, calcio, cobalto, cobre, hierro, magnesio, manganeso, níquel, potasio, sodio, zinc y vanadio;
- **Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH)** procedentes de los tanques de almacenamiento de combustible diesel;
- **Compuestos Orgánicos Volátiles (VOCs)** como tolueno, xileno, cetonas y diclorobenceno;
- **Compuestos Orgánicos Semivolátiles (SVOCs)** como fluoreno, antraceno, ácido benzoico, piridina y metilfenol; y
- **Bifenilos Policlorados (PCBs)**, específicamente Aroclor 1242. Los PCBs tienen doscientos nueve isómeros posibles en teoría, pero existen cerca de cien formulaciones comerciales. El Aroclor 1242 es una combinación de isómeros de formulación comercial.



## **2. ANTECEDENTES**

### **2.1 IDENTIFICACIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO**

El lugar seleccionado para la ejecución del presente estudio es una planta industrial ubicada en el km 23.5 de la Carretera Panamericana, al Norte de Ciudad Juárez, en el Estado de Chihuahua, México. El terreno que ocupa esta planta industrial fue originalmente una superficie rural, sin desarrollo hasta el año 1978.

En 1979 se inició a la construcción de una planta industrial productora de ácido fluorhídrico, demorándose el inicio de la producción, por diversos motivos, hasta 1984. En 1993, esta planta cambió de propietarios y se llevaron a cabo importantes modificaciones en el proceso, para poder diversificar la producción.

### **2.2 CARACTERÍSTICAS DEL SITIO**

#### **2.2.1 LOCALIZACIÓN**

El sitio de estudio se encuentra ubicado al Norte del municipio de Juárez, en el Estado de Chihuahua. Este municipio ocupa el 1,4% de la superficie del Estado. Las coordenadas geográficas extremas del municipio son: límite norte a los 31° 47' de Latitud Norte; límite sur a los 31° 07' de Latitud Norte; límite este a los 106° 11' de Longitud Oeste; y límite poniente a los 106° 54' de Longitud Oeste.<sup>6</sup>

El municipio de Juárez colinda al norte con los Estados Unidos de América; al este con los Estados Unidos de América y el municipio de Guadalupe; al sur con los municipios de Guadalupe, Ahumada y Ascensión; y al oeste con el municipio de Ascensión.

Ciudad Juárez se encuentra ubicada en la parte norte del Estado de Chihuahua, en los paralelos 31°44'22" de Latitud Norte y 106°29'29" de Longitud Oeste y a una altitud de 1116 msnm.

## 2.2.2 CLIMA

Existen cuatro zonas climáticas principales en el estado: árida, semiárida, tropical húmeda y subtropical húmeda y seca.<sup>7</sup>

El sistema modificado de Koppen es el que se usa en las cartas oficiales de climas de México. Este sistema incorpora subdivisiones que indican áreas de uso potencial del suelo para la agricultura, mediante un señalamiento de las áreas más secas:

La aridez domina el paisaje de Chihuahua; de los dos tercios a las tres cuartas partes del Estado son clasificadas como de climas áridos y semiáridos, con una proporción aproximadamente igual para ambos tipos de clima. Según la carta de climas CGSNEGI, el 100% de la superficie municipal tiene un clima del tipo *muy seco templado*, clave BWk árido, como se indica en la Figura 2.1

### 2.2.2.1 Condiciones de temperatura

El más importante control climático de la temperatura en Chihuahua es la altitud, como resultado de lo cual, las isotermas y las isoyetas generalmente corren paralelas con la orientación de las montañas. Es sólo en las secciones norte y centro-oriental del estado, en donde hay muy poca variación de altitud, que los datos de temperatura reflejan un zoneamiento dependiente de las latitudes.

La temperatura media anual en Ciudad Juárez es de 17,7 °C (promedio reportado para el período comprendido entre 1957 y 1991), contando con registros máximos de 45,5 °C y mínimos de hasta -15 °C.

### **2.2.2.2 Precipitaciones**

En el Estado de Chihuahua existe un considerable contraste entre los totales de precipitación promedio anual recibidos en las zonas áridas y los que se tienen sobre la sierra. En la región de cuencas y sierras, por lo general, la lluvia es menor a 300 mm anuales, que se incrementa hasta 500 mm por año en los taludes orientales de la serranía. Por otra parte, las precipitaciones en la sierra varían de 500 a 1250 mm anuales. Como resultado de la elevación orográfica, la proximidad al Océano Pacífico y los vientos predominantes del sudoeste, la mayor parte de las lluvias en el estado se concentra en la parte sur de la sierra y en las tierras bajas del interior, a diferencia de la zona norte, que permanece seca.

En Ciudad Juárez, la precipitación promedio anual (promedio entre los años 1957 y 1991) fue de 256 mm, con una precipitación máxima anual de 461,5 mm y una mínima de 119,6 mm. Los meses de sequía corresponden a los meses de octubre a junio, mientras que la temporada de lluvias corresponde a los meses de julio, agosto y septiembre.

### **2.2.2.3 Estaciones**

El estado de Chihuahua recibe más de dos tercios de su precipitación durante el verano, a mediados del año, durante los meses de mayo a octubre y registra las máximas durante julio y agosto. Ninguna estación meteorológica registra un máximo de precipitaciones en invierno; las del verano coinciden con la expansión de la celda de alta presión subtropical semipermanente.

A medida que avanza el verano, los anticiclones en el Atlántico y el centro de alta presión de Bermuda -, así como su contraparte en el Pacífico - el centro de alta presión de Hawai -, se desplazan hacia el oeste de la región sur-central de los Estados Unidos. La circulación en sentido de las manecillas del reloj alrededor de la celda de alta presión de Bermuda lleva el aire cargado de humedad del Golfo de México hacia Estados Unidos y norte de México. Se incrementa la cubierta de nubes, aumenta la humedad relativa y se presentan tormentas como resultado de la entrada o flujo de este aire tropical húmedo.

Hacia el norte, las sierras en ambos lados del continente disminuyen su altura y se localizan más retiradas de las costas. Como resultado, hay una disminución general en las precipitaciones de sur a norte de la Sierra Madre Occidental.

Debido a que el territorio chihuahuense se localiza en el interior del continente y a la sombra de la Sierra Madre Occidental y otras montañas, especialmente hacia el norte, el Estado no tiene un período de lluvias de invierno. Las precipitaciones son así mucho menores en invierno, a pesar de que los ciclones de latitudes medias transportan el aire húmedo del Pacífico hacia el interior de la región. Como resultado del largo período seco, la vegetación en el interior continental no es tan saludable y rebosante, ni tan diversa como la que se encuentra en los taludes occidentales de la sierra y en las tierras bajas.

#### **2.2.2.4 Tormentas tropicales**

Otra fuente de agua muy importante para el régimen de lluvias en Chihuahua es el efecto de las tormentas tropicales, algunas de las cuales alcanzan la intensidad de huracán. Por lo general, dichas tormentas son responsables de la mayoría de las grandes desviaciones en las precipitaciones totales anuales, en especial aquellas que se presentan durante los meses más calientes.

Se utilizaron imágenes satelitales para determinar el origen de la humedad convertida en precipitaciones de verano sobre el área de Ciudad Juárez y El Paso, cuando la lluvia diaria fue de 2,5 mm. Durante los años 1973, 1974, 1975 y 1978 se encontró que, al menos el 55% de la precipitación anual ocurrida en la zona, fue originada en tormentas tropicales. El estudio de las fuentes de humedad principales, excluyendo las tormentas aisladas no relacionadas con tormentas de mayor magnitud, indica que aproximadamente el 45% de la lluvia tuvo origen en las tormentas tropicales del Océano Pacífico, y que el 55% provenía de las tormentas tropicales del Golfo de México.

#### **2.2.2.5 Desertificación**

La dinámica y las posibles variaciones del clima en el Estado ilustran claramente el potencial de desertificación y otros problemas asociados con el uso de los recursos naturales en un ambiente muy frágil. Aunque la precipitación mínima y máxima no ocurre durante el mismo año en todas las estaciones, el cambio potencial en las diferentes regiones climáticas es drástico, en especial en las zonas árida y semiárida.

#### **2.2.2.6 Otras características climáticas**

Las peores características del clima en la zona árida y semiárida del norte son el polvo y las tormentas de arena, aunque por fortuna los vientos fuertes del sudoeste se hallan limitados a los meses de febrero y abril. Aun cuando las velocidades del viento no son extremadamente altas, rara vez alcanzan los 75 nudos (140 km/h) en áreas abiertas, los rasgos topográficos crean bolsas o vacíos de viento y ondas de sotavento en las montañas que pueden dar como resultado que la atmósfera se cargue de polvo y se cierren temporalmente los aeropuertos y las carreteras.

Las características más atractivas del clima de Chihuahua son los cielos claros, la baja humedad relativa y las temperaturas moderadas en invierno.

### 2.2.2.7 Intemperismos climáticos

Se presenta un período de heladas que inicia en el mes de noviembre y finaliza, generalmente, en el mes de febrero, si bien, en ocasiones se presentan heladas tardías.

Además, se presenta un promedio de los siguientes intemperismos:

Vientos mayores a 65 km/h	1 día por año
Nublados	63 días por año
Granizo	17 días por año
Tormenta	35 días por año
Heladas	25 días por año

### 2.2.3 FISIOGRAFÍA REGIONAL

Fisiográficamente, el Estado de Chihuahua ha sido dividido en dos grandes provincias, hasta cierto punto contrastantes en su morfología: la Mesa Central y la Sierra Madre Occidental.<sup>8</sup> Esta última provincia fisiográfica se divide en tres subprovincias conocidas como: sección de Llanuras Altas, sección de la Mesa Alta y sección de Barrancas. Ordoñez y Raisz, por su parte, tomaron juntas a la subprovincia de Llanuras Altas y a la Región de Bolsones (que pertenece a la provincia de la Mesa Central) considerándolas como un nuevo conjunto denominado "Provincia Fisiográfica de Cuencas y Sierras", llamada así debido a la peculiar distribución de las elevaciones y depresiones que se pueden observar en ella, como se muestra en las Figuras 2.2 y 2.3.

La Provincia Fisiográfica de la Mesa Central se distingue por sus sierras, constituidas en su mayor parte por estructuras anticlinales de rocas del Mesozoico hasta terciarias (en la parte oriental) y con predominio de rocas volcánicas terciarias ligeramente tectonizadas, en la sección occidental. De la provincia fisiográfica de la Mesa Central

sólo está representada en el Estado de Chihuahua la subprovincia de Bolsones, a la cual pertenece Ciudad Juárez. Se caracteriza por tener sierras paralelas, angostas, alargadas y aisladas, separadas por amplias cuencas planas, igualmente alargadas y con orientación norte-sur y noroeste-sudeste.

La región oriental del Estado se distingue por tener amplias y dilatadas llanuras, con elevaciones medias entre los 1200 y 1500 msnm; algunas de ellas se convierten en cuencas internas o endorreicas llamadas bolsones. Estos bolsones se encuentran separados por sierras angostas que se levantan de 600 a 1000 m sobre el nivel medio de las planicies; la distancia que separa una sierra de otra va aumentando de poniente a oriente; así se desarrollan amplias y marcadas llanuras. Este rasgo puede observarse claramente yendo de la Sierra Madre Occidental hacia el oriente, ya que en esa dirección el ancho de las llanuras crece de manera considerable, al alejarse del núcleo de la Sierra Madre, mientras que simultáneamente disminuyen la altura y la amplitud de las sierras interiores

Al oriente, la mayor parte de los bolsones han sido capturados por el sistema fluvial de los ríos Conchos-Bravo; no obstante, todavía existen algunos con sistema de drenaje endorreico en el centro del estado. En la parte media de esos bolsones se forman lagos y lagunas debido a que el agua, al no tener salida superficial, se acumula en su interior. Los bolsones endorreicos se caracterizan por ser prácticamente peneplaneados y en épocas de prolongada sequía generan grandes barriales. Los bolsones exorreicos, por su parte, cuentan con sistemas de desagüe fluvial que, en algunas ocasiones, no son lo bastante eficientes, lo cual también conlleva a la formación de grandes barriales. Sin embargo, los bolsones de este tipo están casi siempre cortados por profundos arroyos de tipo efímero intermitente en los que se pueden apreciar las terrazas aluviales y las planicies de inundación generadas por las corrientes principales. Los desiertos del Estado de Chihuahua se desarrollan, sobre todo, en la zona de bolsones endorreicos, ya que las sierras que los limitan sirvieron como barreras para impedir la migración tanto de las dunas, como el traslado de aluvión y suelo hacia el mar. Tal es el caso del desierto de Samalayuca.

### **2.2.3.1 Fisiografía del sitio**

El Municipio de Juárez se encuentra completamente dentro de la Provincia Fisiográfica de Sierras y Llanuras del Norte y comprende dos Subprovincias Fisiográficas: Llanuras y Médanos del Norte y Sierras Plegadas del Norte. El sitio objeto de estudio se encuentra dentro de la Subprovincia Fisiográfica Sierras Plegadas del Norte, con Sistema de Topoformas tipo Llanura, que abarca el 36,85% de la superficie del Municipio de Juárez.

Ciudad Juárez se encuentra dentro de un área constituida por montañas plegadas, entre las cuales se han desarrollado largos y angostos valles intermontañosos bordeados por fajas de pie de montaña y de abanicos aluviales, formando parte de la Provincia Geológica de la Cuenca de Chihuahua.

## **2.2.4 HISTORIA GEOLÓGICA**

La complejidad de la formación geológica de México es enorme; para interpretarla es necesario, en principio, aclarar que el extremo norte de la placa de Sudamérica se sobrepuso a lo que sería la mitad de la actual República Mexicana. Campa y Coney, apoyándose en análisis tectono-estratigráficos, concluyeron que alrededor del 80% de la superficie del país se halla constituida por microcontinentes o microplacas (terrenos) cuya relación con la placa norteamericana aún es incierta. De acuerdo con estos modelos tectono-estratigráficos, el origen de la mayor parte del basamento mexicano está todavía por descubrirse o quizá se trata de un conjunto de microplacas que se unieron debido al avance de la placa norteamericana hacia el poniente, o bien no existía basamento alguno antes de los períodos Pérmico-Triásico. En general hay pocos afloramientos pre-mesozoicos y menos aún precámbricos que permitan definir las



**características del basamento de la República Mexicana.**

El Estado de Chihuahua está formado, en parte, por el cratón o placa norteamericana y por otros microcontinentes o terrenos alóctonos acrecionados a la placa, como se muestra en la Figura 2.3. Su basamento, constituido por el terreno de Coahuila al oriente de Chihuahua, permite suponer que es una acreción ocurrida durante el Paleozoico Tardío, relacionada con el cierre del Proto-Atlántico. Los terrenos de Caborca en Sonora, al poniente de Chihuahua, y de la Sierra Madre Occidental (al sur del Estado), parecen ser terrenos desplazados hacia la placa norteamericana, pero sus inciertos y complejos basamentos aún no han sido bien definidos, aunque también podría tratarse de fragmentos de la misma placa norteamericana. Es posible que casi toda la parte norte y central del Estado de Chihuahua pertenezca a la porción sur del cratón o placa no desplazada de Norteamérica.

En la Figura 2.4 puede observarse cómo la mayor parte del Estado de Chihuahua y parte del Estado de Sonora parecen ser el extremo sur del cratón de Norteamérica. En la misma Figura 2.4 pueden verse también los "terrenos alóctonos", fragmentos microcontinentales que se añadieron paulatinamente a este extremo sur de Norteamérica durante su desplazamiento al noroeste

#### **2.2.4.1 Geología del sitio**

Ciudad Juárez forma parte de la Provincia Geológica de la Cuenca de Chihuahua, la cual está constituida por rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas. Las terrazas existentes en el área son depósitos clásticos procedentes de la desintegración de rocas preexistentes. Los abanicos aluviales que se presentan en los alrededores de la sierra muestran pendientes suaves y están constituidos por material clástico de tamaño variable.

En el área de estudio se pueden encontrar calizas de color gris claro, de grado fino, las

que se presentan estratificadas en capas de escaso espesor, presentando un rumbo general NO-SE. Se estima que estas rocas pertenecen al Cretácico Superior.

Las rocas que sobreyacen a las calizas son las areniscas de color amarillo pardo, constituidas por partículas de cuarzo y feldespato, con una matriz arcillosa cementada, pertenecientes al Plioceno, de origen continental. A estas rocas les sobreyace un material clástico constituido por areniscas y conglomerados con una matriz arenolimsa no cementada que se estima son de edad reciente. Enseguida aparece un suelo residual que se encuentra ubicado en la parte central de la zona, de arcilla-arenosa, diferente a la que se encuentra en la planicie fluvial, debido a su mayor porcentaje de arcilla.

#### **2.2.4.2 Movimientos tectónicos**

**Sismicidad:** De acuerdo con la regionalización sísmica de la República Mexicana, publicada por L. Esteva en 1970,<sup>8</sup> Ciudad Juárez se localiza en la zona "0" que significa que su intensidad sísmica es baja o casi nula.

**Deslizamientos:** La ciudad no tiene grandes pendientes, especialmente en la zona de estudio. Esta zona es prácticamente plana, por lo que no se la considera zona de posibles deslizamientos.

**Derrumbes:** La zona de interés es un área donde no hay movimientos tectónicos, por lo que queda descartada la posibilidad de derrumbes por movimientos tectónicos.

#### **2.2.5 GEOGRAFÍA: GEOMORFOLOGÍA Y OROGRAFÍA REGIONAL**

La superficie del territorio Chihuahuense puede dividirse en dos Provincias Fisiográficas mayores:

- La Sierra Madre Occidental
- Las Cuencas y Sierras del Desierto de Chihuahua.

A consecuencia de los procesos de erosión y la estructura geológica, la meseta volcánica elevada y relativamente plana formada por la Sierra Madre Occidental se puede dividir en cuatro subprovincias:

- i) Las sierras y valles del norte
- ii) Las sierras con cuencas del este
- iii) La gran altiplanicie o mesa alta del sur
- iv) Las barrancas o tierra de cañones

El sitio de estudio se encuentra dentro de la provincia de Sierras y Cuencas del Desierto de Chihuahua.

Las cuencas y sierras de Chihuahua forman parte de una provincia fisiográfica mayor. Se extiende desde el oeste y sur de Arizona, cruza el oeste de Nuevo México hasta incluir una porción de Texas; hacia el sur se expande incluyendo una buena parte de México. Las formas superficiales que genera esta provincia de cuencas y sierras están caracterizadas por la unión de los bolsones parcialmente rellenos, enmarcados por sierras orientadas hacia el nornoroeste (NNW). La variación de alturas de los pisos de las cuencas se encuentra entre 1200 y 1500 msnm como lo muestra la Figura 2.5. Por lo común las montañas son aquellas porciones con alturas superiores a 1800 msnm. La composición geológica de las sierras forma una amplia zona de transición entre las rocas sedimentarias plegadas del Cretácico (125 a 100 millones de años) falladas y cabalgadas en los lados oriental y sur, y las rocas ígneas del Terciario (65 a 20 millones de años) que se asocian con la Sierra Madre Occidental en el oeste. Muchas de las sierras aisladas están constituidas de rocas carbonatadas, en especial calizas cretácicas intensamente plegadas y acompañadas de pequeñas fallas de cabalgamiento.

Otras sierras son las clásicas montañas de fallamiento en bloque. La mayoría de las montañas en este grupo son pilares o bloques basculados o rotados, producidos cuando los sedimentos fueron levantados en forma despareja, a lo largo de fallas más o menos paralelas.

