



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrado

**EVALUACIÓN DE COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES, EN LA FABRICACIÓN
DE MUEBLES DE MADERA EN EL MUNICIPIO DE SAN JUAN SACATEPÉQUEZ**

Ing. José Antonio Rosal Chicas
Asesorado por Msc. Nicolás Guzmán

Guatemala, noviembre de 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DE COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES, EN LA FABRICACIÓN
DE MUEBLES DE MADERA EN EL MUNICIPIO DE SAN JUAN SACATEPÉQUEZ**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ING. JOSÉ ANTONIO ROSAL CHICAS
ASESORADO POR EL MSC. NICOLÁS GUZMÁN

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRO EN ENERGÍA Y AMBIENTE

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Juan Carlos Molina Jiménez
VOCAL V	Br. Mario Maldonado Muralles
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADORA	Dra. Mayra Virginia Castillo Montes
EXAMINADOR	Msc. Juan Carlos Fuentes Montepeque
EXAMINADOR	Msc. Renato Giovanni Ponciano Sandoval
SECRETARIO	Msc. Juan Carlos Fuentes Montepeque

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

EVALUACIÓN DE COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES, EN LA FABRICACIÓN DE MUEBLES DE MADERA EN EL MUNICIPIO DE SAN JUAN SACATEPÉQUEZ

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 20 de septiembre de 2012.

Ing. Jose Antonio Rosal Chicas

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por darme la fuerza para continuar.
La Virgen María	Por su protección y compañía.
Mi esposa	Kleydi de León. Por apoyarme en todo momento y ser mi eterno amor.
Mi hijo	Diego. Porque tu presencia me inspira.
Mi madre	María Elena Chicas. Por tu voz de aliento y cariño incondicional.
Mi padre	José Rosal Mérida. Por tu constante apoyo.
Mi hermana	Iris Rosal. Porque somos capaces de muchas cosas.
A mis compañeros	Gracias por su amistad.

AGRADECIMIENTOS A:

**La Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por su visión hacia las ciencias y el desarrollo.

**Escuela de Estudios de
Postgrados**

Por su constante ayuda y asesoría.

**Laboratorio de
Monitoreo del Aire de la
Escuela de Química de
la Facultad de Ciencias
Químicas y Farmacia**

En especial al Licenciado Jhoni Frank Álvarez
Castañeda, por su asesoría y apoyo.

**Fabricantes de muebles
de San Juan
Sacatepéquez**

Por su colaboración y apertura para la
realización de este estudio.

Mi asesor

Nicolás Guzmán. Por su tiempo y dedicación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS.....	IX
GLOSARIO.....	XI
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
HIPÓTESIS.....	XIX
INTRODUCCIÓN.....	XXI
ANTECEDENTES.....	XXIII
DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	XXV
JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	XXVII
ALCANCES Y LÍMITES.....	XXIX
1. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL.....	1
1.1. Definición de compuestos orgánicos volátiles.....	1
1.1.1. Presión de vapor.....	1
1.1.2. COV totales.....	8
1.2. COV en la industria de fabricación de muebles.....	9
1.2.1. Proceso de acabado final.....	11
1.2.1.1. Métodos de aplicación de acabados.....	15
1.2.2. Materiales de acabado final.....	14
1.2.3. Fuentes de emisión de COV.....	18
1.2.4. Sumario de emisiones de COV.....	21
1.2.5. Regulaciones en Estados Unidos.....	22
1.3. Efectos en la salud por COV.....	24

1.3.1.	Directrices para COV en ambientes cerrados.	25
1.3.2.	Efectos en la salud de los COV	26
1.4.	Impacto ambiental de los COV.....	28
1.4.1.	Ozono troposférico.....	30
1.4.2.	Efectos ambientales del ozono troposférico...	32
1.4.3.	Posibilidades de control.....	34
1.5.	Adsorción de COV.....	35
1.5.1.	Sistemas de adsorción.....	35
1.5.2.	Importancia de los sistemas de adsorción....	37
1.5.3.	¿Cómo funciona la adsorción?.....	38
1.5.4.	Adsorción de los contaminantes.....	39
1.5.5.	¿Qué es la desorción?.....	40
1.5.6.	Isoterma de adsorción.....	41
1.5.7.	Selección del adsorbente.....	42
1.5.8.	Zona de transferencia de masa.....	45
1.5.9.	Capacidad de trabajo.....	48
2.	MÉTODOS Y TÉCNICAS.....	51
2.1.	Metodología.....	51
2.1.1.	Tipo de estudio.....	51
2.1.2.	Variables.....	51
2.1.3.	Muestreo.....	52
2.2.	Técnicas.....	57
2.2.1.	Reactivos y productos.....	58
2.2.2.	Aparatos y material.....	59
2.2.3.	Proceso del experimento.....	63
3.	RESULTADOS.....	69
3.1.	Resultados de cromatografía.....	69

3.2.	Cálculos.....	80
3.2.1.	Determinación de la cantidad de analito presente en la muestra.....	80
3.2.2.	Determinación de la concentración de analito en el aire.....	81
3.3.	Discusión de resultados.....	82
	CONCLUSIONES.....	87
	RECOMENDACIONES.....	89
	BIBLIOGRAFÍA.....	91
	ANEXOS.....	95

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Presiones de vapor de 27 compuestos.....	3
2.	Fábrica de muebles.....	53
3.	Ubicación de la fábrica de muebles.....	54
4.	Taller de barnizado.....	55
5.	Taller de barnizado y toma de las muestras “A”.....	55
6.	Toma de muestras “B”, en taller de carpintería.....	56
7.	Toma de muestras “C”, en oficinas administrativas.....	57
8.	Sulfuro de Carbono utilizado como desorbente.....	58
9.	Bomba de muestreo SKC, modelo PCXR8.....	59
10.	Pesado de carbón en balanza analítica.....	60
11.	Tubo de muestreo.....	61
12.	Cromatógrafo utilizado para el análisis químico.....	62
13.	Empaque de la columna utilizada para la cromatografía.....	63
14.	Tubos con muestras de carbón disueltas en sulfuro de carbono... ..	65
15.	Gráfico de composición según cromatografía de la muestra A1....	69
16.	Gráfico de composición según cromatografía de la muestra A2....	70
17.	Gráfico de composición según cromatografía de la muestra A3....	71
18.	Gráfico de composición según cromatografía de la muestra A3-1.	72
19.	Gráfico de composición según cromatografía de la muestra B1....	73
20.	Gráfico de composición según cromatografía de la muestra B2....	74
21.	Gráfico de composición según cromatografía de la muestra B3....	75
22.	Gráfico de composición según cromatografía de la muestra C1....	76
23.	Gráfico de composición según cromatografía de la muestra C2....	77

24.	Gráfico de composición según cromatografía de la muestra C3....	78
-----	---	----

TABLAS

I.	Comportamiento de los líquidos volátiles como función de su presión de vapor p y la presión atmosférica (P_{atm}).....	5
II.	Acabados usados en la industria de muebles de madera.....	15
III.	Uso de solventes en la industria de muebles de madera.....	22
IV.	Contenido límite de COV en acabados para muebles de madera	23
V.	Resultados de la composición según cromatografía de la muestra A1.....	70
VI.	Resultados de la composición según cromatografía de la muestra A2.....	71
VII.	Resultados de la composición según cromatografía de la muestra A3.....	72
VIII.	Resultados de la composición según cromatografía de la muestra A3-1.....	73
IX.	Resultados de la composición según cromatografía de la muestra B1.....	74
X.	Resultados de la composición según cromatografía de la muestra B2.....	75
XI.	Resultados de la composición según cromatografía de la muestra B3.....	76
XII.	Resultados de la composición según cromatografía de la muestra C1.....	77
XIII.	Resultados de la composición según cromatografía de la muestra C2.....	78

XIV.	Resultados de la composición según cromatografía de la muestra C3.....	79
XV.	Resumen de resultados de cromatografía.....	79
XVI.	Resultados de cálculos.....	82

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
cm	Centímetros
°C	Grados centígrados
°F	Grados Fahrenheit
KPa	Kilopascales
Lb/gal	Libras por galón
Psia	Libras por pulgada cuadrada absoluta
m³	Metros cúbicos
µg/m³	Microgramos por metro cúbico
mg/m³	Miligramos por metro cúbico
mm	Milímetros
min	Minutos
ng	Nanogramos
ppm	Partes por millón
%	Porcentaje

GLOSARIO

Adelgazador	Mezcla de solventes utilizado para diluir los acabados, para su mejor manejo.
Adsorbente	Es un sólido que tiene la capacidad de retener sobre su superficie un componente presente en corrientes líquidas o gaseosas.
Adsorción	Es un proceso por el cual átomos, iones o moléculas son atrapados o retenidos en otro material.
Analito	Es un término utilizado sobre todo en la química analítica, donde hace referencia a una sustancia, que posee un interés en una muestra, pues es la parte que se desea analizar. Dicha especie química, puede conocerse y ser cuantificada, al pasar a determinar su cantidad en la muestra, además de su concentración, en un proceso químico determinado, como suelen ser las valoraciones químicas, siguiendo una particular forma de medida química.
Carbón activado	Es un término genérico que describe una familia de adsorbentes altamente cristalinos y una estructura poral interna extensivamente desarrollada.
COV	Compuesto orgánico volátil.