Muchos de los bolsones parecen ser profundas fosas (de aproximadamente 2750 m) o depresiones estructurales; son bloques caídos a lo largo de fallas paralelas y limitados por pilares o bloques levantados. Estas cuencas fueron parcialmente rellenas con sedimentos fluviales de edad reciente, sobrepuestos en los depósitos lacustres pleistocénicos. El material de los abanicos aluviales sepultados y los sedimentos eólicos también se encuentran presentes. Las superficies de las cuencas se caracterizan por ser planicies levemente onduladas o con suaves pendientes aluviales.

Entre los bolsones y las sierras montañosas, las que se levantan por encima de los pisos de las cuencas, como las islas sobre el nivel del mar, se encuentra el talud aluvial. Este talud intermedio se constituye por dos partes: un piedemonte - piamonte- y una bajada. Lo que se conoce como piedemonte es una superficie de roca sobre la cual se transporta el material erosionado. Se forma al pie del talud de montaña en retroceso; es decir, que se encuentra en proceso de erosión activa y con frecuencia se cubre por una delgada capa de hasta 25 m de aluvi6n. La porci6n mas baja del talud - parte distal del mismo - consiste en gruesos dep6sitos de material erosionado y acarreado de las partes altas de la montaña. Por su forma y composici6n, la totalidad del talud, desde la boca del ca6n hasta la base, recibe el nombre de abanico aluvial. La bajada, en general, se define como la uni6n o coalescencia de abanicos aluviales unidos.

T6picamente, en la base del talud aluvial se encuentra una superficie plana casi siempre referida como una superficie des6rtica, que gradúa a una playa - barrial -. Por playa se entiende, com6nmente, una zona nivelada que ocupa la parte m6s baja de una cuenca cerrada y que, a intervalos irregulares, se cubre por el agua. Las playas que merecen nombrarse son medianamente grandes en tama6o, generalmente mayores a los 600 m de di6metro, llegando incluso a los 900 m. Las cuencas con drenaje interior u o

endorreicas - ocupan casi la mitad de la superficie de Chihuahua. Las playas de los lagos, los lagos secos y los lagos o lagunas ocupan las partes más bajas de estos bolsones.

La zona más grande de planicies cubierta con aguas efímeras se ubica en el norte, desde el piedemonte de la sierra en dirección al oriente, hasta cerca de 15 km del Río Bravo. Las cuencas endorreicas más grandes son: el bolsón de los Muertos, el área del río Casas Grandes y laguna de Guzmán, el del río Santa María y la laguna de Santa María, además del río del Carmen y la laguna de Patos. Este complejo de lagos es un remanente del antiguo lago pluvial de Palomas. El lago Palomas, que inunda 7770 km<sup>2</sup>, fue un estanque aislado de una masa de agua aún más grande llamada lago Cabeza de Vaca, que existió desde el Pleistoceno Temprano.

El bolsón de los Muertos, a menos de 75 km al sudoeste de Ciudad Juárez, es la playa más grande del Estado y de México. Sus dimensiones totales son de aproximadamente 240 km de largo y 80 km de ancho.

El sitio de estudio se encuentra al nordeste del bolsón de los Muertos, en un bolsón menor, denominado bolsón del Hueco.

## **2.2.6 HIDROLOGÍA REGIONAL**

El único sistema de drenaje que cruza la provincia fisiográfica de Sierras y Cuencas de México que fluye hacia el mar es el de los ríos Conchos y Bravo. También el río Conchos es la cuenca hidrológica más grande y el sistema fluvial más extenso de Chihuahua, mostrado claramente en las Figuras 2.6 y 2.7.

La cuenca del río Conchos cubre más de 77090 km<sup>2</sup>, casi un tercio de la superficie del Estado. Históricamente, el Conchos abastece a alrededor del 18% de los depósitos forestales y minerales y una gran proporción de la riqueza agrícola en Chihuahua se

**encuentra dentro del sistema de drenaje de los ríos Conchos y Bravo.**

Las cuencas endorreicas del norte y oriente ocupan el 43% de la superficie del Estado; entre ellas, los sistemas río Casas Grandes-laguna de Guzmán, río Santa María con la laguna del mismo nombre y el río Carmen- laguna de Patos, son las más extensas. Dichos lagos se están secando gradualmente, a medida que se usan para irrigación cantidades cada vez mayores de agua del río que fluía a la cuenca.

### **2.2.6.1 Hidrología del sitio**

En el área de estudio se pueden distinguir unidades hidrológicas permeables e impermeables, por lo que se explicarán las formaciones geológicas atendiendo a las características físicas como permeabilidad, porosidad y ubicación estructural, las cuales intervienen directamente en el funcionamiento del sistema hidráulico.

Las unidades hidrológicas permeables están constituidas por materiales granulares que van del Terciario al Reciente y se clasifican en las siguientes unidades, en función de sus condiciones de depósito:

**Cuaternario aluvial:** Localizados en las planicies de inundación del Río Bravo, estos depósitos están constituidos por gravas, arenas y arcilla en su parte superficial. Hidrogeológicamente, esta unidad presenta características de buena permeabilidad, constituyendo un acuífero que se encuentra en explotación. Los aportes de este acuífero provienen directamente del agua subálvea del Río Bravo y por el agua que ceden los materiales terciarios localizados en las partes aledañas al río. Este acuífero recibe aportaciones por la infiltración del agua precipitada y por la recirculación del agua que se utiliza en la zona agrícola.

**Abanicos aluviales y depósitos de piamonte del Cuaternario:** Se ubican en la zona periférica de las sierras, donde el cambio de pendiente ocasiona el depósito de los sedimentos arrastrados por las corrientes. Esta unidad está constituida por arenas y

gravas provenientes de la meteorización de las rocas preexistentes en la localidad. Hidrogeológicamente estos depósitos presentan condiciones de permeabilidad y tienen la capacidad de transmitir el agua a las formaciones subyacentes.

**Sedimentos continentales del Terciario:** Estos depósitos cubren una extensa superficie, formando Terrazas en las zonas aledañas al Río Bravo. Están constituidos por gravas y arenas con intercalaciones de arcillas y lentes de yeso, razón por la cual esta unidad se considera de menor permeabilidad que las anteriores. Sin embargo, es capaz de construir acuíferos que, por la heterogeneidad de los materiales, se pueden comportar como confinados.

**Rocas calcáreas del Cretácico:** Éstas son rocas sedimentarias marinas que presentan plegamiento y fallamiento secundario. Debido a su fracturamiento, estas rocas pueden poseer cierta permeabilidad, pero como estas fracturas se presentan sólo de manera superficial, la zona puede clasificarse como impermeable.

#### **2.2.6.2 Unidades hidrológicas**

El único cauce superficial en el sitio es el Río Bravo, aunque existen otros cauces como son los canales de riego denominados Acequia Madre y Acequia del Pueblo, con diferentes ramificaciones en el área agrícola señalada en la Figura 2.8. También existen varios arroyos de menor importancia, como son La Morita, Los Indios, Jarudo, El Mimbres, El Gordo y el Tres Jacales, entre otros, que llevan agua únicamente en la temporada de lluvias.

El municipio de Juárez se halla comprendido en dos regiones hidrológicas:

**Región hidrológica de Cuencas Cerradas del Norte (Casas Grandes):** Esta región hidrológica está subdividida en dos cuencas: Río del Carmen y Río Santa María.

**Región hidrológica Bravo-Conchos:** Esta región comprende una sola cuenca, la del Río Bravo-Ciudad Juárez. Esta cuenca, a su vez, se encuentra subdividida en tres subcuencas: Río Bravo-Tornillo, Río Bravo-Island y Río Bravo-Ciudad Juárez. En esta última subcuenca se encuentra ubicada Ciudad Juárez, la que ocupa el 14,84% de la superficie municipal.

Por otra parte, la región descrita queda ubicada dentro de dos cuencas geohidrológicas: el Bolsón del Hueco, que abastece de agua potable a Ciudad Juárez y El Paso, y el Bolsón de la Mesilla.

**Bolsón del Hueco:** El Bolsón del Hueco se encuentra localizado al sureste del Estado de Texas y al norte del Estado de Chihuahua. Aún cuando sus límites no están perfectamente definidos, se considera que el bolsón abarca una zona comprendida entre las Sierras del Hueco y Franklin, del Estado de Texas, y la Sierra Juárez y del Presidio, en el Estado de Chihuahua. El acuífero de este Bolsón consiste en rellenos no consolidados divididos en el aluvión del Río Bravo y los depósitos más viejos del Bolsón, la mayoría depositados antes del aluvión. El grosor total de las capas alternas de arcilla, arena y grava varía entre los 300 y los 2700 m.

La recarga natural del Bolsón del Hueco ocurre a lo largo del pie de la montaña que rodea al Bolsón, en donde los sedimentos son más permeables. Otros medios naturales de recarga lo constituyen el Río Bravo y el agua de lluvia. Se estima que del lado mexicano la recarga del Bolsón es de apenas 3,5 millones de metros cúbicos anuales y, adicionalmente, la Ciudad de El Paso cuenta con una planta de tratamiento de aguas residuales, la cual inyecta al Bolsón una cantidad de agua tratada equivalente a 10 millones de galones por día. Las profundidades mayores del acuífero se localizan a mayores distancias del Río Bravo y las mínimas en las proximidades de éste.

**Bolsón de la Mesilla:** Este acuífero se ubica entre los estados de Nuevo México y Texas, en los Estados Unidos y el estado mexicano de Chihuahua. Se estima que su extensión llega, al norte, hasta la ciudad de Las Cruces, en Nuevo México; al sur, a 80 km de la



**línea divisoria internacional; al oeste, hasta el Cerro del Potrillo y la Sierra Boca Grande; y al este hasta la Sierra de Juárez. Ocupa una amplia planicie desértica de más de 3500 km<sup>2</sup> que se ubica al occidente del Municipio de Juárez.**

## **2.2.7 VEGETACIÓN**

**La distribución de la vegetación en el Estado coincide estrechamente con sus zonas climáticas, provincias fisiográficas y el uso de suelo, por lo que pueden identificarse cuatro unidades biogeográficas principales señaladas en las Figuras 2.9 y 2.10 :**

- **Matorrales desérticos de las bajadas y planicies desérticas**
- **Zacatales y bosques de robles que se encuentran en los taludes al pie de la sierra**
- **Bosques de pinos y encinos-robles de la Sierra Madre Occidental**
- **Bosques subtropicales de hojas no permanentes localizados en el talud occidental de la sierra, en el lado del Océano Pacífico y en los cañones profundos.**

### **2.2.7.1 Matorrales desérticos**

**La vegetación del sitio de estudio es del tipo de matorrales desérticos, al igual que la vegetación de Ciudad Juárez y sus alrededores.**

**En las elevaciones menores, al oriente de la sierra, domina la vegetación desértica. Por lo general, las xerófitas están confinadas a altitudes de menos de 1500 m. La zona árida de Chihuahua se asocia fuertemente con los drenajes internos, los suelos derivados de rocas calizas y volcánicas y con los matorrales desérticos. Se ha establecido que, en todo el desierto de Chihuahua, existen más de un millar de plantas endémicas.**

La planta que domina en la zona árida es la gobernadora o cresota (*Larrea tridentata*), seguida por el arbusto alquitranado (*Flourensia cernua*), ocotillo (*Koeberlinia spinosa*) y el mezquite (*Prosopis glandulosa*). La lechuguilla (*Agave lechuguilla*) y el sotol (*Dasyliroioin leiophyllum wheeleri*) son plantas importantes indicadoras del Desierto de Chihuahua. En general, las cactáceas están bien distribuidas y representadas, sin embargo son pequeñas y no tan abundantes. Los únicos cactus notables en esta zona árida son las choyas (*Opuntia imbricatea*) y las peras espinosas (*Opuntia violácea var. macrocentra*). El cactus cilíndrico o biznaga (*Echinocactus acanthonades*) es más bien común en los taludes, pero sólo medianamente visible.

El típico arbusto de *larrea*, guami o gobernadora de Chihuahua, es más corto y tiene menos follaje, con hojas más alargadas y más abiertas hacia la base que su contraparte de Sonora. Las características de esta especie son, probablemente, el resultado de una fuerte concentración de la precipitación durante los meses de verano. Las áreas más extensas de distribución de este arbusto se localizan sobre las pendientes aluviales, mientras que el mezquite y las acacias son las más abundantes en las áreas de aguas subterráneas cercanas a la superficie - 10 o 15 m - y de suelos poco compactados.

Observaciones de campo de la cubierta vegetal, en altitudes y exposición comparables con suelos del mismo origen, muestra que las plantas de la cubierta sobre los suelos derivados de las calizas son consistentemente más xerófilas que las de los suelos derivados de las rocas ígneas, y también que la vegetación xerófila sobre las calizas se extiende a elevaciones mayores.

Las tres especies de arbustos: la gobernadora, el alquitranado y la acacia de espina blanca, son las plantas dominantes de las zonas de planicie del Desierto de Chihuahua. Sólo localmente estas plantas permiten la dominancia del mezquite, los ocotillos, los gatuños (uña de gato) o los arbustos salados. En las depresiones de las cuencas endorreicas, tales como la parte norte del bolsón de los Muertos, hay más humedad en el suelo. En estas áreas los zacatales circundan las superficies del barrial o playas más bajas y más salinas. Aparentemente, los más comunes de estos zacates o pastos son la

tobosa (*Hilaria mutica*) y los zacatones (*Sporobolus, s. airoides*).

### 2.3 DESCRIPCIÓN DE LOS PROCESOS PRODUCTIVOS DE LA PLANTA EN ESTUDIO

El principal producto que se obtiene en la planta industrial en estudio es ácido fluorhídrico. El ácido fluorhídrico anhidro (HFA) se produce reaccionando un mineral llamado Fluorita ( $\text{CaF}_2$ ), en estado seco, con ácido sulfúrico y óleum, en un horno rotatorio. Esta reacción genera, además, como subproducto, al sulfato de calcio o Anhidrita ( $\text{CaSO}_4$ ). El proceso de obtención del HFA finaliza con un proceso de purificación, que a su vez genera como subproducto al ácido fluorosilícico ( $\text{H}_2\text{SiF}_6$ ).

El HFA se almacena en cinco tanques horizontales de acero al carbón, tres de los cuales tienen una capacidad de 68 Ton y los otros dos con capacidad de 40 Ton cada uno. Adicionalmente, se destinan dos o tres vagones-tanque de ferrocarril de 70 Ton cada uno para el almacenamiento temporal del HFA en la planta.

La mayor parte del HFA producido se embarca como líquido, ya sea anhidro, en vagones-tanque y camiones pipa, o como disolución al 70%, en vagones-tanque y tambores de 200 L. Se estima que se embarca un vagón-tanque cada tres días, dos pipas por mes y de dos a tres embarques de 80 tambores de HF-70% por semana.

Por otra parte, se utiliza ácido fluorosilícico para producir bifluoruro de amonio ( $\text{NH}_4\text{FHF}$ ) y monofluoruro de amonio ( $\text{NH}_4\text{F}$ ), haciendo reaccionar amoníaco anhidro ( $\text{NH}_3$ ) con ácido fluorhídrico en presencia del ácido fluorosilícico. El amoníaco requerido se conduce a la planta en vagones-tanque y se almacenan temporalmente en dos tanques horizontales de  $36 \text{ m}^3$  cada uno.

El amoníaco anhidro también se utiliza en un sistema de refrigeración de respaldo a

base de compresores de tornillo, el que contiene una cantidad aproximada de 10 Ton de  $\text{NH}_3$ , incluyendo un tanque de almacenamiento de 8 Ton.

El agua de lavado de pisos y equipos, así como el agua pluvial, se descargan a través de canaletas cubiertas, a una laguna de evaporación ubicada en la parte norte de la planta. El agua residual generada en el sitio proviene de la cocina, los baños, el laboratorio y la planta potabilizadora de agua de la empresa. Esta agua residual ingresa a un tanque séptico ubicado dentro de la propiedad. Antiguamente, estas aguas residuales se descargaban hacia lagunas de evaporación. El tanque séptico original está ubicado, aproximadamente, a 10 metros del tanque nuevo y, si bien está fuera de operación desde hace más de 3 años, actualmente se encuentra lleno a toda su capacidad.

Un gran montículo de anhídrita ocupa todo el límite sur de la propiedad. La anhídrita es el residuo que se genera durante el proceso productivo de ácido fluorhídrico. La cantidad de anhídrita residual que hay actualmente en el sitio es de unos  $6 \cdot 10^5 \text{ m}^3$  equivalentes a un millón de toneladas, cuya ubicación se muestra en las Figuras 2.11 y 2.12.

A continuación se presenta una descripción detallada de las principales operaciones de la planta, por áreas específicas de producción, ilustrada por la Figura 2.13.

### **2.3.1 PLANTA DE ÁCIDO FLUORHÍDRICO**

#### **2.3.1.1 Secado de la fluorita**

La fluorita se recibe en la planta en camiones de 70 Ton de capacidad. Una vez en la planta, la fluorita húmeda (10% de contenido de agua en peso) se almacena en un edificio con una capacidad de 3000 Ton.

Esta fluorita húmeda se alimenta, mediante un cargador frontal, al horno rotatorio de

secado, pasando previamente por una criba vibratoria gruesa, la que retiene los terrones grandes. La capacidad de secado de la planta es de 180 a 200 Ton de material húmedo por día. La fluorita seca sale del horno a través de un transportador helicoidal para ser movida, posteriormente, mediante un elevador de cangilones, hacia otra criba vibratoria, la que remueve los materiales sólidos extraños que pudieran quedar.

Los gases de combustión del horno pasan primero por un ciclón, luego son filtrados con el objeto de eliminar las partículas finas; posteriormente pasan por un sistema de lavado con agua a contracorriente en circuito cerrado y, por último, son liberados a la atmósfera.

### 2.3.1.2 Producción de HFA

La planta de ácido fluorhídrico (HF) está diseñada para la producción diaria de 50 Ton de HFA, mediante la reacción de ácido sulfúrico sobre la fluorita seca. Para ello se utiliza un pre-reactor, consistente en una máquina de mezclado y amasado de diseño especial en donde el ácido sulfúrico se mezcla íntimamente con la fluorita, iniciando la reacción y generando grandes cantidades de gas. La mezcla de reacción se mantiene en el pre-reactor a 100 °C y se alimenta al horno como una masa seca y desmoronadiza. El pre-reactor cuenta con una camisa de vapor, para ayudar a la reacción y prevenir la reconversión. Luego se envía la mezcla a un reactor rotatorio, también calentado indirectamente.

La reacción puede representarse por la siguiente ecuación:



La reacción es endotérmica, es decir, que requiere de un suministro constante de energía calorífica para que se lleve a cabo.

Al ácido fluorhídrico que resulta de la reacción se le libera de una gran parte del ácido sulfúrico no consumido, del agua y de las impurezas no volátiles, en una columna de pre-purificación, para luego condensarse en forma de HF, con una pureza aproximada del 99%. Los gases de reacción que salen del pre-reactor se conducen al fondo de la columna de pre-purificación. Aquí tiene lugar un intercambio de calor y de masa; el contenido calorífico de los gases de reacción causa la evaporación del HF que pasa, en estado líquido, de la parte superior a inferior de la columna. En la parte superior de la columna los gases de reacción se enfrían a aproximadamente 20 °C, por contacto directo con HF líquido y se liberan de ácido sulfúrico y agua. Esta condensación se lleva a cabo en tres condensadores, enfriados por medio de salmuera.