Cromatografía de gases	Es una técnica cromatográfica en la que la muestra se volatiliza y se inyecta en la cabeza de una columna.
Desorción	Es lo contrario a la adsorción; es decir la eliminación de materia desde un medio adsorbente, usualmente para recuperar material.
EPA	Agencia de Protección Ambiental de Los Estados Unidos.
HAP	Hidrocarburos aromáticos policíclicos.
In vitro	Se refiere a una técnica para realizar un determinado experimento en un tubo de ensayo.
In vivo	Se refiere a experimentación hecha dentro o en el tejido vivo de un organismo vivo, por oposición a uno parcial o muerto.
Laca	Recubrimiento para madera (mayormente basado en nitrocelulosa).
LIE	Límite inferior de explosividad.
MDF	Tableros de fibra de densidad media (por sus siglas en inglés).
SEE	Síndrome del edificio enfermo.

**Síndrome del
edificio enfermo**

La Organización Mundial de la Salud lo ha definido como un conjunto de enfermedades originadas o estimuladas por la contaminación del aire en estos espacios cerrados.

Thinner

Adelgazador.

ZTM

Zona de transferencia de masa.

RESUMEN

En Guatemala existe una creciente industria de fabricación de muebles de madera, donde la cantidad de trabajadores es también grande. Estas operaciones demandan el uso de recubrimientos a base de solventes, los cuales son emisores de compuestos orgánicos volátiles. A pesar de esto, no existe un antecedente de medición de contaminación del aire por compuestos orgánicos volátiles; no existe una legislación para este tipo de compuestos en productos industriales, tales como lacas, selladores, pinturas, etcétera. Tampoco existe una legislación laboral respecto de la exposición de los trabajadores a estos compuestos.

En el presente trabajo de investigación se realizó la medición de las emisiones de compuestos orgánicos volátiles en una fábrica de muebles; para este fin se elaboraron dispositivos de muestreo, con carbón activado para acoplar a un equipo de muestreo del aire, para luego utilizar el método de adsorción/desorción y posterior análisis cromatográfico, para la identificación y cuantificación de las emisiones de COV.

La fábrica de muebles donde se realizó el estudio se encuentra en el municipio de San Juan Sacatepéquez, dentro del casco urbano, aledaño a viviendas y al cementerio de la localidad. Se dedican a hacer muebles finos de maderas como palo blanco, cedro y caoba.

Esta fábrica representa un ejemplo de los fabricantes de la región, donde se encuentran más de 250 mueblerías.

La cantidad de COV para los niveles de producción de esta fábrica, que se encontró se mantiene aún por debajo de los máximos exigidos internacionalmente, lo que da una muestra de las emisiones de la industria en San Juan Sacatepéquez. Sin embargo estas emisiones son constantes en el transcurso del día, lo que las vuelve peligrosas porque son bioacumulativas y a largo plazo pueden tener repercusiones en la salud de los trabajadores.

Se pudo encontrar dos compuestos principales que son la acetona y el isopentano; el primero es componente esencial de los recubrimientos para madera y el segundo es producto de la descomposición de los solventes utilizados para mismo fin. Esta presencia de COV no se limitó a las áreas de aplicación de recubrimientos, sino que estaban presentes en otras áreas de trabajo de la fabricación e inclusive en las oficinas administrativas.

OBJETIVOS

General

Evaluar la presencia de compuestos orgánicos volátiles totales (COV) en el aire del área de trabajo de una industria de muebles en San Juan Sacatepéquez.

Específicos

1. Establecer los puntos dentro de la fábrica donde hay presencia de COV.
2. Determinar la concentración de COV en el aire, mediante la toma de muestras y posterior análisis cromatográfico.
3. Comparar los valores en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de COV presentes en el aire, con los máximos permisibles establecidos en normativas internacionales.
4. Analizar si los niveles de COV detectados, representan riesgos para la salud de los trabajadores.

HIPÓTESIS

De investigación:

“La cantidad de compuestos orgánicos volátiles totales presentes en el aire del área de trabajo de una industria de muebles en San Juan Sacatepéquez, es mayor a los máximos establecidos en normas internacionales”.

Alternativa:

“La cantidad de compuestos orgánicos volátiles totales presentes en el aire del área de trabajo de una industria de muebles en San Juan Sacatepéquez, es menor a los máximos establecidos en normas internacionales”.

INTRODUCCIÓN

En el primer capítulo se expone la base teórica del estudio, comenzando con la definición de compuestos orgánicos volátiles, los cuales son líquidos o sólidos que contienen carbono orgánico, que se vaporizan a razones significativas; esto es porque tienen presiones de vapor superiores a la atmosférica. Se exponen brevemente algunas posibilidades de control de estos compuestos en la industria. Los COV en la industria de fabricación de muebles se utilizan principalmente en el proceso de acabado final, el cual puede ser por aplicación automática o por aplicación por atomización.

Los materiales que se utilizan para estos acabados son lacas de nitrocelulosa, poliuretanos y poliésteres, todos disueltos en solventes orgánicos. El uso de estos materiales provoca emisiones en las cabinas de pintado, áreas de evaporación, hornos, operaciones de limpieza e inclusive del producto terminado. Existen regulaciones en varios países para los máximos permisibles de exposición en ambientes cerrados, pues se han hecho estudios de los efectos a la salud de los COV que incluyen irritación de ojos, nariz y garganta, dolores de cabeza, pérdida de la coordinación, náusea, daños al hígado, riñones, al sistema nervioso central y cáncer.

En el capítulo dos se expone el método y las técnicas correspondientes para la determinación de la concentración de COV en el aire de ambientes cerrados. Este consta de la toma de muestras por medio de dispositivos con carbón activado que sirve de adsorbente; se hace pasar a través de estos una cantidad conocida de aire contaminado por medio de una bomba especializada.

Posterior a esto se desorbe el COV capturado en un solvente, que se inyecta a un cromatógrafo de gases para determinar cualitativa y cuantitativamente la presencia y tipo de compuestos.

En el capítulo tres se analizan los resultados obtenidos del cromatógrafo, realizando los cálculos correspondientes para expresar los mismos en términos de concentración en un volumen de aire. Con este dato se hace el comparativo con las normas internacionales y se determina el riesgo al que están expuestos los trabajadores de la industria de muebles de madera.

ANTECEDENTES

La exposición laboral a vapores orgánicos tiene como origen principal la utilización de los disolventes industriales. Los disolventes orgánicos están formados por uno o más compuestos de naturaleza orgánica en estado líquido que generalmente son muy volátiles. Estos disolventes se emplean principalmente para disolver sustancias poco polares, insolubles en disolventes acuosos, como pinturas, barnices, lacas, resinas, pegamentos, colas y adhesivos, polímeros, pesticidas, tintas de impresión, así como en procesos de limpieza y extracción con disolvente y como materia prima en la industria de síntesis orgánica.

El Instituto Nacional de Higiene en el Trabajo, del Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales de España, elaboró una metodología para la determinación de vapores orgánicos en el aire, utilizando el método de adsorción en carbón activo y posterior cromatografía de gases.

El método de análisis es útil para la determinación de compuestos pertenecientes a las familias orgánicas: hidrocarburos alifáticos, aromáticos y clorados, ésteres y alcoholes (excepto metanol), todos ellos compatibles con toma de muestra en tubo de carbón activo y con el uso total o parcial de sulfuro de carbono como disolvente de desorción. Este método de análisis se ha desarrollado para determinar concentraciones medias ponderadas en el tiempo de compuestos orgánicos volátiles en aire, mediante la utilización de equipos de toma de muestras de bajo caudal, tanto para muestreos personales como en lugares fijos.

Existen límites máximos sugeridos por organizaciones internacionales, dados para los compuestos orgánicos volátiles en sitios de trabajo. La Agencia de Protección Ambiental de Los Estados Unidos (EPA), clasificó y enumeró estos compuestos, también dio directrices de los máximos permitidos en función de la protección de la salud de los trabajadores. La Comisión Europea reporta un número de diecinueve COV que deberían mantenerse lo más bajo posible, más concentrados en el esfuerzo de hacer formulaciones universalmente aceptadas para tener menos COV.

En Guatemala no existen regulaciones para ambientes cerrados de trabajo, de ningún tipo de contaminantes en el aire. A la vez no existen estudios de las cantidades de vapores orgánicos a las que los trabajadores (en específico de la industria de muebles) están expuestos. Las industrias por su parte no llevan un registro de la utilización de productos que contengan estos compuestos, y a su vez los Ministerios de gobierno que deberían establecer regulaciones (Salud Pública y Asistencia Social, Trabajo, Ambiente y Recursos Naturales), no cuentan con las mismas.

La Universidad de San Carlos de Guatemala por su parte cuenta con el Laboratorio de Monitoreo del Aire de la Escuela de Química de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, entidad que realiza monitoreos a la calidad del aire, pero no en ambientes cerrados; y en sus mediciones no incluye aún el parámetro de los compuestos orgánicos volátiles (COV). Por estas razones, resulta de interés disponer de un método ensayado y validado para la determinación de vapores orgánicos en aire, con el fin de poder evaluar la exposición laboral a estos compuestos. Al determinar los niveles de COV, se podrá determinar el nivel de exposición de los trabajadores, en varios sitios dentro de la fábrica.

DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Los disolventes orgánicos están formados por uno o más compuestos de naturaleza orgánica en estado líquido que generalmente son muy volátiles. Los riesgos para la salud de los trabajadores que se presentan debido a la exposición laboral a vapores orgánicos que provienen de la utilización de los disolventes industriales, van desde de enfermedades neurotóxicas, nefrotóxicas y hepatotóxicas, así como de la aparición de cáncer. Existen límites máximos sugeridos por organizaciones internacionales, dados para los compuestos orgánicos volátiles en sitios de trabajo.

Resulta de interés disponer de un método ensayado y validado para la determinación de vapores orgánicos en aire, con el fin de poder evaluar la exposición laboral a estos compuestos. Al determinar los niveles de COV, se podrá determinar el nivel de exposición de los trabajadores, en varios sitios dentro de la fábrica.

El problema a investigar se plantea como la medición de los compuestos orgánicos volátiles en ambientes cerrados de trabajo en fabricación de muebles de madera, para determinar si estos niveles son mayores a los mínimos establecidos en normas internacionales en ausencia de normativa nacional y si estos representan riesgos a la salud de los trabajadores dentro de las fábricas. Lo que lleva a la principal interrogante a contestar: “¿Habría presencia detectable de compuestos orgánicos volátiles en el aire del área de trabajo de una industria de muebles en San Juan Sacatepéquez?”

Dentro de la fábrica, fuera del taller de aplicación de barnices, existen áreas cercanas al mismo que se pueden ver afectadas por la contaminación, por lo que se plantea: “¿Cuáles serán los sitios para realizar el muestreo de emisiones de compuestos orgánicos volátiles en la industria de muebles?”

Para esta determinación se requiere de un método confiable, con herramientas y dispositivos apropiados para el muestreo; por lo que surgen las preguntas: ¿Existen los dispositivos de muestreo confiables para la adsorción de COV?, ¿Se podrán detectar los COV por desorción y posterior cromatografía de gases? Siendo efectivo el método de detección, los resultados se podrán comparar con las normas internacionales, ¿Serán los niveles detectados mayores al mínimo establecido? ¿Representarán los niveles detectados, riesgos para la salud de los trabajadores?

JUSTIFICACIÓN

La Organización Internacional del Trabajo (OIT) estima que el 22% de los 2 millones de muertes laborales que ocurren al año en el mundo se produce por la exposición de trabajadores a productos químicos. Una clase de estos son los Compuestos Orgánicos Volátiles (COV), los cuales son incorporados por los trabajadores a través de las vías aéreas, es decir, el aparato respiratorio. Estos compuestos presentan un alto nivel de riesgo para la salud, y se les ha asociado como precursores de enfermedades neurotóxicas, nefrotóxicas y hepatotóxicas, así como de la aparición de cáncer en las personas expuestas.

Entre el 4 y un 40% de los casos de cáncer detectados tienen su origen en las condiciones laborales del enfermo (por ejemplo la asociación entre exposición a benceno y leucemia); entre un 15 a 30% de las licencias médicas que se presentan, pueden ser asociadas a distintos niveles de intoxicación por compuestos químicos. Algunos rubros donde se encuentran estos compuestos son fábricas de pinturas, adhesivos, muebles, asfalto, tinta, imprentas, incluso zapaterías, o cualquier lugar donde haya solventes químicos, entre otros.

Conociendo estos datos, el estudio cobra importancia, pues establece un precedente en Guatemala en la medición de estos contaminantes en el aire, dado que no se han realizado con anterioridad este tipo de determinaciones. La presente investigación pretende aportar información respecto de los niveles de COV en áreas de trabajo y establecer si existe un riesgo a la salud de los trabajadores ya que es una industria que en nuestro país exporta alrededor de Q352 millones y que genera alrededor de 800,000 empleos y continúa en expansión.

Por lo que el cuidado del ambiente por parte de la misma, pero en especial de sus trabajadores, cobra relevancia. Por ello el beneficiario principal del estudio es el trabajador, pues se sienta un precedente, con el conocimiento de este tipo de contaminantes y los riesgos potenciales, que con futuros estudios puede llevar a iniciativas de reglamentación respecto del tema.

Los resultados revelan los riesgos reales a los que se exponen los trabajadores en su entorno de trabajo. Además, esta investigación es válida para otros estudios ambientales, como contaminación del aire en ciudades, en otro tipo de industrias e incluso en hogares, complementando así otras mediciones que se hacen al aire, que otras instituciones tanto estatales como privadas pueden continuar y ampliar, teniendo ya un estudio como base. También hacia la parte legislativa y de reglamentaciones, aporta datos que pueden servir como fundamento para la aprobación de normativas, que muchas veces se hacen solo con datos de otros países, sin tomar en cuenta la situación nacional.

ALCANCES Y LÍMITES

En el presente trabajo de investigación se midieron los compuestos orgánicos volátiles más comunes utilizados en recubrimientos propios de la industria de madera. Se hicieron pocas mediciones, esto por la limitación de recursos, pues se utilizaron reactivos consumibles.

La medición se centró a una sola fábrica, una con mucha actividad y de gran tamaño, que representara a las demás industrias del municipio de San Juan Sacatepéquez; esto porque las características son tan similares que se pueden extrapolar los datos obtenidos. Además, la ubicación de las mismas es muy cercana, con condiciones muy semejantes de operación, proveedores de recubrimientos, trabajadores y productos finales.

Las muestras se tomaron a lo largo de un día de trabajo en intervalos definidos, pues las operaciones son repetitivas. No se hicieron mediciones a diferentes condiciones ambientales, dado que los talleres son cerrados para evitar la acción negativa del ambiente en los recubrimientos y la madera.

Las muestras se realizaron por triplicado para dar validez al estudio. En la cromatografía, solo se hizo la verificación de la segunda sección de carbón activado en una muestra, dadas las limitaciones económicas para el pago de este análisis; así se verificó la migración de solvente de la primera a la segunda sección. Debido a la casi nula existencia de alternativas de recubrimientos con niveles bajos de COV o basados en agua, que den los resultados que se requieren en los muebles, estos son de muy limitado uso, por lo que no se hizo una comparación del aire al utilizar este tipo de productos.

Se seleccionó el municipio de San Juan Sacatepéquez debido a que cuenta con aproximadamente de 250 a 300 talleres de muebles tapizados y sólidos y de 40 a 50 carpinterías que se proveen entre sí. Esto genera una concentración del posible impacto de la utilización de recubrimientos altos en COV.

1. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

1.1. Definición de compuestos orgánicos y volátiles

Los compuestos orgánicos volátiles (COV) son líquidos o sólidos que contienen carbono orgánico (carbono enlazado a carbono, hidrógeno, nitrógeno o azufre, pero no carbono carbonato, como en el CaCO_3 , ni carbono carburo, como en el CaC_2 , CO o CO_2), los cuales se vaporizan a razones significativas. Probablemente, los COV constituyen la segunda clase más extendida y diversa de emisiones, después de las partículas. Aun cuando algunos COV son emitidos por grandes fuentes, la mayor parte son emitidos por fuentes pequeñas, como los automóviles, las botellas de removedor de barniz para uñas, los botes de pintura pulverizada, el uso de solventes, etcétera. La diversidad de fuentes es bastante grande (De Nevers, 1998).

1.1.1. Presión de vapor, contenido de equilibrio de evaporación

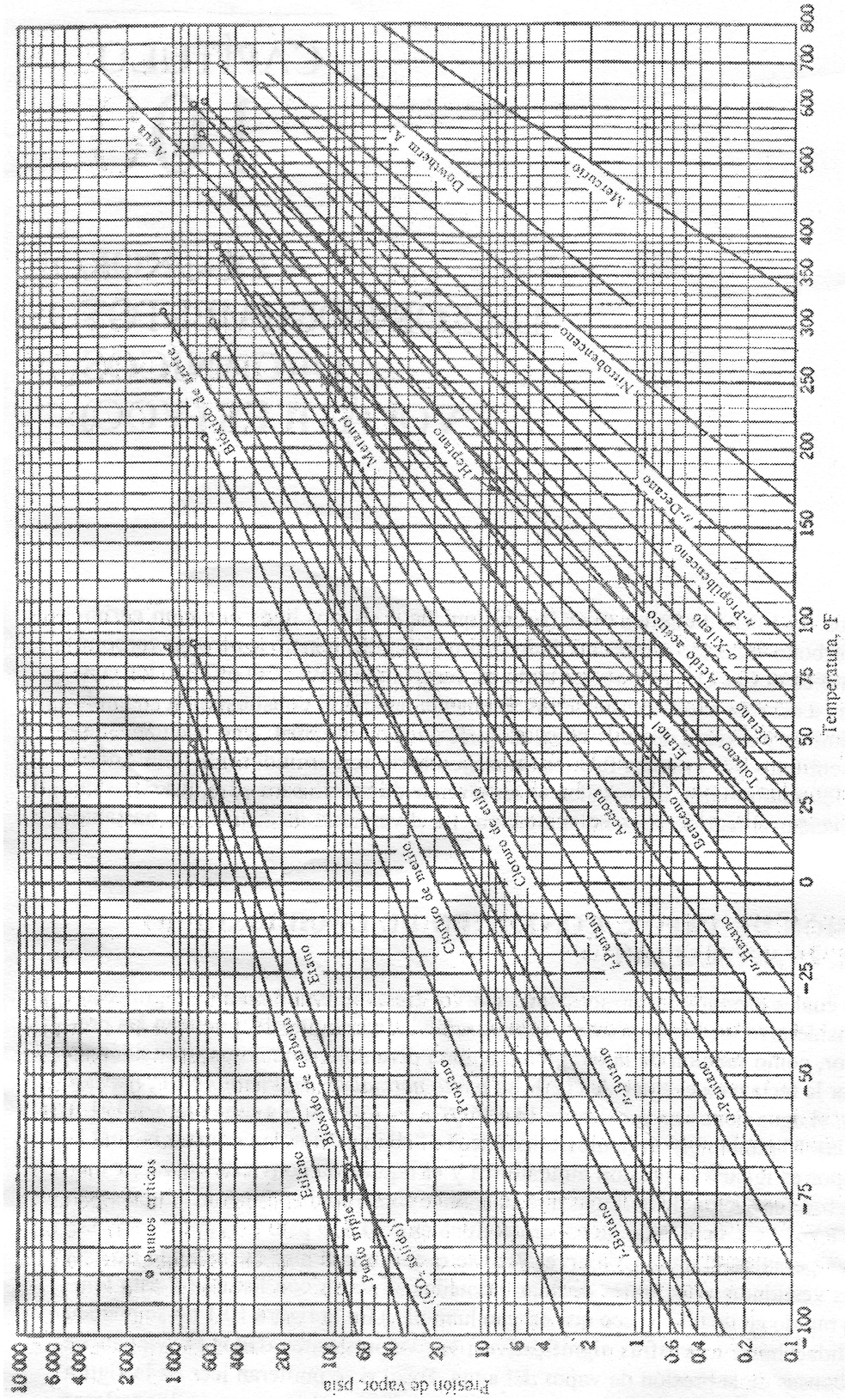
Para entender cuales productos químicos son volátiles (se evaporan a razones significativas), debe considerarse la idea de *presión de vapor*. En la Figura 1 se muestran las presiones de vapor, como función de la temperatura, para diversos compuestos. Considérese en primer lugar la recta para el agua. A 212°F, su *punto normal de ebullición* (NBP, *normal boiling point*), el agua tiene una presión de 14.696 psia (equivalente a 760 torr, 1 atmósfera, 101.3 KPa). El punto normal (atmosférico) de ebullición es la temperatura a la cual la presión de vapor es igual a la presión atmosférica y el líquido se convierte en vapor mediante una vigorosa formación de burbujas que se conoce como ebullición.