El condensado del condensador I se colecta en el tanque de ácido crudo I. La columna de pre-purificación se alimenta con reflujo desde el tanque de ácido crudo I. El condensado del condensador II se colecta en el tanque de ácido crudo II, el que representa la producción de HF crudo de alta concentración. Este ácido crudo se bombea a la columna de destilación.

Posteriormente, se separa el HF por destilación presurizada (2,04 Kg/cm<sup>2</sup>) de las diversas impurezas volátiles, tales como SO<sub>2</sub> y SiF<sub>4</sub>. El calentamiento se realiza por medio del suministro constante de vapor al calentador de la columna de destilación. El reflujo se lleva a cabo por el condensador de la columna que se enfría con agua del circuito de la torre de enfriamiento. La presión en la columna se regula controlando la corriente de gases de venteo.

El ácido puro fluye continuamente desde el fondo del depósito de la columna de destilación, pasando por el enfriador de ácido destilado, para descargar finalmente dentro de los tanques de recepción de HF. Las impurezas volátiles (SO<sub>2</sub> y SiF<sub>4</sub>) y el HF que es arrastrado con los gases inertes de las etapas de condensación y destilación, se absorben en H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> en una columna de absorción, de manera tal que sólo un 2% del total de HF producido pasa a la etapa siguiente de absorción en agua. En esta columna se absorben los vapores de HF de tal forma que los gases que salen de la columna

contienen sólo la cantidad de HF consumida en la formación de ácido fluorosilícico. El HF residual que permanece en los gases que dejan la columna de absorción en  $H_2SO_4$ , así como todo el  $SiF_4$  presente, se absorben en agua en una torre empacada con carbón. Los gases de cola que salen de esta unidad son enviados a la atmósfera.

La planta está equipada con un sistema de absorción secundaria o de emergencia, compuesto de un absorbente secundario y un ventilador. Si la presión en el reactor se eleva, los gases contenidos en él pueden ventearse al sistema de absorción secundaria a través de un sistema automático. La succión del gas la proporciona el ventilador, el efluente líquido se bombea al drenaje químico de la planta y los gases agotados de la absorción secundaria se ventean a la atmósfera. Como subproducto de la reacción se obtiene anhídrita.

### 2.3.1.3 Ultrapurificación del HFA

El proceso de ultrapurificación del HPA cuenta con dos reactores por lotes agitados mecánicamente y con capacidad de  $10\text{ m}^3$  cada uno, en los cuales el HFA reacciona con diversos agentes químicos para producir un precipitado de sales insolubles. El ácido en este proceso es conducido por bombeo desde los reactores hasta un tanque de sedimentación donde se separan los sólidos formados.

El ácido libre de agentes reductores pasa por gravedad del tanque de sedimentación a un evaporador, luego a un recalentador y, finalmente, a otra columna de destilación, en la que se destila el producto utilizando una corriente de ácido frío como reflujo en la parte superior de la columna.

Los gases purificados de HFA salen de la columna por su parte superior, mientras que el agua y otras impurezas permanecen en la sección inferior de la misma, de donde son purgadas periódicamente.

El HFA gaseoso se enfría y condensa en un intercambiador de calor enfriado con NH<sub>3</sub>; de allí fluye por gravedad a un tanque de bombeo, desde donde se envía a los tanques de almacenamiento de producto terminado.

#### 2.3.1.4 Planta de HF-70%

El proceso es una dilución directa del HFA en agua des-ionizada hasta una concentración en peso del 70%.

El HF en estado gaseoso se alimenta a la parte inferior de un reactor cilíndrico vertical de acero al carbono, recubierto interiormente de teflón, denominado "mezclador"; el agua se alimenta a contracorriente por el extremo superior del reactor. El ácido diluido que sale del mezclador por su extremo inferior pasa a través de un intercambiador de calor enfriado con agua antes de ser almacenado temporalmente en dos tanques verticales de polietileno con capacidad para 20 Ton de HF-70% cada uno.

#### 2.3.2 PLANTA DE BIFLUORURO DE AMONIO

Las materias primas para este proceso son HF y NH<sub>3</sub> anhidro, según la siguiente reacción:



El HF se alimenta al área de proceso desde un vagón-tanque presurizado. Una vez en el área, pasa a través de un evaporador, un recalentador y un amortiguador, para finalmente ser enviado al reactor de bifluoruro de amonio (BFA). Por otra parte, el NH<sub>3</sub> procedente de los tanques de almacenamiento de la planta pasa por un proceso similar, con el objeto de ser alimentado al reactor en fase gaseosa.

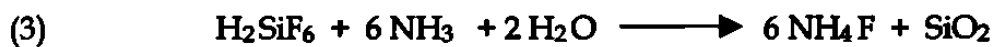


El HF y el NH<sub>3</sub> reaccionan produciendo BFA, el que se condensa parcialmente en el reactor. La reacción se completa en un condensador, desde donde fluye BFA líquido a una temperatura entre 150 y 160°C hacia la escamadora, pasando previamente por un enfriador de acero al carbón enfriado con agua. En la escamadora, que es un cilindro rotatorio de magnesio, el BFA pasa de líquido a sólido, sobre la superficie enfriada interiormente con agua, cuando se alcanza una temperatura de 126°C.

El producto en forma de escamas se empaqueta en bolsas de polietileno de 22,7 y 25 kg.

### 2.3.3 PLANTA DE SOLUCIÓN DE FLUORURO DE AMONIO

Las materias primas para este proceso son ácido fluorosilícico (AFS) al 25-27% y amoníaco anhidro según la siguiente reacción:



Estos productos se alimentan a un reactor de acero inoxidable de 8000 litros, en el que se mantiene un cierto nivel de agua amoniacal. La solución se recircula continuamente a través de un intercambiador de calor enfriado con agua. El NH<sub>3</sub> líquido se alimenta al reactor hasta alcanzar un pH = 10; en este momento se inicia la alimentación del AFS. La recirculación se mantiene para remover parte del calor de reacción, manteniendo la temperatura del sistema entre 60 y 70°C y el pH se ubica entre 10 y 11. Con ello se asegura la completa reacción del AFS y la precipitación de sílice (SiO<sub>2</sub>) como subproducto del proceso.

El proceso de producción del monofluoruro de amonio (MFA) opera como sistema intermitente o por cargas, deteniéndose cuando la capacidad efectiva del reactor disminuye a un 80%. En ese momento se detiene la alimentación de materias primas y la mezcla se centrifuga para remover el sílice formado.

La solución de MFA, con una concentración en peso del 36-37%, se envía a los tanques de almacenamiento temporal y, posteriormente, a una unidad de separación de sílice, desde donde se transfiere por bombeo a los vagones-tanque que transportan el producto final fuera de la planta.

#### **2.3.4 SERVICIOS AUXILIARES**

La planta cuenta con distintos sistemas auxiliares entre los que se cuentan:

- Suministro de agua; compuesto por 2 pozos profundos, piletas de almacenamiento, equipos de bombeo y sistema de distribución.
- Agua de enfriamiento; formado por dos torres de enfriamiento, equipos de bombeo, dosificación de productos químicos y líneas de distribución.
- Generación de vapor; compuesto por 2 calderas de 600 HP, suavizadores, equipos de precalentamiento de agua, bombas, recuperación de condensados y líneas de distribución.
- Refrigeración; que consta de 2 unidades (una a base de freón-12 y la otra a base de HFC-122), 3 compresores de amoníaco, condensadores, trampas de NH<sub>3</sub>, tanque colector, tanque de almacenamiento y evaporadores.
- Abastecimiento de aire, formado por 3 compresores con motores de 75 a 100 HP
- Energía eléctrica, con alimentación de CFE, de 13200 voltios, subestaciones, transformadores, equipos de medición y líneas de transmisión y distribución.

- **Taller central de mantenimiento mecánico y soldadura.**
- **Laboratorio de control de calidad.**
- **Consultorio médico y área de primeros auxilios.**

### **2.3.5 GENERACIÓN DE RESIDUOS NO PELIGROSOS**

Los residuos no peligrosos (según análisis CRETIB), generados en las diversas operaciones de la planta, que son de interés para el presente estudio, son la anhidrita y la chatarra.

#### **2.3.5.1 Anhidrita**

Constituida en un 98-99% por sulfato de calcio anhidro (yeso), es un subproducto de la fabricación del HFA. Se acumula en un depósito a cielo abierto dentro de los límites del terreno de la planta.

Este material ha sido analizado y estudiado en repetidas ocasiones por las autoridades competentes, incluyendo la PROFEPA y el Municipio. Como resultado de esos análisis (CRETIB), se llegó a la conclusión de que el material no es peligroso. Sin embargo, la anhidrita sometida a esos análisis es la producida en la tercera etapa de la historia de la planta, la que anteriormente tuvo otros propietarios que se abastecieron de fuentes de fluorita de calidad inferior con contenidos importantes de metales pesados. Esta observación viene a proveer con la mayor justificación a los estudios que son descriptos a partir del siguiente capítulo.

### **2.3.5.2 Chatarra**

La chatarra metálica, proveniente del desmantelamiento de equipos y tuberías de proceso obsoletas o substituidas, se almacena temporalmente en un área específica de la planta, sobre una losa de yeso impermeable. Previa limpieza o neutralización, y posterior inspección por el Departamento de Seguridad, la chatarra se entrega para su reciclaje a una empresa local especializada.

### **3. ESTUDIO PREVIO DE AFECTACIÓN DE SUELOS**

Para conocer la afectación que presentaban los suelos de la planta industrial en estudio, se llevó a cabo un estudio previo al realizado para la presentación de este trabajo. Este Estudio de Afectación de Suelos fue realizado en el sitio por una consultoría privada, entre el 4 y el 16 de noviembre de 1996, mismo que se describe a continuación.

Durante el estudio previo de afectación de los suelos se llevaron a cabo las siguientes actividades:

- 20 perforaciones profundas
- 17 perforaciones manuales superficiales
- Recolección de un total de 194 muestras de suelo
- Monitoreo de pH y conductividad eléctrica en el sitio
- Análisis químico de las muestras de suelo

Las 20 perforaciones profundas se llevaron a cabo en las áreas susceptibles de estar contaminadas, mientras que las 17 perforaciones manuales fueron realizadas en la planta, para caracterizar las condiciones superficiales.

#### **3.1 PERFORACIONES PROFUNDAS**

Las perforaciones profundas se llevaron a cabo en puntos preseleccionados por los consultores, con la participación de personal de la planta química. El procedimiento fue aprobado por representantes de la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA), antes de iniciar las tareas de campo. Todas las perforaciones fueron efectuadas utilizando un equipo para perforaciones profundas de suelo, de barrenas huecas, tipo CME-75 (HSA) y con alcance hasta una profundidad máxima de 7,2 m.

### **3.2 PERFORACIONES MANUALES**

Las 17 perforaciones manuales se practicaron en áreas inaccesibles para realizar perforaciones profundas o en puntos donde sólo se requería caracterización superficial. La máxima profundidad de las perforaciones fue de 30 cm.

### **3.3 MUESTRAS DE SUELO**

Las muestras de suelo fueron tomadas de las siguientes áreas conforme a la descripción hecha en la Figura 3.1:

- Área del antiguo tanque subterráneo de combustible (U)
- Área del tanque superficial de diesel (A)
- Lagunas de evaporación (L)
- Área de procesos químicos (P)
- Área de la planta antigua (O)
- Perímetro de la propiedad (B)

La información detallada sobre el muestreo se encuentra reportada en la Tabla 3.1.

A continuación se hace el análisis, por separado, para cada una de las áreas muestreadas.

#### **3.3.1 ÁREA DEL ANTIGUO TANQUE SUBTERRÁNEO DE ALMACENAMIENTO DE COMBUSTIBLE (U)**

En esta área se tomaron 18 muestras de suelo; 4 a partir de perforaciones con barrena y 1 con perforación manual, a profundidades que van desde 0,15 m hasta 6,10 m por debajo del nivel del suelo. Cada una de estas muestras fue analizada para determinar la

presencia de compuestos orgánicos volátiles (VOCs), hidrocarburos totales de petróleo (TPH) y los metales definidos en la "Resource Conservation and Recovery Act" (RCRA) de la EPA (Arsénico, Bario, Cadmio, Cromo, Mercurio, Níquel, Plata, Plomo y Selenio).<sup>9</sup> Los resultados obtenidos de los análisis de laboratorio, para todas las muestras, se enlistan en la Tabla 3.2.

### **3.3.2 ÁREA DEL TANQUE SUPERFICIAL DE DIESEL (A)**

En esta área, localizada al oeste-noroeste del área anterior y de las áreas de procesos químicos, se realizaron 2 perforaciones con barrena y 2 perforaciones manuales, colectándose un total de 12 muestras. Las profundidades a las que se obtuvieron las muestras van desde 0,15 m hasta los 6,10 m por debajo del nivel del suelo. Cada una de estas muestras fue analizada para determinar la presencia de VOCs, TPH y los metales definidos por la RCRA. Los resultados completos obtenidos de los análisis de laboratorio, se muestran en la Tabla 3.3.

### **3.3.3 LAGUNAS DE EVAPORACIÓN (L)**

Los dos estanques de contención se localizan al norte de las vías del ferrocarril que dividen la propiedad. Estos estanques de contención contienen residuos provenientes de procesos y aguas residuales generados en el sitio. Se realizaron 5 perforaciones de suelo con barrena y 5 perforaciones manuales, dentro y alrededor de los estanques, con el fin de caracterizar el suelo y el material que se encuentra por debajo y en las orillas de dichos estanques. Se obtuvieron 56 muestras de suelo y de sólidos, a profundidades comprendidas entre los 0,15 m y los 6,10 m. Cada una de estas muestras fue analizada para determinar la presencia de VOCs, TPH y los metales definidos por la RCRA. Los resultados completos, obtenidos de los análisis de laboratorio, se muestran en la Tabla 3.4.

### **3.3.4 ÁREA DE PROCESOS QUÍMICOS (P)**

En el área de procesos químicos se realizaron 5 sondeos con barrena y 6 con perforación manual, localizados entre el área de tanques subterráneos y el área de la planta antigua, señalados en la Figura 3.1. A partir de estos sondeos se obtuvieron 59 muestras, a profundidades comprendidas entre los 0,15 m y los 4,57 m, a partir del nivel del suelo. Cada una de estas muestras fue analizada para determinar la presencia de VOCs, TPH y los metales definidos por la RCRA. Los resultados completos, obtenidos de los análisis de laboratorio, se muestran en la Tabla 3.5.

### **3.3.5 ÁREA DE LA ANTIGUA PLANTA DE PROCESOS QUÍMICOS (O)**

Esta área se encuentra localizada en la porción oeste central del sitio. Es el punto en el que la planta inició sus operaciones. Aquí sólo permanecen algunos edificios, donde se realizó un sondeo con barrena y 2 sondeos manuales. Se tomaron un total de 7 muestras de suelo, las cuales correspondieron a profundidades de entre 0,15 m y 6,10 m por debajo del nivel del suelo. Cada una de estas muestras fue analizada para determinar la presencia de VOCs, TPH y los metales definidos por la RCRA. Los resultados completos, obtenidos de los análisis de laboratorio, se muestran en la Tabla 3.6.

### **3.3.6 PERÍMETRO DE LA PROPIEDAD (B)**

Se realizaron 4 sondeos mediante perforación con barrena, a lo largo del perímetro de la propiedad y en cada uno de los vértices del sitio de estudio. Se tomaron un total de 20 muestras, a profundidades comprendidas entre los 0,15 m y los 6,10 m por debajo del nivel del suelo. Cada una de estas muestras fue analizada para determinar la presencia de VOCs, TPH y los metales definidos por la RCRA. Los resultados



completos obtenidos en los análisis de laboratorio se muestran en la Tabla 3.7.

### **3.4 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS**

De la cuidadosa observación de los resultados de los análisis químicos en los puntos de muestreo surgió que:

- Los sondeos no se realizaron hasta la profundidad adecuada. Ello puede advertirse en que las muestras tomadas a mayor profundidad todavía presentan signos de contaminación, por lo que el estudio preliminar no sirvió para indicar hasta qué profundidad debiera llevarse a cabo una posible remediación.
- Hay muestras cuyos resultados son sospechosos. Ello puede observarse en algunas muestras que arrojan resultados sumamente disímiles dentro del mismo sondeo, por ejemplo la muestra L4 presenta variaciones extrañas tanto en los resultados de Arsénico como en los de TPH.
- Hay posible contaminación con otros metales. A excepción de la plata, en los resultados de los análisis químicos de estas muestras se encontraron presentes todos los metales buscados en los análisis, cuya procedencia se debe a las probables impurezas contenidas en la fluorita y que, por consiguiente, deberán hallarse ahora en la anhidrita apilada. Por lo anterior no puede descartarse la contaminación del suelo con otros metales cuya existencia no se buscó probar en el estudio previo.

Debido a los motivos expresados anteriormente, se llevarán a cabo análisis complementarios en el sitio de estudio, como parte del contenido de la presente tesis.

## 4. ESTUDIO COMPLEMENTARIO DE AFECTACIÓN DE SUELOS

### 4.1 INTRODUCCIÓN

Debido a que en el estudio previo de afectación de suelos hubo áreas que no fueron incluidas, o áreas que no fueron estudiadas hasta la profundidad adecuada, según lo mostraron los resultados obtenidos descritos en el capítulo anterior, se procedió a realizar un estudio complementario que incluyó a los siguientes sitios, indicados en la Figura 4.1:

- a) Cárcamo de tratamiento de residuos
- b) Cárcamos de recolección de combustible, en uso y el antiguo, este último adyacente al tanque de combustible actualmente en operación
- c) Tanques sépticos, antiguo y en uso, drenajes y lechos percoladores
- d) Montículo de anhidrita
- e) Área actual de procesos químicos.

Estas áreas, las cuales no fueron debidamente caracterizadas en el estudio previo, podrían estar contaminadas, por las razones que a continuación se mencionan:

- a) **Cárcamo de tratamiento de residuos.** Esta estructura consiste en una fosa de concreto recubierta con un protector plástico colectivamente conocido como *liner*; esta fosa se utiliza para neutralizar los residuos peligrosos (corrosivos y contaminados con arsénico procedentes de la fluorita utilizada originalmente como materia prima). Si bien el *liner* que recubre la fosa es relativamente nuevo, éste se encuentra perforado en diversas porciones y no se conoce el estado del concreto debajo de él, por lo que pudieron haber existido fugas sub-superficiales.

- b) **Cárcamos de recolección de combustibles, antiguo y en uso.** Al momento de la inspección ocular de la planta, uno de estos cárcamos contenía agua con diesel, desconociéndose el origen de dicho combustible. Además, como la empresa reportó la clausura del antiguo cárcamo, debido a que era "demasiado grande", el personal actual de la planta desconoce si dicho cárcamo ya contenía diesel al momento de la clausura.
- c) **Tanques sépticos, antiguo y en uso.** Se reemplazó el antiguo tanque séptico por otro ubicado junto a él, debido a que el primero se había tapado. Estos tanques reciben aguas residuales provenientes de los siguientes puntos: el laboratorio, el sistema de ósmosis inversa de la planta potabilizadora, la cocina y los baños de la planta. Los planos de los servicios auxiliares no se encuentran en la planta, por lo que no puede descartarse la posibilidad de que estos tanques reciban o hayan recibido otros tipos de descargas diferentes o adicionales a las identificadas actualmente.
- d) **Montículo de anhídrita.** Este montículo actualmente ocupa un área de 26 000 m<sup>2</sup> y debido al tamaño del mismo no puede descartarse la posibilidad de que allí se hayan depositado otros residuos.
- e) **Área actual de procesos químicos.** Debido a las fugas y/o emanaciones de gases de la planta (amoníaco y ácido fluorhídrico, principalmente), existe la posibilidad de que el suelo de esta área pueda haberse afectado.

Por lo expresado anteriormente, durante el periodo comprendido entre el 2 y el 11 de febrero de 2000, se llevaron a cabo en las áreas mencionadas los siguientes trabajos de campo:

- Estudios de suelos sub-superficiales en la planta
- Estudios de suelos superficiales, en el exterior de la planta.

## 4.2 ESTUDIOS DE SUELOS

Se realizaron once sondeos, ubicados según se muestra en la Figura 4.1. Las muestras de suelo fueron tomadas de manera que pudiera ser estudiada la extensión, tanto horizontal como vertical, de los posibles efectos adversos al suelo sub-superficial en las siguientes áreas:

- Cárcamo de tratamiento de residuos (R)
- Cárcamo de recolección de diesel (D)
- Tanques sépticos (S)
- Área comprendida entre el montículo de anhidrita y la planta (I)
- Montículo de anhidrita (M)

Además, se tomaron muestras superficiales de suelo en dos propiedades adyacentes a la planta (E).

Para realizar las perforaciones se subcontrató a la empresa Estudios Especializados de Mecánica de Suelos, S.A. de C.V. (EEMSSA) la que utilizó una perforadora del tipo rotatoria, marca Foremost Mobile, modelo B-59, la cual se encuentra montada sobre un camión Dodge RAM 6500, utilizando para el avance barrenas sólidas de 4.25 pulgadas de diámetro externo, de acuerdo con la Norma ASTM-D-1452-95. El muestreo del subsuelo se llevó a cabo a profundidades entre 8 y 82 pies por debajo del nivel del suelo (2,4 y 25 m), obteniendo las muestras de suelo con un muestreador de prueba estándar y de muestreadores California de 2.5 y 3 pulgadas de diámetro interno, todos con longitud de 2 pies (0,60 m).

Para el muestreo se utilizó el muestreador del tipo tubo partido de la prueba de penetración estándar, de acuerdo con la norma ASTM D1586-84. Esta prueba consiste

en hincar, mediante golpes, el tubo partido de 60 cm de largo, 5,08 cm de diámetro exterior y 3,49 cm de diámetro interior, mediante la energía proporcionada por una masa de 64 kg. de peso que se deja caer libremente desde una altura de 75 cm. De esta misma forma se realizaron los hincados de los muestreadores California. Se registraron el número de golpes necesarios para que el tubo partido penetrara la distancia requerida y el tipo de suelo encontrado. La Figura 4.2 muestra la clasificación de los suelos que resultó de este procedimiento experimental.

Como paso previo a cada una de las perforaciones, se descontaminó todo el equipo a utilizar, incluyendo las barrenas, las brocas y los muestreadores, utilizando detergente y agua a presión. Además, antes de la toma de cada muestra se descontaminó el muestreador de cuchara partida, según los procedimientos especificados.

Se hicieron observaciones de campo, en busca de evidencias de la presencia de sustancias químicas, clasificando las muestras en el campo, según el método manual-visual que indica la Norma ASTM-2488-93. La descripción completa del suelo en cada punto de los sondeos se presenta en el Anexo B.

Se tomaron hasta tres muestras de cada sondeo, para su posterior análisis de VOCs, compuestos orgánicos semivolátiles (SVOCs), metales (plata, arsénico, berilio, cadmio, cromo, mercurio, níquel, plomo, antimonio, selenio, talio, vanadio y zinc), cianuros, y bifenilos policlorados (PCBs), utilizando los métodos de la USEPA 8260,<sup>10</sup> 8015,<sup>10</sup> series 6010/7000<sup>11</sup> y 8080,<sup>12</sup> respectivamente. Para los análisis de laboratorio se subcontrató a Intertek Testing Service, Laboratorio Ambiental (ITS). ITS está certificado por el Sistema Nacional de Acreditamiento de Laboratorios de Prueba (SINALP).

Cada muestra recolectada durante los sondeos se dividió en dos porciones: una porción se colocó en una bolsa plástica con cierre zip, en la que se analizaron los vapores orgánicos; la segunda porción de la muestra se colocó en una doble bolsa con cierre zip, manteniéndola refrigerada hasta ser enviada al laboratorio, para los correspondientes

**análisis químicos.**

Las bolsas con las muestras de suelo se estabilizaron a temperatura ambiente. Luego se analizó el aire contenido en cada bolsa para detectar la presencia de vapores orgánicos mediante un detector de fotoionización (PID - Gastech Inc, Modelo 1314 SMPN), utilizado como dispositivo de análisis presuntivo.

En base a la presencia de vapores orgánicos fue seleccionado un mínimo de tres muestras de cada sondeo para ser analizadas. Las muestras seleccionadas fueron aquellas que presentaron la mayor lectura durante la determinación de vapores con el PID y las que tenían una mayor probabilidad de contener compuestos orgánicos. Para definir con mayor precisión la extensión vertical del suelo afectado con agentes químicos, se tomó en cuenta también la capa de suelo subyacente, en donde los análisis no mostraron presencia de contaminantes químicos, o que presentaba una mínima evidencia de impacto, o bien la muestra tomada del fondo de la perforación.

De acuerdo con las observaciones de campo y con las lecturas del PID, se detectó la presencia de sustancias químicas en las muestras de suelos tomadas en los sondeos BH1, BH4, MW2 y MW3. Para estos puntos se seleccionaron, para el análisis químico, las muestras de suelo correspondientes al intervalo en el que se encontró evidencia de impacto. En el resto de los sondeos, donde no había evidencia visual de impacto, se seleccionaron para análisis una muestra superficial, una del fondo de la perforación y el intervalo más representativo del sondeo, de acuerdo a las lecturas del PID.

Una vez finalizado el muestreo, los puntos de los sondeos se sellaron con *grout* (una mezcla de agua, cemento-bentonita y arena).

### **4.3 ESTUDIO DE TERRENOS ADYACENTES**

Se tomaron muestras de suelo poco profundo en terrenos adyacentes al sitio de estudio. Para ello se seleccionó una parcela al oriente de la propiedad, la que está separada de la misma por la carretera Panamericana (E1) y una segunda parcela en la que, en un hoyo existente, se depositaron desperdicios en el pasado (E2).

Estas muestras se tomaron en forma superficial, a una profundidad no mayor de 8 pulgadas, utilizando una pala previamente lavada, para fines de descontaminación, siguiendo el método descrito anteriormente.

Para obtener la muestra compuesta E1, se tomaron cinco alícuotas, mientras que para la muestra compuesta E2 se tomaron cuatro alícuotas. Las alícuotas se tomaron en distintos puntos de los terrenos que fueron seleccionados al azar. Las muestras se colocaron en frascos de vidrio limpios, suministrados por el laboratorio y se enviaron a ITS para su análisis químico. Dicho laboratorio realizó los análisis para detectar la presencia de TPH, metales (plata, arsénico, berilio, cadmio, cromo, mercurio, níquel, plomo, antimonio, selenio, talio y zinc), cianuros y PCBs, utilizando los métodos de la USEPA (métodos 8260, 8015, series 6010/7000 y 8080, respectivamente).

Como resultado de estos estudios, se generaron residuos, principalmente residuos de la perforación, los que se colocaron en tambores de 200 litros y se depositaron en el Almacenamiento Temporal de Residuos Peligrosos de la planta, para su posterior disposición final.

### **4.4 RESULTADO DE LAS PERFORACIONES**

La anhídrita es un residuo generado durante la producción de HF. Se generan 3,5 Ton de anhídrita por cada tonelada de HF producida. Actualmente, este residuo se

almacena a cielo abierto, en el límite sur de la propiedad. Se estima que hay acumulados aproximadamente 600 000 m<sup>3</sup> (1 000 000 Ton).

El montículo de anhidrita tiene un color gris claro, con manchas aisladas rojizas y verdosas. Las perforaciones iniciales se realizaron en la base del montículo para confirmar que éste estaba compuesto de anhidrita colocada directamente sobre suelo nativo. Este suelo se halla compuesto principalmente de limo arenoso, arena limosa, limo areno-arcilloso y arcilla limosa.

Los resultados de las cinco perforaciones realizadas en el montículo de anhidrita, así como las seis perforaciones efectuadas en otros lugares de la planta y propiedades adyacentes, confirman que el subsuelo está compuesto por capas alternadas de limo arenoso, arena limosa, arcilla limosa, arena, arena con grava, arcilla-caliche, arcilla con arena y arcilla-caliche con gravilla de caliza. La estratigrafía de cada una de las perforaciones se incluye en el Anexo B.

#### **4.5 RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS QUÍMICOS**

La Tabla 4.1 detalla de qué sondeo se tomó cada muestra y cuáles fueron los parámetros analizados. El resumen de los resultados de los análisis químicos de laboratorio, de las muestras de suelos, se detallan en las Tablas 4.2 y 4.3.

##### **4.5.1 MONTÍCULO DE ANHIDRITA (M)**

Se recolectaron tres muestras compuestas de suelo, cada una de las cuales estaba formada por alícuotas tomadas según se describe en la Tabla 4.1. Estas muestras se recolectaron en la superficie, en el interior y debajo del montículo de anhidrita, respectivamente.



En las muestras tomadas en la superficie y en el interior del montículo de anhidrita, se observó un ligero olor a hidrocarburos. El análisis de TPH de la muestra compuesta superficial reportó una concentración de 207 mg/kg. También se detectó la presencia de PCBs en una concentración de 0,0314 mg/kg. En ninguna de las otras muestras tomadas en el montículo de anhidrita se detectó la presencia de TPH, PCB, SVOCs, o VOCs. Se detectó una pequeña concentración de tolueno en la superficie del montículo de anhidrita (0,012 mg/kg) y en la interfase entre el montículo y el suelo nativo (0,009 mg/kg).

La concentración de metales en el interior y debajo del montículo fue consistente con la del resto de los sondeos, a excepción de la muestra compuesta superficial. Esta muestra produjo elevadas concentraciones de plomo (65,5 mg/kg), mercurio (3,127 mg/kg) y selenio (0,36 mg/kg), en comparación con la concentración hallada en el resto de las perforaciones.

#### **4.5.2 CÁRCAMO DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS (R)**

Se hizo el análisis de una muestra del sondeo R1, adyacente al cárcamo de tratamiento de residuos. La muestra tomada a una profundidad de 4,3 a 4,9 m, por debajo del nivel del suelo, fue la que mostró una mayor lectura de vapores orgánicos con el PID (1400 ppm) debajo de la base del cárcamo. La concentración reportada para TPH de la muestra fue de 1291 mg/kg. Todas las concentraciones de metales presentes en los análisis químicos son consistentes con las concentraciones del resto de las muestras, a excepción del plomo.

#### **4.5.3 TANQUES DE DIESEL (D)**

El sondeo D1 está localizado junto al tanque de diesel, actualmente en uso, y al cárcamo de recolección. El sondeo D2 se perforó aguas abajo del punto D1.

En el sondeo D1 se detectó olor a diesel a una profundidad aproximada de 6,1 m. La concentración de TPH de la muestra tomada a esa profundidad fue de 13 mg/kg. En el sondeo D2 no hubo evidencia de la presencia de TPH. Por otra parte, la concentración de metales en ambos sondeos, se mantuvo dentro del intervalo de las concentraciones normales detectadas en el resto de las muestras del sitio de estudio.

#### **4.5.4 TANQUES SÉPTICOS (S)**

Los sondeos S2 y S1 se realizaron en las inmediaciones de los tanques sépticos, uno actualmente en uso y el otro abandonado, respectivamente. En las muestras analizadas no se detectó la presencia de TPH, PCB ni SVOCs. Se detectó la presencia de tolueno, a nivel de trazas (0,008 mg/kg), en la muestra de suelo tomada del sondeo S1. La concentración de metales, en general, fue consistente con la del resto de las muestras, a excepción del potasio, cuya concentración fue mayor, y del magnesio, cuya concentración fue menor que las concentraciones típicas presentes en el lugar.

#### **4.5.5 PROPIEDADES ADYACENTES (E)**

De las muestras tomadas en los dos sitios seleccionados en el exterior de la planta, aquella tomada en el lote cruzando la Carretera Panamericana (E1), no mostró estar afectada por su uso del suelo, por lo que se la tomó como base para determinar los parámetros de fondo.

La muestra tomada en la excavación del terreno ubicado al noroeste de la propiedad

(E2) mostró concentraciones, a nivel de trazas, de PCBs (0,0174 mg/kg) y concentraciones ligeramente elevadas de plomo (55,5 mg/kg) y mercurio (0,375 mg/kg). No se detectó la presencia de TPH en ninguna de las dos muestras.

#### **4.6 CONCLUSIONES PREVIAS**

Además de los impactos identificados durante el Estudio de Afectación de Suelos realizado previamente, con el Estudio Complementario descrito en este capítulo se identificaron otras áreas cuyos suelos se encuentran también afectados.

Se encontraron elevadas concentraciones de TPH en el suelo sub-superficial adyacente al cárcamo de tratamiento de residuos. Puede haber mayores concentraciones de TPH, entre otros compuestos, debajo y alrededor de dicho cárcamo. Con los datos disponibles se debe determinar la extensión y concentración de la contaminación, para poder determinar la necesidad de remediación.

La operación de los tanques sépticos parece haber ocasionado impactos leves en el suelo, por lo que por el momento no habría necesidad de remediación en esta zona. Para evitar, en el futuro, una mayor contaminación proveniente de dichos tanques sépticos, el tanque abandonado debería vaciarse y cerrarse de manera apropiada y definitiva.

En las muestras compuestas del montículo de anhídrita se encontraron concentraciones relativamente bajas de TPH y PCBs. Si bien estas concentraciones no parecen ser significativas, durante la futura reubicación de este material deberán realizarse tareas para identificar posibles puntos contaminados dentro de este montículo.

## **5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS**

### **5.1 INTRODUCCIÓN**

Una vez conocidos los contaminantes presentes en los suelos del área estudiada, y como paso previo a las propuestas de remediación, debe caracterizarse la extensión de la contaminación del lugar, estimar los potenciales riesgos a la salud y al medio ambiente provocados por dichos contaminantes e identificar los niveles de remediación que deben alcanzarse con el fin de proteger tanto la salud humana como el medio ambiente.<sup>12</sup>

Para poder estimar los riesgos a la salud en los casos en que se hallen presentes dos o más contaminantes, deberá tomarse en cuenta el efecto aditivo de éstos. Esto se debe a que, aún si la cantidad presente de cada uno de ellos, en lo individual, no debiera causar efectos nocivos a la salud, cuando la contaminación se debe a múltiples productos químicos puede haber efectos relacionados.

Por otra parte, muchas veces la cantidad de contaminantes detectados puede ser excesiva y, sin embargo, a menudo sólo unos pocos de entre ellos provocan riesgos a la salud. El resto de los contaminantes detectados tienen una mínima influencia en el riesgo total.<sup>13</sup>

Por este motivo, es necesario realizar un análisis minucioso de los potenciales efectos a la salud causados por cada una de las sustancias químicas presentes en el sitio de estudio de acuerdo al siguiente procedimiento:

- **Determinar qué sustancias químicas están presentes como contaminantes y cuáles están presentes como componentes del suelo nativo, lo cual puede realizarse mediante:**

- Comparación entre muestras del sitio en estudio y muestras del suelo nativo sin contaminar.
- Comparación de las sustancias químicas presentes en el suelo con las que se encuentran en los depósitos de minerales adyacentes.
- Estudio de las rutas de exposición de cada contaminante.
- Estudio de la toxicidad específica de cada contaminante.
- Cálculo de toxicidad equivalente de cada contaminante.
- Selección de los contaminantes significativos.

## **5.2 DETERMINACIÓN DE ESPECIES PRESENTES COMO CONTAMINANTES**

### **5.2.1 GEOLOGÍA ECONÓMICA - DEPÓSITOS DE MINERALES ADYACENTES**

Se ha realizado una distribución zonal general de los depósitos minerales del Estado de Chihuahua. Estos depósitos minerales pueden ser clasificados de acuerdo al tipo de mineralización y ella a su vez se encuentra en relación con la intensidad y el tipo de actividad ígnea, como se muestra en las Figuras 5.1 y 5.2.

Como se puede observar en la Figura 5.2, Ciudad Juárez está ubicada en una zona caracterizada por la presencia de mineralizaciones de los tipos siguientes:

- ✓ Depósitos epitermales de Oro y Plata
- ✓ Vetas de Zinc, Plomo, Plata y Cobre
- ✓ Reemplazamientos de Zinc, Plomo, Plata y Cobre en calizas

Debido a la presencia de los reemplazamientos de metales en las calizas, se pueden descartar el zinc, el plomo, la plata y el cobre como contaminantes. En el caso particular del plomo, la presencia del mismo tiene dos orígenes: la geología del sitio y la contaminación con hidrocarburos, por lo que sólo se descartará como contaminante la fracción de origen geológico.

Por otra parte, existen ocurrencias de mineralización prácticamente en todo el Estado de Chihuahua. Las mineralizaciones de manganeso se encuentran casi siempre asociadas con rocas félsicas del Terciario (rocas ácidas debido a su composición mineral), pero pueden llegar a estar asociadas con rocas sedimentarias, en la forma de depósitos someros de óxido de manganeso. Debido a estas mineralizaciones se puede descartar al manganeso como contaminante.

### 5.2.2 ANÁLISIS DE LA ESTRATIGRAFÍA DEL SITIO

Los tipos de suelo predominantes en el sitio de estudio son:

MATERIAL	COLOR	OBSERVACIONES
Arcilla limosa	Café Café claro Café rojizo Café oscuro Gris verdoso Negra	Vetas de arena Grava de caliza Grumos de CaCO <sub>3</sub> Vetas de arcilla limosa Vetas de limo arenoso Vetas de arcilla limo-arenosa negra
Arcilla limo-arenosa	Café claro Café rojiza	Gravas de caliza Grumos de CaCO <sub>3</sub>
Arcilla limo-calichosa	Beige	Grumos de CaCO <sub>3</sub> Vetas de arena limosa Grumos y nódulos de arcilla limo-calichosa
Arena	Café rojiza Café claro Gris Verdosa Gris	Gravas de caliza Vetas de CaCO <sub>3</sub> Vetas de limo arenoso
Arena limosa	Café rojiza Café oscuro Café claro Café Gris oscuro	Vetas de arcilla Gravas de caliza Grumos de CaCO <sub>3</sub> Vetas de arcilla limosa Vetas de arcilla calichosa
Limo arenoso	Café rojizo Café claro	Vetas de arcilla limosa Nódulos de limo arenoso Lentes de arena Gravas de caliza Arcilla calichosa
Limo areno-arcilloso	Café rojizo	Vetas de arena
Limo	Café rojizo	Gravas de caliza
Gravas		

En el cuadro anterior se puede observar que los suelos predominantes consisten de arena, limo y arcilla, además de la presencia de  $\text{CaCO}_3$  y calizas. Por otra parte los colores predominantes del suelo son: café claro, café rojizo y gris verdoso.