A la temperatura ambiente ($68^{\circ}\text{F}=20^{\circ}\text{C}$), la presión de vapor del agua es de $0.339\text{ psia} = 17.5\text{ torr} = 0.023\text{ atmósferas}$. A esta temperatura, el agua no hierve. Pero se evapora si el aire circundante no está saturado (las vestiduras y los trajes de baño húmedos se secan con lentitud a esta temperatura, más rápido en un clima seco que en uno húmedo). En la figura 1 no se pueden leer con facilidad hasta tres cifras significativas; los valores antes dados provienen de tablas más extensas de la presión de vapor del agua (De Nevers, 1998).

En la figura 1 también se ve que sustancias con el etano, propano y n-butano (C_2H_6 , C_3H_8 , C_4H_{10}), a la temperatura ambiente, tienen presiones de vapor superiores a la atmosférica. Estos productos deben conservarse en recipientes cerrados y a presión o de inmediato hervirán a temperatura ambiente. A la derecha de la figura se ve, por extrapolación, que el mercurio tiene una presión de vapor muy baja a la temperatura ambiente (alrededor de 10^{-6} atmósferas), de modo que se evapora con lentitud. No obstante, debido a su extrema toxicidad, se tiene un profundo interés en las exposiciones al vapor de mercurio en interiores, en donde el mercurio derramado puede producir vapor del mismo y causar graves problemas de salud.

Otros metales, como el cadmio, zinc, arsénico y antimonio se convierten en un problema cuando pequeñas cantidades de ellos, que se encuentran en productos de consumo, entran a los incineradores municipales de desechos, donde las temperaturas son bastante altas como para vaporizarlos. En la atmósfera, los vapores metálicos se condensan al enfriarse, formando finas partículas tóxicas (De Nevers, 1998).

Figura 1. Presiones de vapor de 27 compuestos. como función de la temperatura



Fuente: DE NEVERS, Noel. Ingeniería de control de la contaminación del aire. p.8.

En la tabla I se resume el comportamiento de estos materiales respecto de la vaporización. En un recipiente cerrado, un líquido llegará al equilibrio de fases con el vapor arriba de él. Si es un líquido puro, entonces, como se hace ver en la tabla, la presión dentro del recipiente será la del vapor del líquido y ese tendrá la misma composición química que este. Si el recipiente también contiene un gas, como el aire, entonces en el equilibrio, ese aire se saturará con el vapor evaporado del líquido.

Para las presiones bajas que interesan en el control de la contaminación del aire, solo se cometerán errores pequeños si se supone que la mezcla de vapores se comporta como un gas perfecto y que se puede estimar el contenido de líquido volátil en la mezcla de vapores mediante la Ley de Raoult (la cual no es una ley como las de Newton, sino más bien una aproximación útil). Esta se usa para estimar las concentraciones de equilibrio de los líquidos volátiles, líquidos puros o mezclas, en un recipiente cerrado que contiene aire.

Si los mismos líquidos se exponen a la atmósfera y esta contuviera fracciones molares de agua, benceno o tolueno, menores que las antes calculadas, entonces el líquido se evaporaría hacia el aire. Inversamente, si el aire contuviera fracciones molares mayores que las antes calculadas, entonces se tendría condensación del líquido hacia afuera del aire.

Eso es raro con los vapores orgánicos, pero ocurre en forma regular con el agua, cuando la temperatura del aire cercano a la Tierra se baja tanto, que se forma rocío sobre el suelo, las hojas de los árboles, etcétera (De Nevers, 1998).

Tabla I. **Comportamiento de los líquidos volátiles como función de supresión de vapor p y la presión atmosférica (P_{atm})**

Presión de vapor p	Comportamiento en un recipiente abierto a la atmósfera	Comportamiento en un recipiente cerrado, sin desfogue	Comportamiento en un recipiente cerrado, con desfogue
$P > P_{atm}$	Hierve con vigor, se enfría a medida que hierve, hasta que el enfriamiento es suficiente como para tener $p=P_{atm}$	Presión interna en el recipiente = p	Hierve con vigor, expeliendo vapor por el desfogue del recipiente
$P = P_{atm}$	Hierve, dependiendo la razón de ebullición de la razón de entrada de calor	Presión interna en el recipiente = P_{atm}	Hierve, dependiendo de la razón de entrada de calor y expele vapor por el desfogue del recipiente
$P < P_{atm}$	Se evapora con lentitud hacia el aire	Presión interna en el recipiente $< P_{atm}$, a menos que este presente algún otro gas. Puede conducir al aplastamiento del recipiente por vacío	En su mayor parte, el espacio del vapor en el recipiente es aire saturado con vapor

Fuente: DE NEVERS, Noel. Ingeniería de control de la contaminación del aire. p. 223.

Se usan COV como combustibles (propano, gasolina, turbosina, diesel) porque los combustibles de hidrocarburos líquidos tienen una mejor combinación de facilidad de producción, transporte, almacenamiento y uso en pequeñas cantidades que cualquiera de los combustibles competidores.

Las grandes fuentes estacionarias, como las plantas generadoras de electricidad, utilizan en su mayor parte carbón y uranio como combustibles.

Estos últimos tienen un costo mucho menor por unidad de energía que los combustibles líquidos comunes, pero requieren equipos de control de contaminación y de seguridad más caros y complejos que lo aparentemente práctico en los vehículos de motor.

El gas natural es un combustible excelente, pero, hasta ahora, ha probado ser bastante difícil de manejar en un vehículo y para reabastecer a este último con rapidez como para que compita en esta aplicación, con los combustibles COV. Las fuentes de energía solar, eólica, geotérmica y otras, no compiten en la actualidad con los COV en relación con los vehículos (De Nevers, 1998).

Los solventes de COV se utilizan mucho porque se evaporan hacia el aire, sin dejar residuo (solvente para lavado en seco, removedor de barniz de uñas) o solo dejando una delgada capa del sólido previamente disuelto (pintura, barniz para uñas, cera para pisos, tintas). La razón de evaporación (libras evaporadas por pie cuadrado de superficie expuesta por hora) es muy aproximadamente proporcional a la presión de vapor.

Si se desea evaporación rápida (pinturas de rocío, barniz para uñas), se usa un solvente con una elevada presión de vapor a la temperatura ambiente; si se desea una evaporación más lenta (pinturas aplicadas por brocha, solventes para lavado en seco) se elige un solvente con una presión de vapor más baja a la temperatura ambiente (De Nevers, 1998).

La figura 1 tiene un alto contenido visual, pero para programas de computadora se necesita una representación algebraica de la misma información.

De manera aproximada, esa figura es una gráfica de $\log p$ contra $1/T$ (K o $^{\circ}\text{R}$), en donde no se muestran los valores de $1/T$, si no que estos están situados a la derecha a izquierda, y se muestran los valores de T , yendo de izquierda a derecha e impresos en el eje horizontal (los valores grandes de $1/T$ corresponden a valores pequeños de T , etcétera).

Se puede demostrar, con base en la termodinámica, que a presiones bajas, la presión de vapor de todos los compuestos puros se representan con exactitud aceptable (pero no perfecta) por medio de la ecuación de Clausius-Clapeyron:

$$\log p = A - \frac{B}{T}$$

en donde A y B son constantes que se determinan por experimentación para cada compuesto químico por separado. Si esto fuera exactamente verdadero para todas las presiones, entonces los datos de la presión de vapor para cualquier compuesto formarían una recta en la gráfica de $\log p$ contra $1/T$; esto es cierto de manera aproximada, incluso a presiones de millares de psi. Sin embargo, a menudo los datos experimentales se pueden representar con mayor exactitud por medio de la ecuación de Antoine:

$$\log p = A - \frac{B}{(T - C)}$$

en la que A , B y C son constantes por completo empíricas, determinadas a través de datos experimentales. Se utilizan ecuaciones incluso más complejas, para la presión de vapor para construir tablas de propiedades termodinámicas.