#### 5.2.2.1 · Arenas y Limos

Las arenas y limos están constituidos esencialmente por fragmentos de roca madre, cuarzo, minerales complejos inalterados (del amplio grupo de los silicatos, como feldespatos y biotitas o micas), carbonato de calcio y dolomita (carbonato de calcio y magnesio).<sup>14</sup>

#### 5.2.2.2 Arcillas

Las arcillas provienen de la descomposición lenta de materiales primitivos tales como micas o feldespatos. Son silicatos de alúmina, más o menos hidratados. Se pueden distinguir cuatro familias principales de arcillas:

- ✓ Caolinita:  $2\text{SiO}_2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
- ✓ Montmorillonitas:  $4\text{SiO}_2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
- ✓ Ilitas: con composición intermedia entre las citadas anteriormente
- ✓ Attapulgitas: con frecuencia son magnésicas

En el caso de las ilitas y las montmorillonitas (como el talco o la clorita), algunos iones aluminio de la estructura molecular son reemplazados por iones magnesio. Por otra parte, las ilitas presentan fijación de iones potasio entre los estratos.<sup>15</sup> Por este motivo

no puede considerarse la presencia de aluminio, potasio y/o magnesio como posibles contaminantes.

### **5.2.2.3 Carbonato de Calcio**

El carbonato de calcio, en la mayoría de los casos, va acompañado de carbonato de magnesio (dolomitizado). La presencia de  $\text{CaCO}_3$  en el suelo indica que pueden descartarse el Calcio y el Magnesio como posibles contaminantes.

### **5.2.2.4 Coloración del Suelo**

La coloración del suelo depende del grado de hidratación de los óxidos de hierro y suministra información sobre el microclima del suelo. El estado reducido de las sales de hierro, es decir Fe II, es el que indica insuficiencia de aireación y produce un color gris verdoso. El hierro en estado férrico, Fe III, se dispone en forma pelicular, dando una coloración rojiza a las arcillas, típica de los suelos deshidratados de climas cálidos y secos. Ambas coloraciones están presentes en el suelo en estudio, por lo que se puede descartar la presencia de Hierro como contaminante.

## **5.2.3 COMPARACIÓN DE MUESTRAS DE SUELO CONTAMINADO CON MUESTRAS DE SUELO NATIVO**

Después de analizar el tipo de suelo de la región y determinar cuáles son las sustancias comúnmente presentes, fue necesario hacer una comparación de las muestras de suelo contaminado con muestras de suelo sin contaminar. Esta comparación se realizó para poder identificar si el resto de los metales presentes en las muestras pueden ser considerados como contaminantes o no.



Para ello se consideró al suelo de la propiedad adyacente, ubicada al Oriente de la planta, como suelo nativo, sin contaminación significativa. Los parámetros analizados en esta muestra de suelo se tomaron como parámetros de fondo y se muestran en la Tabla 5.1. Para considerar a un metal cualquiera como contaminante se tomó el criterio de que su concentración debía superar en más de un 30% el valor de concentración de dicho metal en la muestra de suelo nativo.

Una vez realizada esta comparación se pudo concluir que los posibles contaminantes presentes en cada una de las áreas son:

- ✓ **Área del Antiguo Tanque Subterráneo de Combustible:** Arsénico, Cobalto, Bario, Mercurio, Níquel, Plomo y TPH, descritos por los resultados de la Tabla 5.2
- ✓ **Área del Tanque Superficial de Diesel:** Arsénico, Bario, Cobalto, Mercurio, Plomo y TPH, como se muestra en la Tabla 5.3
- ✓ **Área de la Laguna de Evaporación:** Arsénico, Bario, Mercurio, Níquel, Plomo, Selenio, Benceno, Etilbenceno, Diclorobenceno y TPH, como se muestra en la Tabla 5.4
- ✓ **Área de Procesos Químicos:** Arsénico, Bario, Cadmio, Mercurio, Níquel, Plomo, Selenio, Benceno, Etilbenceno, Diclorobenceno, Tolueno, Xilenos y TPH, mostrados en la Tabla 5.5
- ✓ **Antigua Área de Procesos Químicos:** Arsénico, Bario, Mercurio, Plomo, Xilenos y Diclorobenceno, mostrados en la Tabla 5.6
- ✓ **Perímetro de la Propiedad:** Arsénico, Mercurio, Plomo, Selenio, Xilenos, Diclorobenceno y TPH, resumidos en los datos de la Tabla 5.7
- ✓ **Montículo de Anhidrita:** Arsénico, Plomo, Bario, Mercurio, Cromo, Selenio, Níquel, Cobalto, Sodio, Tolueno, Xilenos y TPH, mostrados en la Tabla 5.8
- ✓ **Aguas Abajo del Montículo de Anhidrita:** Arsénico, Bario y Cobalto, reportados en la Tabla 5.8
- ✓ **Antiguo Tanque Séptico:** Bario, Cromo, Cobalto, Sodio y Tolueno, con sus datos contenidos en la Tabla 5.9
- ✓ **Cárcamo de Tratamiento de Residuos:** Arsénico, Bario, Cobalto, TPH, Fluoreno y

**Antraceno.** Sus datos de concentración se reportan en la Tabla 5.10

- ✓ **Tanque Séptico Actual:** Bario, Cromo, Cobalto, Sodio y Tolueno, reportados en la Tabla 5.11
- ✓ **Propiedad Adyacente, Junto a la Excavación:** Cadmio, Plomo, Mercurio, Cromo, Cobalto, Níquel y PCBs, mostrados en la Tabla 5.12
- ✓ **Aguas Abajo de los Tanques de Diesel:** Bario, Cromo, Cobalto, Sodio y Tolueno, reportados en la Tabla 5.13

Por otra parte, también se revisaron los valores de concentración de todos los metales presentes en el suelo y que no son considerados contaminantes, para verificar que no superaran las concentraciones de los RBC (EPA's Risk Based Concentrations).<sup>16</sup> Las concentraciones presentes de Hierro, Calcio, Magnesio, Aluminio, Potasio, Zinc, Plata, Cobre y Manganeso, en ningún momento superaron el 5% de las concentraciones de RBC. Para estos análisis y revisión se incluyó al suelo nativo.

### 5.3 SELECCIÓN DE LOS CONTAMINANTES SIGNIFICATIVOS

En las Tablas 5.1 a 5.13 puede observarse la presencia de contaminantes en concentraciones significativamente diferentes. Para poder predecir cuál de estas sustancias debe ser considerada como contaminante significativo, se utilizó el método de comparación directa, tomando como base las tablas de toxicidad relativa de la EPA.<sup>17</sup> Esta tabla contiene datos de concentración para casi 600 sustancias e incluye si se hallan en el aire, el agua para beber o el suelo. Estas concentraciones corresponden a un cociente de peligro sistémico de 0,1 para sustancias no carcinogénicas y un riesgo de cáncer de  $10^{-6}$  para sustancias carcinogénicas. Este método consiste en:

- Comparar la concentración de cada una de las sustancias presentes como contaminantes en el suelo frente a la Tabla de Concentraciones Basadas en el Riesgo (RBC) de la EPA para suelo tipo industrial.
- Si hay presentes contaminantes no incluidos en la tabla de RBC, se calcula la

concentración de riesgo alternativa, para poder realizar esta comparación.

- Si la concentración presente excede la concentración especificada en la tabla de RBC, el contaminante se considera como significativo.
- Si el contaminante no excede la concentración estipulada en la tabla de RBC, se excluye este contaminante.
- Con todos los contaminantes excluidos se prepara otra lista, para poder incluirlos posteriormente, en caso necesario.

Del procedimiento descrito anteriormente surgieron los siguientes resultados:

**Contaminantes Significativos:** Arsénico

**Contaminantes a evaluar:** TPH

**Contaminantes no significativos:** Bario, Cadmio, Cobalto, Cromo, Níquel, Plomo Mercurio, Selenio, Sodio, Aroclor 1242, Antraceno, Benceno, Diclorobenceno, Etilbenceno, Fluoreno, Tolueno y Xilenos.

Para evaluar los contaminantes no significativos se utilizó el método descrito en la publicación "*Technical Background Document*" de la EPA, para suelos.<sup>18</sup> Este método considera ecuaciones para calcular la concentración de contaminantes considerando tres rutas de exposición:

- Ingestión de suelo
- Inhalación de sustancias volátiles y polvos fugitivos
- Ingestión de agua subterránea contaminada por migración de contaminantes, a través del suelo, hasta acuíferos someros factibles de potabilizar

En el sitio en estudio, el agua subterránea se encuentra a una profundidad de 130 m por debajo del nivel del suelo, por lo que no se considerará la tercer ruta de exposición.

### 5.3.1 TPH

El análisis de TPH se utiliza normalmente para evaluar la presencia de petróleo crudo o de productos derivados del petróleo en suelos. Sin embargo, debido a que la movilidad y la toxicidad dependen de las especies o familias químicas que constituyen al hidrocarburo (o mezcla de hidrocarburos), y más fundamentalmente a la fracción de constituyentes alifáticos y aromáticos, los TPH hasta ahora no se utilizaban para la evaluación de riesgo, sino que se utilizaban indicadores tales como BTEX para hidrocarburos alifáticos y PAH para hidrocarburos aromáticos.

Los TPH existentes en esta planta se originaron a partir de diesel. Este combustible contiene compuestos volátiles y semivolátiles aromáticos, mayormente de cadenas pesadas, tales como benceno, antraceno, fluoreno, etilbenceno y diclorobenceno, los que están considerados entre las sustancias más tóxicas de los combustibles refinados. Además de estas sustancias, se sabe que el diesel contiene mayormente alcanos y alquenos alifáticos de baja toxicidad. Uno de los posibles substituyentes del contenido alifático del diesel puede ser el hexano, un hidrocarburo de cadena recta relativamente poco tóxico. Suponiendo que los TPH hubieran sido originados por hexano, la tabla de RBC nos indica una concentración máxima permisible para suelos industriales de 120 000 mg/kg de suelo.

Recientemente se comenzaron a utilizar los TPH como indicadores de riesgo para suelos contaminados.<sup>17</sup> Para los casos en que se desconozca la mezcla de hidrocarburos presentes, se hace primero un análisis para determinar la concentración de compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles, con lo que posteriormente la RBC se calcula sumando el riesgo individual que representa cada uno de los compuestos.

Para determinados casos, en los que se conoce el tipo de hidrocarburo que causó la contaminación, por ejemplo diesel o gasolina, los TPH pueden utilizarse como indicadores de contaminación.<sup>19</sup> Ello se debe a que se conoce la mezcla típica de hidrocarburos que componen la gasolina o el diesel. Las distintas regiones de la EPA

están adoptando valores de RBC para TPH comprendidos entre 5 000 y 10 000 mg/kg de suelo.

En base a lo anterior, para este estudio se adoptó como criterio un valor de RBC para combustible Diesel de 5 000 mg/kg de suelo contaminado, por lo que se puede considerar a los hidrocarburos de petróleo, en conjunto, como un contaminante significativo.

#### **5.4 EVALUACIÓN DE LOS CONTAMINANTES NO SIGNIFICATIVOS**

La mayor parte de los contaminantes no significativos, y de los contaminantes pendientes de evaluación, se hallan presentes junto con los contaminantes significativos. Sin embargo, hay zonas en las que cada uno de los contaminantes, en lo individual, no presentan riesgos a la salud, pero no se puede determinar a simple vista si el conjunto de contaminantes presentes podrían representar un peligro.

Para realizar esta evaluación se utilizó el método descrito en la sección 5.2, eligiendo los puntos que mostraron mayor concentración en las siguientes especies, conforme a los datos reportados en la Tabla 5.23:

- Bario
- Cadmio
- Cobalto
- Cromo
- Mercurio
- Níquel
- Plomo
- Selenio
- Aroclor 1242
- Antraceno

- Benceno
- Diclorobenceno
- Etilbenceno
- Fluoreno
- Tolueno
- Xilenos
- Arsénico (concentraciones menores a las de la tabla de RBC) y
- TPH (concentraciones menores a las de la tabla de RBC).

#### 5.4.1 EFECTOS SOBRE LA SALUD

En primer lugar, es necesario evaluar los efectos de cada una de las sustancias sobre la salud. Una vez determinado ello, se calcula el efecto aditivo de aquellas sustancias que afectan al mismo órgano. Enseguida se presentan las rutas de exposición y los efectos del grupo de sustancias de interés para este trabajo.<sup>20</sup>

- **Bario**: Las rutas de exposición son a través de inhalación e ingestión. Afecta al sistema circulatorio, al sistema reproductivo, al sistema respiratorio y al gastrointestinal, especialmente al corazón, la piel y los pulmones, aunque se sabe que también afecta a los ojos.<sup>21</sup>
- **Cadmio**: Las rutas de exposición son a través de inhalación e ingestión. Afecta a los riñones y al hígado y puede causar fragilidad en los huesos.<sup>22, 23</sup>
- **Cobalto**: Las rutas de exposición a humos y polvos de cobalto metálico son a través de inhalación, ingestión y por contacto dérmico y ocular. La exposición crónica al cobalto metálico puede producir trastornos dérmicos y al sistema respiratorio, así como disminución de las funciones pulmonares, fibrilación y respiración entrecortada. El envenenamiento crónico con cobalto puede afectar a los huesos, la glándula tiroides, el pericardio y el páncreas.<sup>24</sup>
- **Cromo**: Las rutas de exposición a los compuestos de cromo II, al igual que para el cromo III, son a través de inhalación, ingestión y por contacto dérmico u ocular.<sup>25</sup>

Tiene una baja toxicidad comparada con la del cromo hexavalente, afectando al sistema respiratorio y causando asma. La exposición crónica al cromo III puede ocasionar dermatitis y daños al hígado y los riñones.<sup>26</sup>

- **Níquel:** Las rutas de exposición a los compuestos solubles de níquel son inhalación, ingestión y contacto dérmico y ocular. Puede afectar al sistema cardiovascular, los riñones y el sistema nervioso central. La exposición crónica puede producir alergias severas en piel, ojos y sistema respiratorio, infecciones de piel, dificultad o dolor para respirar, asma o bronquitis. El contacto con la piel puede causar manchas con cambios de pigmentación.<sup>27</sup>
- **Plomo:** Las rutas de exposición al plomo son a través de inhalación e ingestión. La absorción dérmica es una ruta de exposición sólo para el plomo orgánico.<sup>28</sup> Afecta a la hemoglobina causando anemia. También afecta a los sistemas nerviosos central y periférico. Produce trastornos gastrointestinales, renales y afecta al sistema reproductivo, tanto femenino como masculino.<sup>29</sup>
- **Arsénico:** Las rutas de exposición al arsénico son a través de inhalación, ingestión y contacto dérmico.<sup>30</sup> El arsénico orgánico es poco dañino, pero el arsénico inorgánico está considerado como un fuerte veneno.<sup>31</sup> La exposición a altas concentraciones puede afectar al sistema nervioso periférico, al estómago, los intestinos y la piel. La exposición crónica puede ocasionar un oscurecimiento de la piel y la aparición de pequeñas úlceras en las manos, los pies y el torso, anemia, lesiones vasculares, al hígado y a los riñones. Además, puede clasificarse como carcinógeno produciendo, principalmente, melanomas de piel.<sup>32, 33</sup>
- **Mercurio:** Las rutas de exposición son inhalación, ingestión y absorción dérmica. La exposición crónica afecta al sistema nervioso central, al sistema digestivo y los riñones.<sup>34</sup>
- **Selenio:** Efectos en la salud no determinados.<sup>35</sup>
- **Aroclor 1242 (PCB):** Las vías de exposición a esta sustancia son inhalación, ingestión, contacto ocular y dérmico y absorción dérmica. Afecta al aparato reproductivo, es un posible carcinógeno, puede ocasionar dificultades en el aprendizaje de los niños, irritación de los ojos, daños al hígado y daños pulmonares.<sup>36</sup>

- **Benceno:** Las rutas de exposición son a través de inhalación, ingestión y absorción dérmica. Está considerado como posible carcinógeno. Puede afectar la sangre, causando leucemia y anemia.<sup>37</sup>
- **Tolueno:** La exposición al tolueno es a través de inhalación, ingestión y por contacto ocular y dérmico. Afecta al sistema nervioso central y causa irritación de ojos, membranas mucosas y piel. Puede causar daños irreversibles en las córneas. Afecta además a los riñones e hígado. <sup>38</sup>
- **Diclorobenceno:** No se conocen sus efectos.
- **Etilbenceno:** No se conocen sus efectos.
- **Xilenos:** Las vías de exposición a este grupo de compuestos son; inhalación, ingestión, contacto ocular y dérmico y, en menor medida, absorción dérmica. La exposición crónica afecta fundamentalmente al sistema nervioso central; además, pueden producir anemia y ocasionar daños al hígado y los riñones. Como efecto secundario causan sequedad de la piel y dermatitis.<sup>39</sup>
- **TPH provenientes de Diesel:** Las rutas de exposición son a través de inhalación e ingestión. El Diesel está clasificado como producto carcinógeno. Además, puede causar daños a los pulmones y al sistema cardiovascular.<sup>40</sup>
- **PAH (Hidrocarburos poliaromáticos):** Las rutas de exposición son inhalación, ingestión y absorción dérmica. La mayor parte de estas sustancias están consideradas como carcinógenas.<sup>41</sup>
  - **Antraceno:** está considerado como probable carcinógeno.<sup>42</sup>
  - **Fluoreno:** Afecta al sistema circulatorio.<sup>43</sup>

#### 5.4.2 EFECTO ADITIVO

Para evaluar el efecto aditivo de cada uno de los contaminantes en la salud se procedió de la siguiente forma:

- ❖ En primer lugar se descartaron los sondeos cuyos contaminantes son significativos. Ello se debe a que estas áreas ya debieran ser remediadas, por lo



**cual los contaminantes no significativos son irrelevantes.**

- ❖ **Se determinó qué contaminantes están presentes en cada sondeo.**
- ❖ **Se determinó la profundidad en los sitios de mayor carga de contaminantes.**
- ❖ **Se evaluó qué contaminantes afectan al mismo órgano. En los casos en que no se conocieron los efectos de alguno de los contaminantes, se consideró que afecta a los mismos órganos que los demás contaminantes presentes.**

**Esta evaluación se realizó por áreas, mismas que se hallan señaladas en las Tablas 5.24 a 5.37.**

**Una vez realizada dicha evaluación, se procedió a calcular los coeficientes de contaminación y los coeficientes aditivos. Pueden considerarse como áreas contaminadas aquellas cuyo coeficiente aditivo es mayor que la unidad.**

**En el caso en estudio, puede considerarse como área contaminada a la superficie del montículo de anhidrita, debido al efecto aditivo de los contaminantes cuyo coeficiente aditivo es 1,27 según se reporta en la Tabla 5.31.**

**El área del cárcamo de tratamiento de residuos también podría ser considerada como un área contaminada, debido a que, si bien su coeficiente aditivo es menor que la unidad (0.94), es muy próximo a ella, como se muestra en la Tabla 5.33.**

**Finalmente, puede considerarse que el resto de las áreas evaluadas no necesitan remediación.**

## **6. REVISIÓN A LAS ALTERNATIVAS DE REMEDIACIÓN**

### **6.1 INTRODUCCIÓN**

Una vez conocidos los contaminantes presentes en el suelo, la extensión de la contaminación de cada sitio, y después de estimar los riesgos para la salud y para el medio ambiente provocados por dichos contaminantes y habiendo identificado los niveles de remediación que deben alcanzarse, con el fin de proteger tanto la salud humana como el medio ambiente, se procedió a evaluar las distintas técnicas de remediación conocidas. Estas técnicas de remediación debieron evaluarse para los distintos grupos de contaminantes, fundamentalmente metales pesados e hidrocarburos.