Se han publicado valores de las constantes de la ecuación de Antoine, para diversas sustancias.

1.1.2. COV totales

Ahora se puede decir como regla aproximada, que los COV (compuestos orgánicos volátiles), son aquellos líquidos o sólidos orgánicos cuyas presiones de vapor a las temperaturas ambiente son mayores que 0.01 psia (=0.0007 atm) y cuyos puntos de ebullición atmosférica son hasta más o menos 500°F (=260°C); lo cual implica la mayor parte de los compuestos orgánicos con menos de alrededor de 12 átomos de carbono.

Los materiales con puntos de ebullición más altos se evaporan con bastante lentitud hacia la atmósfera, a menos que se calienten, y por consiguiente, es menos probable que se conviertan en parte de los problemas referentes a los COV (si se vaporizan, se condensan en la atmósfera, formando parte del problema de las partículas finas. Un cigarrillo encendido produce una mezcla de compuestos orgánicos de elevado punto de ebullición; cuando esta mezcla se enfría al dejar el cigarrillo forma un humo de gotitas de partículas finas. Son parte del problema de partículas, pero no del problema de los COV). La figura 1 contiene datos de solo unos cuantos de los millones de productos químicos orgánicos en ese rango de presiones de vapor.

En las Clean Air Act Amendments (enmiendas a la Ley del Aire Limpio) de 1990 se listan 189 compuestos que se consideran peligrosos para la salud y que deben regularse para impedir o minimizar sus emisiones; la mayor parte son COV (De Nevers, 1998).

Los términos COV e hidrocarburo no son idénticos, pero a menudo se usan como si lo fueran. Hablando estrictamente, un hidrocarburo sólo contiene átomos de hidrógeno y de carbono.

Por lo general, se dice que la gasolina es un “combustible hidrocarburo” porque, en su mayor parte, contiene átomos de hidrógeno y de carbono, pero también contiene algunos átomos de oxígeno, nitrógeno y azufre. La acetona, $\text{CH}_3\text{-CO-CH}_3$, el ingrediente principal del removedor de barniz para uñas, es un COV pero, hablando con precisión no es un hidrocarburo, porque contiene un átomo de oxígeno. En el uso común, lo normal es que se agrupara con los hidrocarburos (De Nevers, 1998).

Los COV son parte del problema de los oxidantes fotoquímicos. Algunos COV son poderosos absorbentes del infrarrojo y, de este modo contribuyen en la producción del problema de invernadero. Se sabe que algunos son tóxicos o carcinógenos (De Nevers, 1998).

Los COV se utilizan ampliamente como combustibles líquidos (propano, gasolina, diesel, turbosina), solventes o productos intermedios en la industria química (por ejemplo, el cloruro de vinilo como la materia prima principal del cloruro de polivinilo PVC, uno de los plásticos de uso más extendido). Su emisión colabora con el problema del *smog*, el de invernadero y, quizá, en la toxicidad del aire (De Nevers, 1998).

1.2. COV en la industria de fabricación de muebles

La industria de fabricación de muebles de madera es comúnmente agrupada en muebles para el hogar, muebles de oficina y muebles de cocina.

Esta clasificación intenta agruparlos básicamente por su producto final, aunque existe diferencia entre los del mismo grupo; por ejemplo un fabricante de muebles para el hogar puede usar diferentes materias primas y procesos de manufactura.

Las diferencias pueden estar en los métodos de aplicación y secuencias de acabado, tipos de madera o productos de madera usados y tipos de acabados usados. Esta clasificación no usada para categorizar la industria para las técnicas de análisis (U. S. Environmental Protection Agency Office of Air Quality Planning and Standards, 1996).

Hay muchos grados diferentes y estilos de muebles. Los tres grados de muebles descritos por la industria son: alto acabado, acabado medio y bajo acabado. Generalmente, el mueble de alto acabado es construido con madera sólida y chapas de madera y tiene la veta de la madera mostrándose a través del acabado.

El proceso de acabado incluye múltiples pasos y es una labor intensiva. Los muebles de bajo acabado, por otro lado, están casi siempre hechos de tableros de fibra de densidad media (MDF, por sus siglas en inglés) con algunos componentes plásticos y alguna madera natural. También, la pieza casi siempre tiene un acabado de veta pintado o impreso y el proceso de acabado tiene menos labor.

Los muebles de acabado medio pueden ser hechos de una combinación de MDF y madera sólida y pueden o no pueden tener vetas naturales de madera (U. S. Environmental Protection Agency Office of Air Quality Planning and Standards, 1996).

Para el mismo nivel de producción (o el mismo número de piezas de mueblería), las emisiones de COV son mayores para los muebles de alto acabado comparado con los emitidos por los muebles de bajo acabado. La manufactura de muebles de alto acabado casi siempre implica una serie de pasos de acabado, arriba de 15 pasos con múltiples aplicaciones; mientras que los muebles de bajo acabado implican muchos menos pasos de acabado (en algunos casos es tan poco como uno solo).

Más pasos de acabado son diseñados para cada pieza de alto acabado comparado con los de bajo acabado, por lo consiguiente, más solvente COV es usado. La diferencia en emisiones de COV entre plantas con la misma producción, hace difícil predecir emisiones de una planta particular basadas en su producción (U. S. Environmental Protection Agency Office of Air Quality Planning and Standards, 1996).

1.2.1. Proceso de acabado final

El proceso de acabado final usado en la industria de muebles de madera consiste en una combinación de aplicación de acabado, lijado y secado en hornos y/o áreas de evaporación. Las técnicas de aplicación de acabados incluyen atomización (spray), aplicación con brocha y en algunas instancias técnicas de aplicación a mano.

El acabado de muebles de madera básicamente consiste en aplicaciones de una serie de recubrimientos de colores y recubrimientos transparentes. La pieza de mueblería puede ser lijada o pulida y pasar a través de hornos de secado o áreas de evaporación (U. S. Environmental Protection Agency Office of Air Quality Planning and Standards, 1996).

En el proceso final, los acabados son aplicados penetrando la madera y volviéndose parte integral del producto final. Los acabados resaltan las cualidades y la vista de la madera, especialmente para alto acabado. Algunos tipos diferentes de madera, tableros de fibra, y tableros particulados, son usados y los acabados reaccionan diferentes con cada uno; un paso de acabado en una secuencia de acabado final debe ser compatible no solo con el sustrato de madera sino también con los sucesivos pasos de acabado.

En la industria de muebles de madera, cada tipo de acabado usado en un paso particular dentro de una secuencia, es único en color, contenido de sólidos, contenido de COV y solvente portador; los acabados sucesivos deben ser formulados como parte de un sistema de acabados complementarios.

Un límite simple de niveles de COV aplicable a todos los acabados es difícil de definir dadas las particularidades de cada tipo de acabado dentro de una secuencia del mismo (U. S. Environmental Protection Agency Office of Air Quality Planning and Standards, 1996).

La localización geográfica y los cambios en las estaciones afectan el material de acabado en la formulación usada. Los acabados requeridos para el uso en climas secos y fríos son diferentes que los acabados necesarios para climas calientes y húmedos. La mayor parte del tiempo, la formulación de acabados necesaria puede cambiar con la temporada dentro de una misma planta. El contenido de COV y la composición son ajustados para equiparar los cambios en la época fría y la facilidad general de aplicación de cada acabado en relación con la temperatura ambiente y la humedad (U. S. Environmental Protection Agency Office of Air Quality Planning and Standards, 1996).

Algunas instalaciones de muebles pueden operar más de ocho horas continuas durante el día, las operaciones de acabado, sin embargo, usualmente sólo ocurren durante el transcurso del día. En algunas instalaciones, el área de acabados está en un cuarto separado, lejos de las operaciones de tratamiento de la madera. En otras, el acabado ocurre en un área separada dentro del mismo cuarto de las actividades de trabajo en madera. El proceso de acabado es casi siempre una labor intensiva, especialmente para algunos tipos de procesos de manufactura de muebles (U. S. Environmental Protection Agency Office of Air Quality Planning and Standards, 1996).

En instalaciones pequeñas, el mueble es algunas veces movido entre estaciones manualmente. En la mayoría de instalaciones, sin embargo, el mueble es movido mecánicamente a lo largo de una línea de acabados; también puede ser movido por líneas de grúa a nivel del suelo, en rieles o por una cinta transportadora. Las líneas de grúa son cadenas o cables montados en el techo, los cuales mueven una paleta a lo largo de la línea de acabado. Las paletas pueden rotar y ser automáticamente enganchadas o desenganchadas a la línea para permitir pausas.

1.2.1.1. Métodos de aplicación de acabados

Hay varias técnicas de aplicación usadas en la industria de fabricación de muebles. Los dos métodos principales usados son la aplicación automática y la aplicación por atomización. La aplicación automática es usada para terminar piezas que son generalmente planas. Para piezas que no son planas, piezas preensambladas o piezas con muchos huecos, este método de aplicación no se usa generalmente.