En el sitio de estudio están presentes dos contaminantes principales en el suelo, arsénico y TPH, ambos con concentraciones mayores a los RBC, por lo que se deben proponer alternativas de remediación para cada uno de ellos.

### **6.2 ALTERNATIVAS DE REMEDIACIÓN**

En forma general, para evaluar las distintas alternativas de remediación, hay que tomar en cuenta distintos factores tales como:<sup>44</sup>

- Factibilidad de la alternativa propuesta para la remediación de los contaminantes presentes
- Nivel de remediación que sea posible de alcanzar, mediante las alternativas propuestas, en comparación con el nuevo uso del suelo y de la propiedad
- Tiempo que tomará la remediación, según las distintas alternativas
- Costo de las distintas alternativas
- Compatibilidad de las opciones con las características regionales

A continuación se presenta una descripción de las distintas alternativas de remediación factibles, de acuerdo con el contaminante a tratar.

### **6.2.1 TPH**

Para la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos, es posible agrupar las principales alternativas de remediación en los tipos 1) biológicas y 2) físico-químicas.<sup>45</sup>

#### **Remediaciones biológicas**

- ◆ Bioceldas
- ◆ Aireación
- ◆ Biodegradación
- ◆ Bioextracción
- ◆ Bioventilación
- ◆ Atenuación natural

#### **Remediaciones físico-químicas**

- ◆ Desorción térmica a baja temperatura
- ◆ Extracción de vapor de suelos
- ◆ Extracción en dos fases

#### **6.2.1.1 Remediaciones biológicas**

Las remediaciones biológicas se basan en la biodegradación de los hidrocarburos a través de microorganismos y la volatilización.

Los productos derivados del petróleo de peso medio (diesel o queroseno), contienen menor porcentaje de componentes volátiles, por lo que la biodegradación viene a ser más importante que la volatilización. Los productos más pesados (aceites lubricantes)

no se evaporan durante la aireación, por lo que el mecanismo dominante para estos productos es la biodegradación. Por otra parte, a medida que los cortes son más pesados (mayor longitud de cadena molecular) requieren un mayor período de tiempo para su degradación.

Los suelos normalmente contienen un gran número de microorganismos, incluyendo: bacterias, algas, hongos, protozoos y actinomicetos. En los suelos bien drenados, que son los más apropiados para la biodegradación, estos microorganismos normalmente son aeróbicos. De estos microorganismos, las bacterias son el grupo más numeroso y bioquímicamente más activo, especialmente cuando el nivel de oxígeno es bajo. Las bacterias necesitan una fuente de carbono para su crecimiento celular, una fuente de energía para sustentar las funciones metabólicas del crecimiento y una fuente de nitrógeno y fósforo para el crecimiento y reproducción celular. Si bien generalmente hay suficiente variedad y cantidad de microorganismos presentes en el suelo, actualmente se agregan microorganismos cultivados y abono animal (de vacas y pollos). La incorporación del abono ayuda tanto para incrementar la población microbiana como para proveer nutrientes adicionales.

Para el proceso metabólico de la generación de energía de las bacterias se necesita un electrón aceptor terminal (TEA). De esta manera se oxida enzimáticamente la fuente de carbono a dióxido de carbono. Los microbios son clasificados por las fuentes de carbón y el TEA que utilizan para llevar a cabo el proceso metabólico. A las bacterias que utilizan compuestos orgánicos (hidrocarburos y otros compuestos orgánicos naturales) se las denomina heterotróficas mientras que a aquellas que utilizan carbono inorgánico (dióxido de carbono) se las denomina autotróficas. Las bacterias que utilizan oxígeno como su TEA son aeróbicas; a aquellas que utilizan otros compuestos (nitratos o sulfatos) se las denomina anaeróbicas; y a aquellas que utilizan tanto oxígeno como otros compuestos como su TEA, se las llama facultativas. Para el proceso de biodegradación de hidrocarburos, las bacterias importantes son las aeróbicas (o facultativas) y las heterotróficas.

**La efectividad de la biodegradación depende de tres clases de parámetros:**

- ❖ **Características del suelo:** La textura del suelo afecta su permeabilidad, el contenido de humedad y la densidad del suelo. Para asegurar que la oxigenación, la distribución de nutrientes y el contenido de humedad del suelo pueden mantenerse dentro de los niveles efectivos (entre 40 y 85% de la capacidad de saturación del suelo, o entre un 12 y un 30% en peso), debe tenerse en cuenta la textura del suelo. Los suelos que tienden a agruparse (como las arcillas) son difíciles de airear, por lo que su contenido de oxígeno resulta bajo; la distribución de nutrientes se torna dificultosa y retienen la humedad durante períodos más prolongados después de las lluvias. Con la mezcla del suelo debe adicionarse: (a) abono, con el objetivo de incrementar la población microbiana y proveer nutrientes adicionales, (b) correctores de suelo (yeso) y materiales de relleno (aserrín o paja), para asegurar una textura dividida, y (c) sustancias químicas para ajustar el pH del suelo, debido a que el crecimiento bacteriano se realiza en un intervalo de pH entre 6 y 8, siendo 7 el valor óptimo
  
- ❖ **Características de los hidrocarburos:** Si bien casi todos los hidrocarburos que generalmente se almacenan en tanques son biodegradables, mientras más compleja es la estructura molecular del hidrocarburo, más dificultoso y más lento es el tratamiento biológico. La mayoría de los hidrocarburos alifáticos y monoaromáticos de bajo peso molecular (con 9 átomos de carbono o menos) son más fáciles de degradar que los hidrocarburos alifáticos más pesados o poliaromáticos.
  
- ❖ **Condiciones climáticas:** El suelo en tratamiento generalmente no está cubierto, por lo que está expuesto a factores climáticos como la lluvia, la nieve, el viento y los cambios en la temperatura ambiente. El agua de lluvia puede infiltrarse o escurrirse sobre el área tratada, lo que aumentaría el contenido de humedad del suelo y causaría erosión. Los microorganismos necesitan una humedad adecuada del suelo para su crecimiento; un suelo demasiado húmedo restringe

el movimiento del aire a través del suelo sub-superficial, reduciendo la disponibilidad de oxígeno, por lo que durante o después de una lluvia importante, el contenido de humedad del suelo podría ser excesivo para mantener una actividad microbiana efectiva. Por otra parte, durante los períodos de sequía, el contenido de humedad del área podría disminuir en exceso, por lo que podría ser necesario incrementarla. La erosión de los suelos en proceso de biodegradación puede darse durante períodos ventosos, en especial durante el traslado y/o roturado de la tierra. El crecimiento bacteriano es una función de la temperatura y para las bacterias que biodegradan los hidrocarburos de petróleo, el intervalo de temperaturas óptimas es entre los 10 y los 45°C. Como la temperatura del suelo varía con la temperatura ambiente, hay ciertas épocas del año en las que el crecimiento bacteriano disminuye. Cuando la temperatura ambiente vuelve a ser óptima, la actividad bacteriana se restablece gradualmente.

Por otra parte, la presencia en el suelo de concentraciones muy altas de compuestos orgánicos derivados del petróleo, o de metales pesados, puede ser tóxica e inhibir el crecimiento y la reproducción bacteriana.

#### **6.2.1.1.1 Bioceldas**

Las bioceldas se utilizan para reducir la concentración de constituyentes del petróleo, en suelos excavados, por medio de la biodegradación.<sup>46</sup> Esta tecnología consiste en amontonar el suelo contaminado formando montículos o celdas y estimulando la actividad microbiana aeróbica dentro del suelo por medio de la aireación y la adición de minerales y nutrientes. Esta actividad microbiana produce la degradación de los componentes del petróleo por medio de la respiración microbiana. En general, para las bioceldas se utiliza aireación forzada, ya sea por inyección o por extracción, mediante tubos perforados que cruzan la celda.

### **Aplicación**

Las bioceldas son efectivas para reducir la concentración de casi todas las sustancias presentes en los productos derivados del petróleo.

### **Diseño y operación de un sistema de bioceldas**

Las bioceldas se diseñan con el propósito de optimizar las condiciones para que las bacterias aeróbicas biodegraden los contaminantes orgánicos. Generalmente, su altura varía entre 1 y 3 metros. Se requiere un área adicional de tierra alrededor de las bioceldas para los taludes, las banquetas y los accesos. La longitud y el ancho de las bioceldas no tienen restricciones, excepto cuando la aireación se realiza por roturación manual, en cuyo caso no debería exceder los 2 a 2,5 metros de ancho, debido a que durante la vida útil de las Bioceldas, el suelo tiene que ser roturado para permitir que siga degradándose.

En general, las bioceldas se construyen en capas o pisos. Se coloca una capa de unos pocos pies de altura, luego se colocan las tuberías de aireación y, por último, se coloca la siguiente capa. Este proceso se repite hasta alcanzar la altura deseada.

Durante el mezclado del suelo deben adicionarse nutrientes (abono), correctores de suelo, materiales de relleno y sustancias químicas para ajustar el pH. Periódicamente debe también agregarse humedad al suelo, debido a que éste se seca, como resultado de la evaporación, la cual se incrementa durante las operaciones de aireación. Puede haber una excesiva acumulación de humedad dentro de las bioceldas en regiones con mucha precipitación, o con drenajes ineficientes.

Debido a que los constituyentes volátiles tienden a evaporarse y migrar desde las bioceldas al aire, durante la extracción o inyección, se necesita un sistema de captación o contención de vapores. Ésto puede realizarse cubriendo las bioceldas e instalando

tuberías de colección. Los vapores extraídos pueden reinyectarse para producir una biodegradación adicional o pueden adsorberse en carbón activado.

Las bioceldas se construyen sobre una capa de *liner* impermeable, para prevenir el lixiviado de contaminantes hacia el agua subterránea. Los lixiviados provenientes de las bioceldas se colectan para su tratamiento y disposición.

**Ventajas y desventajas de las bioceldas**

Ventajas	Desventajas
Relativamente simple de diseñar e implementar	Reducciones de la concentración > 95% y concentraciones de los constituyentes < 0.1 ppm son muy difíciles de lograr.
Tiempo de tratamiento corto: generalmente entre 6 meses y 2 años bajo condiciones óptimas.	Puede no ser muy efectivo para altas concentraciones de TPH (TPH > 50 000 ppm).
Costo competitivo: US \$30-90/ton de suelo contaminado.	Concentraciones altas (mayores a > 2 500 ppm) pueden inhibir el crecimiento microbiano.
Efectivo para eliminar contaminantes orgánicos con baja rapidez de biodegradación.	Los contaminantes volátiles tienden a evaporarse más que a biodegradarse durante el tratamiento.
Requiere menos tierra que la biodegradación.	Requiere una superficie para tratamiento grande, aunque menor que para la biodegradación.
Puede diseñarse como un sistema cerrado; la emisión de vapores puede ser controlada.	La generación de vapor durante la aireación puede necesitar tratamiento antes de la descarga.
Puede diseñarse para ser efectiva para cualquier combinación de condiciones del sitio a remediar y para cualquier hidrocarburo.	Puede requerirse un <i>liner</i> para contener los lixiviados de las bioceldas.

**6.2.1.1.2 Aireación o aspersión de aire**

La aireación es una tecnología de remediación *in situ* que reduce la concentración de hidrocarburos volátiles.<sup>47</sup> Esta tecnología, también conocida como volatilización *in situ*



*(stripping in situ)*, se basa en la inyección de aire libre de contaminantes a una zona sub-superficial saturada, mediante una transferencia de masa, desde un estado disuelto hacia una fase vapor. El aire es luego venteado a través de una zona no saturada.

La aireación generalmente se utiliza junto con una extracción de vapor del suelo (SVE por *Soil Vapour Extraction*), pero puede utilizarse junto con otras tecnologías de remediación. Cuando se utilizan estos dos sistemas combinados, el sistema SVE crea una presión negativa en la zona no saturada a través de una serie de pozos de extracción, con los que se controla la migración de la pluma de vapor.

### Aplicación

La aireación, correctamente utilizada, puede ser muy efectiva en la reducción de la concentración de VOCs de los hidrocarburos utilizados como combustible. Generalmente se aplica para los compuestos más ligeros que la gasolina (como benceno, etilbenceno, tolueno y xileno) porque se transfieren de una fase a otra muy rápidamente. Es menos aplicable al diesel y al queroseno.

El sistema de aspersión de aire puede usar tanto pozos verticales como horizontales. La orientación de los pozos debe adecuarse a las necesidades y condiciones específicas del lugar a remediar.

No debe usarse esta tecnología ante la presencia de alguna de las siguientes condiciones:

- **Productos libres presentes:** La difusión de aire puede generar una acumulación de agua subterránea, la que puede provocar la migración del producto, con la consiguiente diseminación de la contaminación.
- **Zapatatas, drenajes u otros espacios confinados sub-superficiales cerca del sitio:** Pueden alcanzarse concentraciones peligrosas de contaminantes en las zapatas,

a menos que se utilice algún sistema de extracción para controlar la migración de los vapores.

- Agua subterránea contaminada localizada en un acuífero confinado: La aireación no puede utilizarse para tratar agua subterránea de acuíferos confinados, porque el aire inyectado quedaría atrapado en la capa confinante y no podría migrar hacia zonas no saturadas.

### **Diseño y operación del sistema**

La efectividad de la aireación depende fundamentalmente de dos factores:

- ❖ La proporción de contaminantes en las fases vapor y líquido determina la concentración de equilibrio entre las dos fases. Este factor es muy importante para determinar la rapidez a la cual los contaminantes disueltos pasan a la fase vapor.
- ❖ La permeabilidad del suelo determina la velocidad a la cual el aire puede inyectarse en la zona saturada. Este factor también determina la rapidez de transferencia de masa de los contaminantes de una fase a otra.

En general, la aireación es más efectiva para los contaminantes más volátiles y de menor solubilidad, en combinación con los suelos más permeables. La rapidez de remoción de los contaminantes disminuye a medida que la aireación se lleva a cabo y se reduce la concentración de contaminantes disueltos.

Las características del suelo determinan las zonas de flujo de vapor y la facilidad con la que los vapores pueden ser controlados.

Los suelos estratificados o muy heterogéneos crean barreras para la difusión del aire. Tanto el aire inyectado como los vapores extraídos tienden a atravesar los caminos que

ofrecen menor resistencia (zonas de partículas medias y no aglomeradas) incluso desplazándose lateralmente a grandes distancias del punto de inyección. Este fenómeno puede ocasionar el esparcimiento de la contaminación, debido a la migración de vapores fuera del área de control de extracción de vapores.

Los objetivos principales durante el diseño de un sistema de difusión de aire son la configuración de los pozos y la ubicación de los puntos de monitoreo, a fin de:

- Optimizar la influencia de la pluma, maximizando la eficiencia de remoción del sistema.
- Localizar puntos de monitoreo y de extracción de vapor óptimos, con el objeto de asegurar una mínima migración de la pluma de vapor y de evitar las migraciones no detectadas, tanto de la pluma de fase disuelta como la de fase vapor.

La ubicación y la cantidad de puntos de difusión de aire requeridos para guiar la pluma de la fase disuelta están determinadas por la permeabilidad y la estructura del suelo, debido a que éstas afectan la presión de difusión y la distribución del aire en la zona saturada. Los suelos medianamente particulados (arena o grava) tienen una mayor permeabilidad intrínseca que los suelos de partículas finas (arcilla o limo) y el aire (o el agua) se desplaza con mayor facilidad a través de los suelos más permeables. La dispersión lateral del aire se produce con mayor frecuencia en los suelos de partículas finas.

**Ventajas y desventajas de la aireación**

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Disponibilidad de equipo; fácil instalación.	No puede utilizarse cuando hay presentes contaminantes libres (Deben removerse previo a la aireación)
Puede implementarse prácticamente sin perturbar las operaciones en el sitio.	No puede utilizarse para tratar acuíferos confinados.
Tiempo de tratamiento breve (generalmente toma entre 1 y 3 años para alcanzar las condiciones óptimas)	Los suelos estratificados pueden tornar inefectiva a la aireación.
Costo de US \$20-50/ton de suelo saturado. Es más económico que los tratamientos superficiales.	Algunas interacciones entre procesos químicos, físicos y biológicos complejos no se entienden totalmente.
El agua subterránea no necesita remoción, tratamiento, almacenamiento o descarga.	Se necesitan datos de campo y de laboratorio para el diseño.
Puede utilizarse junto con otros procesos de remoción.	Puede provocar la migración de los contaminantes.
	Requiere una prueba piloto detallada y monitoreos para asegurar controlar el vapor y limitar la migración.

**6.2.1.1.3 Biodegradación**

La biodegradación, también conocida como tratamiento en tierra o aplicación en tierra, es una tecnología de remediación superficial de suelos.<sup>48</sup> En esta tecnología se excavan los suelos contaminados y se extienden en finas capas sobre la superficie. Se estimula la actividad microbiana aeróbica dentro del suelo por medio de la aireación y/o la adición de minerales, nutrientes y humedad. Si los suelos contaminados son superficiales (poco profundos, menos de 90 cm de profundidad) es posible estimular la actividad microbiana sin excavarlos. Si la profundidad es mayor que 1,5 m, el suelo debe ser excavado y extendido sobre la superficie del terreno.

**Aplicación**

La biodegradación es efectiva para reducir la concentración de casi todos los hidrocarburos presentes en los combustibles más utilizados, desde la gasolina, con una

fracción de compuestos volátiles significativa, hasta aceites lubricantes prácticamente no volátiles. Los productos derivados del petróleo generalmente contienen más de cien compuestos diferentes, con un amplio intervalo de valores de volatilidad. En general, la gasolina, el queroseno y el diesel contienen compuestos lo suficientemente volátiles como para evaporarse, por lo que dependiendo de las reglamentaciones vigentes habría que controlar las emisiones de VOCs. Este control de las emisiones involucra la captura de vapores y el tratamiento apropiado de los mismos, antes de ser liberados a la atmósfera.

### **Diseño y operación del sistema**

La etapa de construcción incluye: preparación del sitio (deshierbe, limpieza y nivelación); tendido de banquetas; instalación del *liner* (si es necesario); sistemas de recolección y tratamiento de lixiviados; pretratamientos del suelo (trituration, mezclado y control de pH); e instalaciones de encapsulamiento y tratamiento del vapor.

Los métodos de ajuste del pH y el suministro de nutrientes generalmente incluyen la aplicación periódica de fertilizantes sólidos, cal y/o azufre, durante la trituración y mezcla del suelo, o la aplicación de nutrientes líquidos por aspersión. La composición de los nutrientes y de la solución ácida/alcalina para controlar el pH se desarrolla en los estudios de biotratabilidad y su frecuencia de incorporación se realiza de acuerdo a las necesidades, según se vea durante la operación.

Pudiera ser necesario controlar las emisiones a la atmósfera (cubiertas o estructuras de encapsulamiento) si el suelo contiene contaminantes volátiles. En general, las emisiones de VOCs se estiman de acuerdo a la concentración inicial de hidrocarburos presente. Se deben monitorear los vapores durante las fases iniciales de la biodegradación, a fin de cumplir las normas de emisiones a la atmósfera. Puede ser necesario especificar un tratamiento para el vapor que incluya los parámetros de operación y monitoreo.