La aplicación con brocha y la inmersión son métodos factibles en estas instancias, pero el atomizado es el método prevalente de uso para el acabado de piezas no planas. En la industria de madera, la aplicación con atomizador significa el 87 por ciento de la aplicación de acabados (U. S. Environmental Protection Agency Office of Air Quality Planning and Standards, 1996).

Si los componentes son terminados antes del ensamblado y son planos o relativamente planos, es usada la aplicación automática. En esta, las piezas del mueble son movidas por un transportador y son acabadas con atomizador, recubrimiento por rodillos, recubrimiento, por cortina o por inmersión. La industria denota a estos como “recubridores continuos” porque el recubrimiento en exceso (el que no permanece en la pieza) es constantemente recirculado a el reservorio de recubrimiento y luego reusado.

Cincuenta y cinco por ciento del acabado automático es diseñado para recubrimiento por inmersión; recubrimientos de rodillos y cortinas representan el 14%. El recubrimiento por rodillos involucra la transferencia de acabado a la pieza plana por un rodillo o serie de rodillos. El recubrimiento por cortina involucra pasar una pieza plana a través de una cascada, o cortina, de material de acabado.

En recubrimientos por inmersión, la pieza es finalizada por el paso a través de un contenedor (vatea) de material de acabado y por inmersión o parcialmente sumergido y extrayendo la pieza (U. S. Environmental Protection Agency Office of Air Quality Planning and Standards, 1996).

Dado que la mayoría de muebles de madera manufacturados consisten de piezas no planas, los acabados son usualmente aplicados por atomizador.

Las tecnologías de atomización que pueden usarse incluyen convencionales con aire, sin aire, sin aire asistidas con aire, electrostática, el sistema de atomización UNICARB®, y de alto volumen y baja presión (HVLP por sus siglas en inglés).

1.2.2. Materiales de acabado final

El acabado para muebles de madera es aplicado en una serie de pasos. Hay gran variedad en el número, tipo y orden en los pasos de acabado que son aplicados. Diferentes tipos de los siete diferentes acabados descritos a continuación están disponibles, incluyendo lacas convencionales de bajos sólidos y acabados de altos sólidos de conversión, acabados poliuretano y materiales de acabado de poliéster insaturado/ poliacrilato insaturado (UPE/UPA, por sus siglas en inglés). Los tipos de acabados para madera usados en los Estados Unidos, Europa y Japón son presentados en la tabla II.

Tabla II. **Acabados usados en la industria de muebles de madera (en porcentaje)**

Región	Lacas	Acabados de conversión	Acabados de poliuretano	Acabados UPE/UPA
Estados Unidos	75	15	4	6
Europa	29	17	32	22
Japón	32	17	30	20

Fuente: GUIDELINE SERIES. Control of Volatile Organic Compound Emissions from Wood Furniture Manufacturing Operations. EPA, USA, 1996. p. 23.

En los Estados Unidos, las lacas (mayormente basadas en nitrocelulosa) son usadas por aproximadamente 75 por ciento de la industria de muebles de madera (comúnmente muebles para el hogar). Las lacas de nitrocelulosa han sido usadas en la industria de muebles de madera por muchos años; estos son fáciles de usar, de rápido secado, fácil de reparar y familiar. Aproximadamente el 15% usan materiales de acabado por conversión (mayormente acabados catalizados por ácido) (U. S. Environmental Protection Agency Office of Air Quality Planning and Standards, 1996).

Los pasos básicos en el acabado de muebles de madera (en el orden generalmente usado) y sus propósitos son como sigue (U. S. Environmental Protection Agency Office of Air Quality Planning and Standards, 1996):

- Tintura: agrega el color inicial, unifica el color y acentúa la veta de la madera. La tintura usualmente tiene un bajo contenido de sólidos (menos del 5 por ciento por volumen). Los tintes de tipo teñido consisten en colorantes que son disueltos en metanol. El colorante es completamente disuelto en metanol, por lo que no contribuye con los sólidos del mueble.
- Revestimiento de capa delgada: material de acabado de bajos sólidos (usualmente 2 a 13 por ciento por volumen) usado para asistir en llenado y uniformidad de color, para ayudar a la adhesión y parcialmente sella la madera para las subsecuentes operaciones de tintura. El revestimiento de capa delgada también prepara la superficie de la madera para el lijado luego de la tintura. Algunas instalaciones compran sellador a granel y diluyen el mismo para hacer este revestimiento. Hay tres tipos principales de este revestimiento: estándar de nitrocelulosa, vinílico y modificado vinílico. Mejoras en revestimientos de nitrocelulosa incluyen el secado rápido, fácil lijado y claridad. Vinílicos y modificados vinílicos consisten de

nitrocelulosa y vinilo y proveen mejor dureza y adhesión que los hechos solo con nitrocelulosa; sin embargo, alguna claridad es sacrificada. Los revestimientos de conversión o de tipo precatalizado también proveen de buena adhesión y dureza y son buenos para maderas de poros abiertos.

- **Relleno:** usualmente son tintes de inmersión altamente pigmentados que contienen aceite y son usados en acabados donde se usan maderas de poros abiertos como el roble y la caoba. Algunas veces, maderas de poros relativamente cerrados también usan el relleno. Los rellenos son usualmente suplidos como un material altamente pigmentado, de altos sólidos y de bajo COV que son reducidos en el trabajo. Contienen 75% de sólidos por volumen. Una vez disueltos (reducidos), el rango de sólidos está entre 10 a 45% por volumen. Son aplicados usualmente por atomizado y luego limpiados de la madera.
- **Sellador:** usualmente es una laca a base de nitrocelulosa. Selladores vinílicos o vinílicos modificados y selladores catalizados están también disponibles y proveen ventajas similares a los revestimientos. Los propósitos primarios de los selladores son los de proveer adhesión, lijado, incrementar el cuero y sellar la madera. El contenido típico de sólidos está en el rango de 10 a 30% por volumen.
- **Acabado base:** recubrimiento de color que es aplicado escasamente para acentuar y dar carácter a la madera. Es usualmente aplicado a mano usando brochas, esponjas o cepillos. El contenido de sólidos varía desde 1 a 49% por volumen.
- **Acabado final:** es un recubrimiento transparente cuya función es proteger los recubrimientos de color, realzar la belleza del mueble y proveer un acabado final durable. El contenido típico de sólidos va de 13 a 30% por

volumen. Hay cuatro categorías de acabados finales: los estándar de nitrocelulosa, los acrílicos, los catalizados y los barnices de conversión. Las mejoras en las lacas de nitrocelulosa les han proveído de mayor claridad, atrapan poca suciedad, secan rápido y son fácilmente limpiados y reparados.

1.2.3. Fuentes de emisión de COV

Las siguientes discusiones aplican a la mayoría de operaciones de acabado, en las cuales las áreas separadas como cabinas de pintura y hornos tienen ventilación separada. Hay muchas fuentes potenciales de emisión de COV en una instalación de manufactura de muebles de madera. Sin embargo, cuatro fuentes primarias de COV son asociadas con las operaciones de acabado. Estas fuentes incluyen las cabinas de pintado, áreas de evaporación, hornos, operaciones de limpieza y operaciones de lavado. Una fuente adicional, comparativamente menor es el producto terminado. A continuación se amplían estas fuentes (U. S. Environmental Protection Agency Office of Air Quality Planning and Standards, 1996):

- Cabinas de pintado: en la industria del mueble de madera, los materiales de acabados son usualmente aplicados en cabinas; varios tipos de equipo de aplicación de atomizados son usados y varios tipos de rodillos, cortinas y bandejas de inmersión son usados en las líneas planas. Las cabinas son comúnmente mantenidas a temperatura ambiente. El tipo de atomizador, tamaño, tasa de rendimiento y los métodos de control de particulado pueden variar ampliamente dentro de la industria. Los tipos de cabina que son usados incluyen manuales para su operación automática. El tamaño promedio de las cabinas en la industria es de 2.5 metros de alto, 5.2 metros de ancho y 3.0 metros de fondo. La mayoría de cabinas

de pintado son operadas usando técnicas de acabado manual; aproximadamente el 84% son operadas de forma manual. Las cabinas automáticamente son casi siempre más pequeñas en tamaño que las manuales y las tasas de rendimiento son significativamente menores. El rendimiento promedio por cabina en operaciones manuales es de 609 m³/min y para la operación automática es de 66.3 m³/min. Varias cabinas de atomizado son equipadas con filtros secos, típicamente un material de papel, para el control de partículas. En el pasado, las cortinas de agua habían sido usadas para el control de los particulados. Sin embargo, desde que el agua residual fue considerada como un residuo peligroso, el costo de disposición de este material ha sido considerado. Como este costo ha crecido, el uso de cortinas de agua ha disminuido.

- Áreas de evaporación: es donde el solvente se volatiliza de la pieza finalizada, está localizado entre las cabinas de atomización o entre la cabina de atomización y un horno. Estas áreas son usadas para permitir la evaporación del solvente y un curado parcial, previo al curado final en horno. Algunas áreas de evaporación tienen circulación forzada de aire.
- Hornos: son usados entre algunos pasos de acabado y el curado, previo al siguiente paso de la secuencia de acabado. Las temperaturas de los hornos pueden tener rangos de 32.2° a 191°C (90.0° a 375°F) dependiendo del tipo de material de acabado usado, la pieza a ser terminada y el tiempo de residencia en el horno; la temperatura promedio en hornos es de 58.9°C (138°F). El tiempo de residencia va desde 1 a 60 minutos, con un promedio de 13 minutos.