Se necesita un monitoreo periódico para asegurar la optimización de la rapidez de biodegradación, a fin de encauzar la reducción de la concentración de los contaminantes y para monitorear las emisiones de vapor, la migración de contaminantes al suelo y vigilar constantemente la calidad del agua subterránea.

**Ventajas y desventajas de la biodegradación**

Ventajas	Desventajas
Relativamente simple de diseñar e implementar.	Reducción de la concentración mayor del 95% y concentración final de contaminantes menor a 0.1 ppm son difíciles de alcanzar.
Corto tiempo de tratamiento (generalmente entre 6 meses y 2 años en condiciones óptimas)	No es efectivo para altas concentraciones de contaminantes (50 000 ppm de TPH)
Costo competitivo: US \$30-60/ton de suelo contaminado.	Concentraciones altas de metales pesados (mayores a 2 500 ppm) pueden inhibir el crecimiento bacteriano.
Efectivo sobre compuestos orgánicos de baja rapidez de biodegradación.	Los compuestos volátiles tienden a evaporarse más que a biodegradarse durante el tratamiento.
	Se necesita un área muy grande para el tratamiento.
	La generación de polvo y vapor durante la aireación puede afectar la calidad del aire de los alrededores.
	Se podría necesitar un <i>liner</i> para la contención de lixiviados.

**6.2.1.1.4 Bioextracción**

La bioextracción es una tecnología *in situ* que utiliza microorganismos nativos para biodegradar los compuestos orgánicos en la zona saturada.<sup>49</sup> En la Bioextracción, el aire (u oxígeno) y los nutrientes (en caso de ser necesario) se inyectan a la zona saturada para incrementar la actividad biológica de los microorganismos nativos. La bioextracción puede utilizarse para reducir la concentración de hidrocarburos disueltos en el agua subterránea o adsorbidos en el suelo; pero para estos últimos, en general, es

más efectiva la bioventilación. La bioextracción se utiliza combinada con la extracción de vapor (SVE) o bioventilación cuando hay presencia de contaminantes volátiles. Cuando se combina la bioextracción con la SVE, el sistema de extracción de vapor genera una presión negativa en la zona, debido a la existencia de una serie de pozos de extracción que controlan la migración de la pluma.

### **Aplicación**

Cuando se la utiliza de manera apropiada, la bioextracción es efectiva en la reducción de hidrocarburos provenientes de tanques de almacenamiento. A menudo se utiliza esta tecnología en lugares contaminados con hidrocarburos de peso molecular medio como por ejemplo el diesel.

La bioextracción no debe utilizarse cuando exista alguna de las siguientes condiciones:

- **Presencia de productos libres:** La bioextracción puede generar una acumulación de agua subterránea y así provocar la migración del producto, con la consiguiente diseminación de la contaminación.
- **Zapatatas, drenajes u otros espacios confinados sub-superficiales cerca del sitio:** Pueden acumularse concentraciones peligrosas de contaminantes en las zapatas, a menos que se utilice algún sistema de extracción de vapor para controlar la migración de los vapores.
- **Agua subterránea contaminada localizada en un acuífero confinado:** Debido a que el aire inyectado quedaría atrapado en la capa confinante y no podría migrar hacia zonas no saturadas.

### **Diseño y operación del sistema**

El proceso de bioextracción es similar al de aireación; sin embargo, mientras la aireación remueve los contaminantes principalmente a través de la volatilización, la bioextracción promueve la degradación más que la volatilización (generalmente

utilizando flujos de aire menores que los utilizados en la aireación). En la práctica, tanto la bioextracción como la aireación utilizan ambos mecanismos.

La efectividad de la bioextracción depende principalmente de dos factores:

- ❖ La permeabilidad del suelo, que determina la velocidad a la cual el oxígeno puede suministrarse a los microorganismos que degradan los hidrocarburos en la zona sub-superficial.
- ❖ La biodegradabilidad de los hidrocarburos presentes, la que determina la rapidez y el grado al cual los hidrocarburos serán biodegradados por los microorganismos.

Para la bioextracción, las bacterias aeróbicas son las más importantes en el proceso de la biodegradación. La rapidez de biodegradación dependerá, en parte, del suministro de oxígeno al área contaminada, debido a que el metabolismo aeróbico es mucho más rápido que el anaeróbico. Cuando hay una cantidad insuficiente de oxígeno disuelto disponible, los organismos que requieren utilizar otro electrón aceptor, pueden degradar los contaminantes pero más lentamente.

Las metas esenciales del diseño del sistema de bioextracción y del sistema de aireación son la configuración de los pozos y los puntos de monitoreo, a fin de:

- ❖ Optimizar la influencia de la pluma, maximizando la eficiencia de remoción del sistema.
- ❖ Proveer un monitoreo y puntos de extracción de vapor óptimos para asegurar una mínima migración de la pluma de vapor y poder detectar la migración tanto de la fase disuelta como de la fase vapor. En algunas aplicaciones, como áreas muy grandes, o debajo de edificios y pavimento, los pozos de extracción de vapor horizontales son muy eficientes para controlar la migración del vapor.



La ubicación y el número de puntos de aspersión de aire necesarios para airear la fase disuelta se determina según la permeabilidad y la estructura del suelo. El radio de burbuja (análogo al radio de influencia de los sistemas de aireación) se define como la mayor distancia desde el pozo de aspersión a la cual la presión de aspersión y el flujo de aire pueden inducirse para biodegradar los contaminantes. El radio de burbuja determinará el número de los pozos y su espaciamiento. Este radio se determina en base a los resultados de pruebas piloto; depende de la heterogeneidad del suelo y de sus diferencias de permeabilidad, tanto en sentido vertical como horizontal. Generalmente, el radio de burbuja está en un intervalo comprendido entre 1,5 m, para suelos de partícula fina, y 30 m, para suelos de partícula gruesa.

Se pueden utilizar estudios de biodegradación en laboratorio, para estimar la rapidez de suministro de oxígeno y para determinar si es necesario agregar nutrientes inorgánicos, aunque los estudios de laboratorio no pueden reproducir con exactitud las condiciones de campo.

Debe realizarse una Prueba de Factibilidad de Bioextracción en Campo para determinar la efectividad de la bioextracción caracterizando:

- La rapidez de la biodegradación
- El radio de burbuja
- La posible pluma de migración

**Ventajas y desventajas de la bioextracción**

Ventajas	Desventajas
Tiene la misma efectividad que la aireación para una mayor cantidad de hidrocarburos de petróleo	Solo puede utilizarse en lugares donde la aireación sea adecuada (en suelos permeables y uniformes, acuíferos no confinados, sin hidrocarburos libres, lejos de espacios confinados, etc.)
Implementación con un mínimo de disturbios a las operaciones del sitio	Algunas interacciones entre los complejos procesos químicos, físicos y biológicos aún no se entienden claramente
Tiempo de tratamiento corto, 6 meses a 2 años, bajo condiciones óptimas	Falta de datos de campo y de laboratorio para apoyar las consideraciones de diseño
Costo competitivo	Posible inducción a la migración de contaminantes
Disponibilidad de equipos; fácil instalación	
La inyección de aire a baja velocidad minimiza la necesidad de captura y tratamiento del vapor	

**6.2.1.15 Bioventilación**

La bioventilación es una tecnología de remediación *in situ*, que utiliza microorganismos nativos para biodegradar los compuestos orgánicos adsorbidos por el suelo en la zona insaturada.<sup>50</sup> En la bioventilación la actividad de las bacterias se refuerza mediante la inducción de aire u oxígeno dentro de la zona insaturada y se agregan nutrientes cuando es necesario.

Cuando se utilizan pozos de extracción para la bioventilación, el proceso que se lleva a cabo es similar al utilizado en SVE; la diferencia está en que, mientras el SVE remueve los contaminantes principalmente a través de la volatilización, los sistemas de bioventilación facilitan la biodegradación de los contaminantes y minimizan la volatilización (generalmente mediante el uso de bajos caudales de aire). En la práctica, en ambos sistemas tienen lugar tanto la volatilización como la biodegradación.

### **Aplicación**

Pueden tratarse mediante la bioventilación todos los contaminantes degradables aeróbicamente, en particular las fugas de hidrocarburos como gasolina, queroseno y diesel. Ésta es una de las tecnologías más utilizadas para degradar hidrocarburos de peso molecular medio.

La bioventilación no es apropiada cuando la napa de agua subterránea (nivel hidrostático) se encuentra a menos de 1 m por debajo de la superficie. Cuando la napa se encuentra localizada entre 1 y 3 m de profundidad, deben tomarse consideraciones especiales, debido a que el agua subterránea puede penetrar a los pozos de bioventilación (o extracción), reduciendo o incluso eliminando el flujo de aire. Este problema se evita si en lugar de extraer el aire se inyecta aire a presión para inducir su flujo.

### **Diseño y operación de un sistema de bioventilación**

Para degradar grandes cantidades de hidrocarburos derivados del petróleo mediante la bioventilación, se necesita una población bacteriana substancial, la que a su vez necesita oxígeno, tanto para su proceso metabólico como para el crecimiento de la masa bacteriana. Se requieren de 1,3 a 1,6 Kg de oxígeno para degradar 0,5 Kg de hidrocarburos de petróleo.

La bioventilación difiere del sistema de SVE en un aspecto fundamental: el objetivo es inducir sólo el flujo de aire suficiente para ayudar a la biodegradación natural de los contaminantes, no para volatilizarlos. El flujo de aire puede inducirse mediante la inyección de aire atmosférico o por la extracción de aire del suelo. Debido a que se necesita un menor flujo de aire para bioventilar, existen menos posibilidades de que los contaminantes lleguen a áreas donde pudieran ocasionar problemas (como la

acumulación de vapor en las zapatas) y también es menor la posibilidad de necesitar algún tratamiento para el vapor extraído.

Los factores más importantes para controlar la efectividad de la bioventilación son:

- La permeabilidad del suelo contaminado: Ésta determinará el caudal de oxígeno que se deberá suministrar para que los microorganismos degradadores de hidrocarburos se localicen en la zona sub-superficial.
- La biodegradabilidad de los hidrocarburos presentes: Ésta determinará la rapidez y el grado con que los contaminantes serán metabolizados por los microorganismos.

La estructura y la estratificación del suelo son importantes para la bioventilación, debido a que afectan el modo y el lugar hacia donde fluirán los vapores cuando el aire sea extraído o inyectado. Las características estructurales, como la microfracturación, pueden ocasionar una mayor permeabilidad del suelo que la esperada, por lo que un suelo fracturado tendrá un incremento del flujo. La estratificación del suelo con capas de diferente permeabilidad puede incrementar desmesuradamente el flujo lateral de los vapores en los estratos más permeables, mientras que se reduce el flujo de vapor en las capas menos permeables. Este tipo de flujo puede llevar a tiempos de remediación demasiado prolongados, a que la remediación sea inefectiva en las capas menos permeables, o a una posible diseminación de la contaminación, en caso de utilizar pozos de inyección.

En general, las remediaciones basadas en procesos biológicos deben recurrir a pruebas piloto para verificar y cuantificar su efectividad y proveer los datos necesarios para diseñar el sistema.

El diseño del radio de influencia (RI) es una estimación de la máxima distancia desde el pozo de extracción (o inyección) a la cual puede inducirse un flujo de aire suficiente para aceptar una rapidez de degradación aceptable. Este RI depende de muchos

factores como la permeabilidad del suelo, la química del suelo, el contenido de humedad y el tiempo de remediación deseado. Generalmente se determina por medio de pruebas piloto en campo, pero también puede determinarse en forma empírica. El RI puede variar entre 1,5 m (para suelos de grano fino) y 30 m (para suelos de grano grueso). Para suelos de geología estratificada, el RI debe definirse para cada estrato, de manera de asegurar una adecuada aireación a las capas menos permeables. Este parámetro es muy importante para determinar la cantidad de pozos de extracción o inyección necesarios y el espaciamiento adecuado entre ellos.

El flujo de aire es muy importante para los suelos con efecto capilar, debido a que en los capilares se localiza una porción importante de los contaminantes. Los capilares suelen extenderse algunos metros sobre la napa de agua, por lo que este tipo de suelos puede tener un contenido de humedad demasiado alto para que la bioventilación sea efectiva. En estos casos, se deberá extraer el agua necesaria como para formar un cono de depresión en la napa de agua subterránea, de manera que pueda llevarse a cabo la bioventilación.

También deben considerarse las fluctuaciones del agua subterránea, debido a que fluctuaciones demasiado grandes pueden sumergir la zona contaminada, extendiendo la gravedad de la contaminación y dificultando, además, su remediación porque no habrá flujo de aire que alcance a la pluma en su totalidad.

El contenido de humedad ideal para este proceso está comprendido entre el 40 y el 85% de la capacidad de absorción de agua del suelo. Si se incrementa el flujo de aire, la bioventilación provoca la deshidratación de los suelos húmedos; una excesiva deshidratación disminuye la eficiencia del proceso, extendiendo el tiempo de operación.

### Ventajas y desventajas de la bioventilación

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Disponibilidad del equipamiento y facilidad de instalación	Altas concentraciones de contaminantes pueden ser tóxicas para los microorganismos
Crea mínimas molestias a las operaciones del lugar. Puede utilizarse para áreas inaccesibles (debajo de edificios)	No aplicable para ciertas condiciones (suelos de baja permeabilidad o con alto contenido de arcillas)
Requiere tiempo de tratamiento corto: entre 6 meses y 2 años en condiciones óptimas	No siempre se pueden alcanzar niveles de contaminación residual bajos
Costo competitivo: US \$45-140/ton de suelo contaminado	Sólo se puede tratar la zona insaturada del suelo; para la zona saturada es necesario otro método.
Fácilmente combinable con otras tecnologías (aireación y extracción de agua subterránea)	
No es necesario el tratamiento del gas extraído	

#### 6.2.1.1.6 Atenuación natural

La atenuación natural, también conocida como medidas correctivas intrínsecas, bioatenuación o biocorrección intrínseca o pasiva, aprovecha procesos naturales para degradar y disipar los compuestos derivados del petróleo del suelo y del agua subterránea.<sup>51</sup> Es un método de tratamiento *in situ* para contener la contaminación causada por derrames de productos químicos y reducir así la concentración y la cantidad de contaminantes en los lugares afectados.<sup>52</sup> Algunos de los procesos involucrados en la atenuación natural son: biodegradación aeróbica y anaeróbica, dispersión, volatilización y adsorción. En general, para los hidrocarburos derivados de petróleo, la biodegradación es el mecanismo más importante; es el único proceso natural que reduce la masa de contaminantes. La atenuación natural es una técnica no invasiva que permite usar productivamente el lugar mientras se realiza la limpieza. Puede ser menos costosa que otras opciones dirigidas para el tratamiento, especialmente las que se usan para el agua subterránea, y no requiere una fuente de energía ni equipo especial. Con frecuencia se utiliza como parte de la limpieza de un

sitio donde también se recurre al control o a la extracción de la fuente de contaminación.

Los procesos de atenuación natural a menudo se clasifican en destructivos y no destructivos. Los procesos destructivos destruyen al contaminante mientras que los procesos no destructivos reducen su concentración.

Estos procesos de atenuación natural pueden reducir la masa del contaminante (por medio de procesos destructivos, tales como la biodegradación y las transformaciones químicas), reducir su concentración (mediante dilución o dispersión) o unir los contaminantes a partículas de tierra, de manera que la contaminación no se propague o no se extienda demasiado (adsorción). Los procesos químicos son importantes para muchos compuestos (incluso para algunos aditivos para gasolina como el dibromuro de etileno); pero, prácticamente, sus efectos no tienen importancia sobre los combustibles.

La biodegradación hace uso de microorganismos naturales, aeróbicos o anaeróbicos, los cuales descomponen o degradan sustancias peligrosas transformándolas en sustancias menos tóxicas o incluso inocuas. La biodegradación anaeróbica es importante en el proceso de atenuación, debido a que cuando la rapidez de consumo de oxígeno para las funciones metabólicas de los microorganismos excede la capacidad de recuperación del mismo, se produce el agotamiento del oxígeno.

El centro de la pluma de contaminantes generalmente está en condiciones anaeróbicas, mientras que sólo en sus extremos las condiciones son aeróbicas. Si bien la rapidez de biodegradación anaeróbica es mucho menor que la aeróbica, el proceso anaeróbico domina la degradación de los hidrocarburos. Cuando se agota el oxígeno, la presencia de un electrón aceptor alternativo (ej.  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Fe(III)}$ ) y de un microorganismo capaz de utilizarlo, posibilitan la biodegradación anaeróbica. Una vez degradados los contaminantes, la población de microorganismos disminuye, porque ha agotado su fuente de alimentos. Los microorganismos muertos o una población pequeña de microorganismos sin alimentos no presentan riesgo de contaminación.

Cuando el suelo es relativamente poroso y permeable, el oxígeno requerido se recupera rápida y naturalmente desde la atmósfera, aunque si la permeabilidad es alta, puede haber migración de contaminantes. Cuando el suelo es poco poroso y relativamente impermeable se reduce la posibilidad de migración, pero el oxígeno no se recupera con rapidéz. Los materiales menos permeables, en general, contienen altos porcentajes de materia orgánica. Estas dos características favorecen la adsorción y retardan la migración de los contaminantes. En este caso, los contaminantes pueden permanecer casi sin degradarse cerca de la fuente.

En los casos de sitios no contaminados por petróleo, la acción es más difícil de prever y es eficaz en un porcentaje menor de sitios. Los solventes clorados se encuentran entre los contaminantes orgánicos más comunes del agua subterránea. Es importante hacer notar que cuando los compuestos clorados se biodegradan, la degradación deberá ser completa, porque algunos productos de la descomposición pueden ser aún más tóxicos que los compuestos originales.

Los efectos de dilución y dispersión parecen reducir la concentración del contaminante, pero no lo destruyen. Se puede infiltrar agua relativamente limpia desde la superficie y mezclarse con agua subterránea contaminada, diluyéndola. Puede también fluir agua subterránea limpia de un lugar en el subsuelo hacia zonas contaminadas; la dispersión de contaminantes que van alejándose del trayecto principal de la estela contaminada también lleva a una disminución de la concentración del contaminante en una zona determinada. Los hidrocarburos se dispersan en el suelo debido a la gravedad y a las fuerzas capilares (succión). Por otro lado, en el agua subterránea los hidrocarburos se dispersan por disolución en el caudal de agua subterránea, o por dispersión hidrodinámica, como resultado de mezcla mecánica y difusión molecular. La mezcla mecánica es el proceso dominante si el flujo de agua subterránea es relativamente alto. Si el flujo es bajo, el proceso dominante es entonces la difusión.



La volatilización remueve los contaminantes del agua subterránea, o del suelo, mediante su transferencia a la fase gaseosa. La volatilización produce, en general, una pérdida de masa entre 5 y 10%.

La adsorción se produce cuando los contaminantes se adhieren a partículas del subsuelo, es decir, son adsorbidos. Los hidrocarburos tienden a repeler el agua, igual que la mayoría de las sustancias oleosas, por lo que tienden a escaparse del agua subterránea adhiriéndose a la materia orgánica y minerales arcillosos que también repelen al agua. Esto es beneficioso porque puede retardar la migración de algunos hidrocarburos, prolongando el tiempo para la biodegradación. La adsorción, al igual que la dilución y la dispersión, parece reducir la concentración y la masa de contaminantes en el agua subterránea, pero no los destruye.