- Operaciones de limpieza, dilución y lavado: como se discutió previamente, las lacas de nitrocelulosa base solvente son el tipo predominante de material en los acabados. Las resinas en tales acabados son relativamente difíciles de disolver, por lo que se deben usar solventes de alta tasa de solvencia en sus formulaciones. Similarmente, el adelgazamiento de estos materiales de acabado requiere el uso de los mismos solventes o uno equivalente en solvencia. Este solvente es generalmente llamado “adelgazador laca” o “thinner laca” por su nombre en inglés. La práctica común es usar el thinner laca tanto para adelgazar la premezcla de acabados como para limpiar y lavar. Las mejoras en el thinner laca incluyen su compatibilidad con los acabados y su facilidad para remover lacas de nitrocelulosa curadas.

En operaciones de acabado de madera, los solventes industriales son utilizados predominantemente para limpiar el equipo de aplicación. El solvente de limpieza también se puede usar para limpiar tubería, cabina de pintura y rieles, restos de acabado, curado de la maquinaria y periódicamente para limpiar el almacenamiento y transporte. También se pueden usar para lavar piezas que no cumplen con especificaciones. Este proceso es llamado lavado y representa una porción significativa del solvente de limpieza usado por la industria.

El equipo de aplicación puede ser limpiado cada vez que hay un cambio de color y en el material de acabado; usualmente antes que el equipo sea almacenado por un periodo de tiempo. En equipo de atomización, el equipo limpiado con solventes incluye pistolas, líneas de alimentación y reservorios de acabado (donde aplique).

- Producto final de madera: el mueble terminado y seco puede ser una fuente menor de emisiones. La pieza terminada puede tener pequeñas cantidades de solvente que eventualmente volatiliza. Sin embargo, la cantidad de emisiones de COV de esta fuente presentan menos del 1% del total de las emisiones de COV.

1.2.4. Sumario de emisiones de COV

Dado que los solventes usados en las operaciones de acabado en muebles de madera no reaccionan típicamente o forman parte del producto terminado, se asume que el consumo de solvente es aproximadamente igual a las emisiones de solventes. Además, a causa de que la mayoría de los solventes consumidos son considerados COV, el solvente usado es aproximadamente igual a las emisiones de COV. Mientras que el asumir esto provee una estimación razonable de todas las emisiones de la industria, también es importante que algunos recubrimientos tengan COV que producen subproductos del proceso de curado.

Hay algunos recubrimientos en los cuales no todos los COV evaporan; algunos de los COV pueden reaccionar químicamente para formar la película seca. Tanto el poliéster como algunos recubrimientos ultravioleta usados contienen monómero de estireno, el cual reacciona para formar el recubrimiento (U. S. Environmental Protection Agency Office of Air Quality Planning and Standards, 1996). El desglose del uso de solvente por la industria de muebles de madera en Estados Unidos es resumido en la Tabla 1.3. Como se indica en esta tabla, el solvente más comúnmente usado es el tolueno, seguido por xilenos, alcoholes, cetonas y acetatos (U. S. Environmental Protection Agency Office of Air Quality Planning and Standards, 1996).

Tabla III. **Uso de solventes en la industria de muebles de madera en Estados Unidos en 1989**

Solvente	Millones de libras
Hidrocarburos alifáticos	8.6
Tolueno	71.5
Xilenos	40.4
Otros aromáticos	9.2
Alcohol butílico	27.5
Alcohol etílico	27.7
Alcohol isopropílico	15.4
Otros alcoholes	2.0
Acetona	3.0
Metil etil cetona	15.0
Metil isobutil cetona	19.8
Acetato de etilo	7.8
Butil acetatos	14.3
Otras cetonas y ésteres	2.8
Glicol éteres y otros ésteres	4.7
TOTAL	270

Fuente: GUIDELINE SERIES. *Control of Volatile Organic Compound Emissions from Wood Furniture Manufacturing Operations*. EPA, USA 1996. p. 51.

1.2.5. Regulaciones en los Estados Unidos

La tabla IV presenta las limitaciones en contenido de COV asociados con las regulaciones del aire limpio. San Diego, el Área de la Bahía y la Costa Sur tienen un enfoque por etapas.

Bajo la regulación de San Diego, un conjunto de límites de contenido de COV se aplican a partir del 1 de enero 1995, cuando los límites más estrictos entraron en vigor. Hay cuatro fases diferentes en la regulación del área de la Bahía y tres fases en las regulaciones del la Costa Sur.

Tabla IV. Contenido límite de COV en Acabados para muebles de madera, en Estados Unidos

Estado	San Diego California		Illinois	New Jersey	Indiana	Pennsylvania	Bay Area District, California				South Coast District, California			New York City Metropolitan Area	Massachusetts	
	Sin agua y exento de componentes	Sin agua y exento de componentes					7/1/91	7/1/92	7/1/94	7/1/96	7/1/96	9/1/95	7/1/96			Sin agua y COV excluidos
Límite de contenido de COV, lb./gal																
A. transparente	4.6 (2.3)	5.6	5.6	5.6	Limitaciones de COV no son contenidas en la regulación	5.9	5.8 (5.8)	4.6 (5.8)	2.3 (3.5)	2.3 (3.5)	4.6 (5.7)	2.3	2.3	5.6	5.6	23.4
Revestimiento	4.0 (4.0)	6.1	6.1	6.1		6.5	6.7 (6.7)	4.0 (6.7)	1.0 (1.0)	4.0	4.0	4.0	1.0	6.1	6.1	35.6
Reparación		5.6				6.0										
Tintes de impresión Semitransp.						6.4	6.7	6.7	1.0	4.0	4.0	4.0	1.0	6.8	6.8	89.4
Tintes por atomizado Semitransp.	4.0 (4.0)	6.6	6.6	6.8		6.8	6.7 (6.7)	4.0 (6.7)	1.0 (1.0)	4.0 (4.0)	4.0 (6.7)	4.0	1.0	6.8	6.8	
Fondo opaco						5.5										
Recubrimiento pigmentado	5.0 (2.3)	5.0	5.0	5.0		5.0 (5.0)	5.0 (5.0)	2.3 (3.5)	2.3 (3.5)	2.3 (3.5)	5.0	2.3	2.3	5.0	5.0	15.6
Selladores	4.6 (4.6)	5.6	5.6	5.6		6.2	5.8 (5.8)	4.6 (5.8)	2.3 (3.5)	4.6 (5.7)	4.6 (5.7)	2.0	2.0	5.6	5.6	23.4
Rellenos							4.2 (4.2)	4.2 (4.2)	2.3 (2.3)	4.2	4.2	4.2	2.3			
Tintes de altos sólidos: No barniz	5.8 (5.8)										5.8	5.8	2.0			
Barniz	5.8 (5.8)															
Tintas											4.2	4.2	4.2			
Separador	2.9 (2.9)															
Preparador de superficie	1.7 (1.7)															
Tinte opaco		4.7	4.7	4.7		5.8 (5.8)	5.8 (5.8)	5.8 (5.8)	2.0 (3.5)		6.3	4.8	4.8	4.7	4.7	13.0
Moldes											6.3	6.3	6.3			
Recubrimiento Multicolor	5.7 (2.3)										5.7	5.7	5.7			
Otros	3.5 (2.3)					7.0										

Fuente: GUIDELINE SERIES. Control of Volatile Organic Compound Emissions from Wood Furniture Manufacturing Operations. USA: EPA, 1996. p. 53.

1.3. Efectos en la salud por COV

Las fuentes de COV a la atmósfera son muy variadas, van desde las naturales, como los productos volátiles vegetales, hasta el material biológico en descomposición. Las fuentes antropogénicas incluyen transporte, refinación de petróleo, producción y distribución de aceite y gas, industria química, utilización industrial y comercial de solventes orgánicos y procesamiento de alimentos (Pluschke, 2004).

Dentro de los hidrocarburos, los que han recibido mayor atención son los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), que se encuentran en ciertas fracciones de material orgánico particulado. Estos han mostrado actividad carcinogénica, tanto en estudios *in vivo* como *in vitro* (Pluschke, 2004).

Los COV se pueden clasificar según su peligrosidad en 3 grupos (Pluschke, 2004):

- Compuestos extremadamente peligrosos para la salud: Benceno, cloruro de vinilo y 1,2 dicloroetano y azufre.
- Compuestos de clase A: Son compuestos que pueden causar daños significativos al medio ambiente, como acetaldehido, anilina, tetracloruro de carbono, 1,1,1-tricloroetano, tricloroetileno, triclorotolueno etc.
- Compuestos de clase B: con menor impacto en el medio ambiente como Acetona, etanol y combustibles fósiles.

1.3.1. Directrices para COV en ambientes cerrados

Las directrices son un conjunto de criterios especialmente establecidos para indicar los niveles máximos de un agente peligroso o nocivo para que sea consistente con la buena salud.

Se hizo una primera clasificación de los COV, donde se encuentran los alcanos, hidrocarburos aromáticos, terpenos, halocarbonados, esterés, aldehídos y cetonas (excluyendo al formaldehído) y se propuso (Pluschke, 2004):

- COV totales no deberían exceder los $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$.
- Ningún compuesto individual debe tener una concentración mayor a 10% de COV totales o 10% de la concentración proporcional a esta clase de COV.

Solo unos pocos países tienen directrices para COV totales en ambientes cerrados. Los Estados Unidos tiene un valor de $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Alemania de $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Australia de $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y Finlandia tiene varios valores que están en un rango de 200 a $600 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Se recomienda una intervención oficial si la concentración de COV excede de 1000 a $3000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Pluschke, 2004).