### Aplicación

En ciertas situaciones, la atenuación natural es una opción eficaz y económica para realizar una limpieza y la forma más apropiada de corregir algunos problemas de contaminación. A veces se dice erróneamente que la atenuación natural es el método de la inacción; sin embargo, es realmente un método activo centrado en la confirmación y la vigilancia de procesos de corrección naturales, en vez de depender totalmente de técnicas dirigidas.

Los hidrocarburos móviles y tóxicos, por ejemplo, son buenos candidatos para la atenuación natural. No sólo son difíciles de atrapar debido a su movilidad, sino que también se encuentran entre los contaminantes que más fácilmente se destruyen con la biodegradación. Sin embargo, cuando los hidrocarburos se encuentran en estado libre es necesario considerar otras alternativas.

La atenuación natural podría ser una opción aceptable para lugares donde se haya reducido la concentración de contaminantes, como resultado de la aplicación de otras

medidas correctivas. No es una opción apropiada para cualquier lugar debido a que los procesos naturales generalmente son lentos, se necesita una vigilancia a largo plazo para comprobar que la concentración de contaminantes disminuya continuamente y lo suficiente para que no se convierta en una amenaza para la salud. De no ser así, se debería considerar la posibilidad de aplicar medidas correctivas más enérgicas.

En ciertas circunstancias, puede considerarse que esta tecnología es una alternativa de remediación viable, aún si hubiese contaminación del agua subterránea, especialmente cuando no se la utilizará para potabilizar a causa de características tales como alta salinidad o por previa contaminación química o biológica y si, además, no se tiene previsto utilizarla como fuente de agua en un futuro inmediato.

Como la eficacia de la atenuación natural depende de diversas condiciones, es necesario caracterizar bien el sitio, a fin de determinar si ya se están llevando a cabo o se producirán los procesos característicos de la atenuación natural.

Los suelos con gran contenido de materia orgánica, como las zonas pantanosas o antiguos pantanos, con frecuencia son aptos para esta alternativa. Ciertas formaciones geológicas, como los acuíferos de lecho rocoso fracturado o zonas con calizas, son menos apropiadas para la atenuación natural porque en estos entornos a menudo hay suelos muy diversos que ocasionan un flujo imprevisible del agua subterránea y dificultan predecir el movimiento de los contaminantes.

### **Diseño y operación de un sistema de atenuación natural**

Para evaluar la efectividad de la atenuación natural se debe realizar un estudio detallado a fin de obtener datos sobre las condiciones del sitio y de los contaminantes presentes. Las condiciones del lugar deben monitorearse para confirmar si los contaminantes están siendo degradados o no y, además, a qué velocidad.

A través de un balance de masas de los contaminantes se puede conocer la extensión y la rapidez de degradación de la atenuación natural. Para esto se necesita un monitoreo extensivo que defina la extensión de la pluma, tanto horizontal como vertical. Además se necesitan otros indicadores como:

- **Características de la pluma de contaminantes:** En ausencia de mecanismos de atenuación la concentración de contaminantes permanecerá constante dentro de la pluma y decrecerá rápidamente al final de la misma. Si la atenuación se está llevando a cabo correctamente, la concentración de los contaminantes decrecerá con la distancia de la fuente y a lo largo de toda la pluma, como resultado de la dispersión. Si simultáneamente existe otro mecanismo de atenuación, se acelerará la reducción de la concentración de los contaminantes.
- **Indicadores de oxígeno disuelto:** La rapidez de biodegradación dependerá en parte del suministro de oxígeno. A niveles de OD inferiores a 1-2 mg/L en el agua subterránea, la rapidez de biodegradación es muy baja. Durante la biodegradación aeróbica hay una relación inversa entre la concentración de OD y la concentración esperada de contaminantes.
- **Indicadores geoquímicos:** Algunas características geoquímicas pueden servir como indicadores de la atenuación natural. La biodegradación aeróbica de hidrocarburos produce dióxido de carbono y ácidos orgánicos; ambos productos tienden a bajar el pH en la región y a aumentar la alcalinidad de los componentes de la pluma, en clara manifestación de condiciones oxidantes. La biodegradación anaeróbica aumenta el pH, reduce el Fe(III) a Fe(II) aumentando la concentración de hierro soluble y también aumenta la concentración de metano, característico de la biodegradación en un medio reductor.
- **Potencial Redox Eh:** Es una medida de la actividad electrónica y un indicador relativo de la tendencia de una solución a aceptar o transferir electrones, la cual

resulta del equilibrio entre todas las especies iónicas presentes en sus diversos estados de oxidación. Muchos procesos biológicos operan sólo dentro de un intervalo de este potencial. El Eh puede ser utilizado como indicador geoquímico de ciertas reacciones como la reducción de sulfatos, nitratos o hierro. Un potencial redox bajo, entre -100 y 50 mV, es un indicador de condiciones anaeróbicas o reductivas. Muchos procesos naturales de biodegradación en la superficie del planeta ocurren con valores de Eh entre 100 y 500 mV, indicando condiciones aeróbicas y oxidantes. El potencial redox del área contaminada será mayor que el valor de fondo fuera de la pluma.

**Ventajas y desventajas de la atenuación natural**

Ventajas	Desventajas
Menor costo que las demás alternativas de remediación	No es efectivo cuando la concentración de hidrocarburos es alta (mayor a 20 000 - 25 000 ppm de TPH)
Mínimas molestias en el lugar de operaciones	No es adecuado bajo ciertas condiciones del lugar (suministros de agua, presencia de producto libre)
	Puede migrar parte de los contaminantes; no es adecuado cuando puede afectarse un cuerpo receptor de agua
	Tiempo de remediación prolongado, especialmente para hidrocarburos pesados
	No siempre se alcanzan los niveles de remediación deseados dentro de un tiempo razonable

**6.2.1.2 Remediaciones físico - químicas**

Las remediaciones físico-químicas se basan en las propiedades físicas y químicas de los contaminantes, como la volatilización o evaporación por efecto de la temperatura para separarlos del suelo, la desorción de los compuestos volatilizados, la combustión retardada y la oxidación catalítica para destruir los constituyentes orgánicos y la condensación y adsorción para atraparlos y darles un tratamiento posterior.

#### **6.2.1.2.1 Desorción térmica a baja temperatura**

La desorción térmica a baja temperatura (LTTD), también conocida como volatilización térmica a baja temperatura, *stripping* térmico o cocción de suelos, es una tecnología de remediación exterior que utiliza el calor para separar físicamente los hidrocarburos del suelo excavado.<sup>53</sup>

Se diseñan desorbedores térmicos para calentar el suelo a una temperatura lo suficientemente alta para provocar la volatilización de los contaminantes y desorberlos del suelo. A pesar de que no son diseñados para descomponer los compuestos orgánicos, la desorción térmica puede causar la descomposición parcial o total de los mismos, dependiendo de los compuestos presentes. Los hidrocarburos vaporizados generalmente son tratados en una unidad de tratamiento secundaria (equipo de combustión retardada, chimenea de oxidación catalítica, condensador o unidad de adsorción de carbón activado) antes de descargarlos a la atmósfera.

Para utilizar esta tecnología de remediación se necesitan algunos procesos previos y otros posteriores. El suelo excavado se tamiza para remover los objetos mayores que 5 cm de diámetro, los que se muelen y se reingresan a la alimentación. Después de la desorción, el suelo se enfría, se le agrega agua para controlar el polvo y se lo estabiliza, en caso de ser necesario, con el objeto de prepararlo para su disposición o reuso. El suelo tratado puede volver a depositarse en el lugar o usarse como cubierta en rellenos sanitarios.

### **Aplicación**

La desorción térmica a baja temperatura es muy efectiva en la reducción de hidrocarburos derivados del petróleo, como gasolina, queroseno, diesel y lubricantes. Se puede utilizar para compuestos volátiles, a temperaturas tan altas como 650 °C. La mayoría de los desorbedores operan a temperaturas entre 150°C y 550°C. Los desorbedores que pueden operar hasta 650°C se construyen de aleaciones especiales. Los productos más volátiles, como la gasolina, pueden desorberse a temperaturas más bajas; mientras que los semivolátiles, como el queroseno y el diesel, generalmente necesitan temperaturas superiores a los 370°C; los productos relativamente no volátiles, como los aceites lubricantes, deben operar a temperaturas aún mayores.

Esencialmente, todas las clases de suelo pueden ser tratadas por el sistema LTTD, pero dependiendo de la clase de suelo puede variar el grado y el tipo de pretratamiento. Por ejemplo, un suelo de gravas y cantos rodados puede necesitar una molienda; los suelos finamente graneados y cohesivos, como la arcilla, pueden necesitar una trituración.

Antes de iniciar la remediación debe realizarse una prueba piloto de la efectividad de este tratamiento, con muestras del suelo a remediar. A esta prueba se le llama "prueba de quemado". Los resultados de la prueba con muestras de suelo identifican las propiedades relevantes de los contaminantes, mientras que el examen del desempeño de las máquinas indica cuán efectivo es este sistema para tratar el suelo. Es importante asegurar que el suelo examinado sea representativo de las condiciones promedio y que se analicen suficientes muestras, antes y después del tratamiento, como para asegurar que el sistema LTTD será efectivo.

La decisión acerca de si los sistemas de LTTD son una alternativa de remediación práctica, depende, fundamentalmente, de las características específicas del sitio en estudio, como su ubicación, el volumen de suelo contaminado y el plano del lugar. Los

factores económicos a evaluar en los sistemas LTTD dependen del lugar específico y, entre los más importantes, se encuentran: uso del suelo, costo de LTTD por unidad de volumen de suelo relativo a otras opciones de remediación y ubicación del sistema de LTTD más cercano.

### Diseño y operación de un sistema de desorción térmica

El término “desorbedor térmico” describe una operación unitaria consistente en el calentamiento de los suelos contaminados con hidrocarburos, seguido de la desorción de esos materiales orgánicos arrastrados en un gas de purga. El diseño mecánico y las condiciones de operación varían considerablemente, dependiendo del sistema de LTTD. Hay cuatro clases de unidades de desorción o desorbedores disponibles en el mercado:

- ❖ Secadores o desorbedores rotativos
- ❖ Tornillos térmicos
- ❖ Plantas de asfalto con agregado seco
- ❖ Hornos convectivos.

Si bien todos estos sistemas utilizan calor para separar o desorber a los contaminantes orgánicos del suelo, cada sistema opera de una manera diferente y tiene sus propias ventajas y desventajas. La decisión de utilizar un sistema u otro depende de la naturaleza de los contaminantes, de la maquinaria disponible, del desempeño del sistema y de consideraciones económicas.

Los sistemas de desorción térmica pueden ser de dos clases: instalaciones fijas y unidades móviles. Los suelos contaminados son excavados y transportados a las instalaciones fijas; las unidades móviles pueden operarse *in situ*. Hay distintos tipos de

unidades de desorción disponibles en el mercado, como desorbedores rotativos, tornillos térmicos y hornos convectivos.

El tipo de suelo en que se hallan los contaminantes es un factor muy importante que influye en la selección del equipo desorbedor y de los pretratamientos necesarios. La plasticidad es una de las propiedades que se utilizan para definir el tipo de un suelo dado. La plasticidad del suelo es una medida de su habilidad para deformarse sin aplicarle un esfuerzo cortante y es, en parte, función de su contenido de agua. Los suelos plásticos tienden a pegarse en los equipos y a formar coágulos. Además, si se disminuye levemente la velocidad de alimentación, estos suelos son difíciles de tratar. El calentamiento de los suelos plásticos requiere de altas temperaturas, debido a su baja relación área superficial /volumen y su alto contenido de humedad. Debido a que los suelos plásticos tienden a ser muy finamente particulados, los compuestos orgánicos tienden a estar muy adsorbidos. El tratamiento térmico de los suelos altamente plásticos requiere pretratamientos tales como trituración o mezcla con otros suelos más fáciles de tratar u otros aditivos, como yeso.

El material cuyo tamaño de partícula sea mayor que 5 cm de diámetro debe ser molido o removido. El material molido se recircula en la alimentación para ser procesado. Los suelos de granos grandes tienden a fluir más libremente y a no formar flóculos; generalmente no retienen excesiva humedad y por ello los contaminantes son fácilmente desorbidos. Los suelos de granos más finos, que retienen más humedad y forman flóculos, una vez secos pueden contener grandes cantidades de partículas que deberán ser recirculadas.

La capacidad de proceso de sólidos de un sistema de desorción térmica es inversamente proporcional al contenido de humedad del material alimentado. La presencia de humedad en los suelos excavados determinará el tiempo de residencia necesario en la unidad LTTD y las necesidades de calor para una efectiva remoción de los contaminantes. La mayor parte de la humedad del suelo deberá evaporarse en el desorbedor a fin de que se lleve a cabo apropiadamente la desorción de los



hidrocarburos. Este proceso puede necesitar una gran cantidad de energía térmica adicional y un excesivo tiempo de residencia del suelo en el desorbedor. El contenido de humedad también influye en la plasticidad, la que afecta el manejo del suelo como ya se explicó arriba. Los suelos con excesivo contenido de humedad (mayor al 20%) deben ser presecados. Los métodos de presecado típicos son con aire seco (si hay capacidad de almacenamiento suficiente), mezclado con suelos secos ó presecado mecánico.

La presencia de metales en el suelo puede tener dos consecuencias: 1) limitaciones en la disposición de los residuos sólidos generados por desorción y 2) un necesario mayor control de las emisiones aéreas debido a la emisión de metales. A temperaturas de operación normales los metales pesados no se separan del suelo en grandes cantidades.

Las concentraciones altas de hidrocarburos en el suelo pueden liberar gran cantidad de calor. La liberación de calor del suelo puede ocasionar el sobrecalentamiento y daño del desorbedor. Los suelos que liberan más de 225kcal/kg deben mezclarse con suelos limpios, para diluir la gran cantidad de hidrocarburos. Altas concentraciones de hidrocarburos en el gas pueden exceder la capacidad térmica del equipo de combustión retardada, por lo que podrían liberarse a la atmósfera vapores sin tratar. Por otra parte, una excesiva cantidad de hidrocarburos en el suelo podría generar vapores en el desorbedor, en concentraciones superiores al límite inferior de explosividad, por lo que podría provocarse una explosión dentro del desorbedor.

**Ventajas y desventajas de la desorción térmica a baja temperatura**

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Disponibilidad de equipos tanto para tratamiento <i>in situ</i> como externo	Debe excavarse el suelo; generalmente está limitado a profundidades máximas de excavación de 7,6 m
Tiempo de tratamiento muy rápido; la mayoría de los sistemas comerciales tienen capacidades superiores a 25 ton/hora	El tratamiento <i>in situ</i> requiere una gran área para ubicar la unidad de LTTD y almacenar el suelo en proceso
Costo competitivo para grandes volúmenes de suelo (mayores a 750 m <sup>3</sup> ): US \$30-70/ton de suelo contaminado, excluyendo los costos de excavación y transporte	El tratamiento externo tiene un alto costo en transporte
Puede utilizarse para remediar áreas con muy altas concentraciones de hidrocarburos	Los suelos excavados debajo de la napa de agua deben ser presecados antes de su tratamiento debido a su alto contenido de humedad
Fácilmente combinable con otras tecnologías como la aireación	
El suelo tratado puede volver a depositarse en el sitio o puede utilizarse como cubierta en rellenos sanitarios	
Puede reducir la concentración de TPH a valores de 10 ppm, incluso a veces pueden llegar a ser menores	

**6.2.1.2.2 Extracción de vapor de suelos**

La extracción de vapor de suelos (SVE) es un proceso relativamente sencillo que separa físicamente los contaminantes del suelo.<sup>54</sup> Como su nombre lo indica, consiste en la extracción de contaminantes del suelo, en forma de vapor, por lo que sólo sirven para retirar contaminantes que tienden a volatilizarse o a evaporarse con facilidad. Con esta técnica se extraen compuestos orgánicos volátiles y algunos compuestos orgánicos semivolátiles de la zona no saturada del subsuelo que se halla arriba de la napa freática. Por medio de un sistema de pozos subterráneos se crea un vacío y los contaminantes

ascienden a la superficie en forma de vapor o gas. A menudo; además de los pozos de extracción, se instalan pozos de inyección de aire para aumentar la corriente de aire y mejorar la rapidez de remoción del contaminante. Otra ventaja de la introducción de aire en el suelo es que puede estimular la biodegradación de algunos contaminantes.

La extracción de vapores del suelo se conoce también como volatilización *in situ*, volatilización mejorada, aireación del suelo *in situ*, aireación forzada del suelo, remoción *in situ* por chorro de aire o extracción al vacío.

### Aplicación

Esta tecnología es efectiva en la reducción de la concentración de VOCs y de algunos SVOCs presentes en los hidrocarburos derivados de petróleo. Es más eficiente cuando se aplica a hidrocarburos livianos, como la gasolina. El diesel y el queroseno, que son menos volátiles, no son bien removidos mediante esta tecnología, por lo que es más conveniente utilizar la bioventilación. La inyección de aire caliente se puede utilizar para volatilizar los productos más pesados debido a que la presión de vapor generalmente aumenta con la temperatura, pero esta opción incrementa los costos de energía.

Los sistemas de SVE no son adecuados cuando la napa de agua subterránea se encuentra a menos de 1 m de profundidad; se deben tener consideraciones especiales si la napa se halla entre 1 y 3 m de profundidad.

La extracción de vapores del suelo es muy eficaz para retirar compuestos orgánicos volátiles de la zona no saturada. Con la adición de un sistema de aspersión de aire, se pueden retirar también contaminantes de la zona saturada. Para ninguna de las dos técnicas se necesita excavar el suelo contaminado (es mejor evitar la excavación porque es costosa, levanta polvo y permite que salgan a la atmósfera contaminantes volátiles sin tratar) Los vapores extraídos generalmente necesitan un tratamiento, pero el costo del tratamiento de los vapores y líquidos extraídos es bajo, en comparación con el costo

de las técnicas que requieren excavación. El equipo es relativamente fácil de instalar, se puede usar eficazmente en combinación con otras técnicas de tratamiento y es eficaz para sitios con diferentes condiciones.

La extracción de vapores del suelo y la aspersión de aire pueden ser buenas opciones para lugares contaminados con solventes, otros compuestos orgánicos volátiles (como el tricloroetano, el tricloroetileno, el benceno, el tolueno, el etilbenceno y el xileno) y combustibles. Como las propiedades del suelo tienen un efecto muy importante en el movimiento de los vapores, la eficacia y el diseño de sistemas de extracción de vapores y aspersión de aire dependen en gran medida de las propiedades del suelo. La extracción de vapores del suelo da mejor resultado en suelos flojos no saturados, como arena, grava y limo grueso o lecho de roca fracturado. Sin embargo, se ha usado en suelos más densos, aunque el tratamiento lleva más tiempo. Además, cuanto más humedad contenga el suelo, más lenta será la extracción.

### **Diseño y operación del sistema**

En esta tecnología se aplica vacío al suelo por medio de pozos de extracción, los que crean una presión negativa que origina el movimiento del vapor hacia estos pozos. Los contaminantes volátiles en fase vapor se remueven fácilmente del suelo sub-superficial a través de pozos de extracción. Los vapores extraídos se tratan (en caso de ser necesario) y se descargan a la atmósfera.

Algunos de los factores que determinan la eficiencia de SVE son:

- Permeabilidad del suelo
- Estructura y estratificación del suelo
- Humedad del suelo
- Profundidad del agua subterránea