Las directrices para COV individuales también están disponibles en algunos países. En Polonia, la máxima concentración permitida para algunos COV han sido establecidos en $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el benceno, $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el tolueno, $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el acetato de butilo, $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el etilbenceno, 100

$\mu\text{g}/\text{m}^3$ para el m-xileno, $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el estireno y $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el p-diclorobenceno.

En el contexto de los 64 COV de interés en la Comisión Europea, solo el tolueno, 2-etoxietanol, 2-butoxietozietanol y 1-metoxi-2-propanol tienen valores directrices (Pluschke, 2004).

Existe muy poca experiencia en evaluación sensorial y de efectos a la salud en COV en ambientes cerrados, con la correspondiente ausencia de estándares y directrices. Sin embargo la Comisión Europea reporta un número de diecinueve COV que deberían mantenerse lo más bajo posible, mas concentrados en el esfuerzo de hacer formulaciones universalmente aceptadas para tener menos COV (Pluschke, 2004).

1.3.2. Efectos en la salud de los COV en ambientes cerrados

Los efectos en la salud han sido agrupados como:

- Efectos a la inmunidad y otros efectos de hipersensibilidad (asma, alergias)
- Efectos celulares (cáncer)
- Efectos cardiovasculares
- Efectos neurogenicos y sensoriales (olor, irritación)
- Efectos respiratorios e inmunológicos

La Agencia de Protección Ambiental de Los Estados Unidos (EPA), provee mayores detalles, sugiriendo que los efectos a la salud de los COV incluyen irritación de ojos, nariz y garganta, dolores de cabeza, pérdida de la

coordinación, náusea, daños al hígado, riñones, al sistema nervioso central y cáncer. Mientras que los COV individuales como el benceno y tolueno han sido asociados con leucemia mieloide aguda y neurotoxicidad, respectivamente, estudios epidemiológicos asocian los efectos de los COV individuales a los COV totales. Los resultados de algunos estudios han sido unidos.

Los efectos en la salud de los COV son asociados al Síndrome del Edificio Enfermo o SEE (La Organización Mundial de la Salud lo ha definido como un conjunto de enfermedades originadas o estimuladas por la contaminación del aire en estos espacios cerrados). Varias razones pueden ser citadas por la inconsistencia en esta asociación de conceptos:

- La química del aire en espacios cerrados lleva a la formación de COV y otras especies que son diferentes de estos monitoreos. Por ejemplo, el ozono reacciona con los COV para dar productos secundarios que podrían ser responsables por el SEE.
- Solo compuestos específicos son monitoreados en el espectro cromatográfico, como aldehídos de bajo peso molecular, los cuales juegan un rol significativo en el SEE y no son rutinariamente medidos como parte de los COV totales.
- Los sistemas de ventilación son significativamente asociados con las quejas de SEE.
- Partículas presentes en los ambientes cerrados pueden contribuir significativamente a los sistemas SEE.

- Las mediciones son realizadas usualmente como concentraciones integradas a través del tiempo en el centro del ambiente, que coincide junto con las zonas de respiración de los sujetos.
- Las influencias de los factores psicosociales son ignoradas.
- Los COV totales no son biológicamente importantes.
- Los COV biológicamente importantes no detectados y no son monitoreados.

1.4. Impacto ambiental de los COV

Los compuestos orgánicos volátiles presentan propiedades características responsables de sus efectos sobre la salud y el medio ambiente. Son compuestos volátiles, liposolubles, tóxicos e inflamables (7). Dichas propiedades son:

- Volatilidad: son compuestos orgánicos que se evaporan rápidamente a la atmósfera. Esta propiedad da lugar tanto a contaminación atmosférica como a importantes riesgos para la salud. La vía de entrada más peligrosa al organismo es la inhalación.
- Liposolubilidad: son moléculas orgánicas y por lo tanto son liposolubles; presentan afinidad por las grasas y se acumulan en los tejidos grasos del cuerpo humano. Productos resultantes de su metabolismo dentro del organismo, si presentan hidrosolubilidad.

- Inflamabilidad: generalmente son compuestos inflamables, es decir que arden con facilidad en contacto con el aire.
- Toxicidad: las propiedades tóxicas van a depender de cada compuesto y de las condiciones de exposición. A corto plazo pueden causar reacciones alérgicas o mareos y en exposiciones más prolongadas se relacionan con lesiones neurológicas y otros efectos psiquiátricos como irritabilidad, falta de memoria, dificultad de concentración.

La emisión de compuestos orgánicos volátiles (COV) a la atmósfera tiene algunos problemas importantes para el medio ambiente. Algunos COV contribuyen a la degradación de la capa de ozono atmosférico, como es el caso del 1, 1, 1-tricloroetano y el tetracloruro de carbono, así como de los CFCs y los HCFCs, entre otros. Algunas de estas sustancias ya están prohibidas o existe para ellas un calendario de eliminación contemplado dentro del marco del Protocolo de Montreal.

Por otro lado, los COV junto con los NOx en presencia de luz solar actúan como precursores de la formación de ozono troposférico o ambiental. La contaminación por ozono es un problema crónico y de amplia distribución en toda la Unión Europea, hasta el punto de que existe una normativa que limita los niveles de este, aprobada por la Directiva 92/72/CEE sobre la contaminación atmosférica por ozono, traspuesta a la legislación española en septiembre de 1995 en el Real Decreto 1494.

El ozono troposférico puede causar efectos nocivos tanto para la salud humana como para el medio ambiente pero, de hecho, las especies vegetales y los cultivos son más sensibles a este contaminante que los seres humanos.

El ozono troposférico interfiere en la actividad fotosintética, en el crecimiento y en el metabolismo general de las plantas, y también aumenta la sensibilidad de los árboles a las heladas, al calor y a la sequía.

Se ha estimado que con las concentraciones de ozono que se vienen dando en la temporada estival de crecimiento, las pérdidas de producción en la agricultura pueden suponer hasta un 5-10% en toda la Comunidad Europea.

1.4.1. Ozono troposférico

Las concentraciones de ozono en la tropósfera sobre Europa (desde el suelo hasta 10-15 km) suelen ser hoy entre tres y cuatro veces superiores a las de la época preindustrial, sobre todo como resultado del gran aumento de las emisiones de óxidos de nitrógeno procedentes de la industria y los vehículos, desde la década de 1950. La variación meteorológica de un año a otro impide determinar tendencias en cuanto a la frecuencia de episodios de concentraciones elevadas de ozono (Agencia Europea de Medio Ambiente).

Las concentraciones umbral, establecidas para la protección de la salud humana, la vegetación y los ecosistemas, se superan con frecuencia en la mayoría de los países europeos. Unos 700 ingresos en hospitales de la UE en el período de marzo a octubre de 1995 (75% de ellas en Francia, Italia y Alemania) pueden atribuirse a concentraciones de ozono superiores al umbral de protección de la salud. Aproximadamente 330 millones de personas en la UE podrían estar expuestas, por lo menos una vez al año, a un episodio en que la concentración de ozono sea superior al valor umbral (Agencia Europea de Medio Ambiente).

Durante 1995 el umbral de protección de la vegetación se superó en la mayor parte de la Unión Europea durante 1995. En varios países se detectaron niveles superiores al umbral que duraron más de 150 días en determinadas zonas. Ese mismo año, casi toda la superficie forestal y agraria de la UE estuvo expuesta a tales niveles (Agencia Europea de Medio Ambiente).

Las emisiones de los precursores de ozono más importantes, óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles distintos al metano (COVNM), aumentaron hasta finales del decenio de 1980 y luego descendieron un 14 por ciento entre 1990 y 1994.

El sector del transporte es la principal fuente de óxidos de nitrógeno y también el que más COVNM emite en Europa occidental; mientras que en los PECO y los NEI las emisiones de COVNM proceden principalmente de la industria (Agencia Europea de Medio Ambiente).

Si se cumplieran los objetivos para las emisiones de óxidos de nitrógeno, establecidos en el Convenio de contaminación transfronteriza a larga distancia y en el Quinto Programa de Acción Medioambiental de la Comisión Europea, las concentraciones máximas de ozono se reducirían solamente un 5-10 por ciento.

El logro del objetivo a largo plazo para que no se excedan los niveles umbral dependerá esencialmente de que se reduzcan las concentraciones globales de ozono troposférico, y esto exigirá medidas de control de las emisiones de los precursores contaminantes (óxidos de nitrógeno y COVNM) en todo el hemisferio norte. El primer paso será establecer nuevos límites máximos nacionales para las emisiones, de conformidad con el nuevo protocolo sobre múltiples contaminantes multiefecto (Agencia Europea de Medio Ambiente).

1.4.2. Efectos ambientales del ozono troposférico

La niebla fotoquímica, normalmente conocida como "smog fotoquímico", lleva varias décadas originando problemas respiratorios en la población europea y puede producir también daños graves en las plantas. Gran parte de Europa conoce cada año episodios de niebla fotoquímica estival (Agencia Europea de Medio Ambiente).

Esta niebla se forma mediante un proceso fotoquímico a partir de numerosos gases presentes en la tropósfera, capa de la atmósfera que se extiende desde el suelo hasta una altura de 7-15 km.

Los principales precursores son los óxidos de nitrógeno (NO_x , esto es, NO y NO_2), los compuestos orgánicos volátiles (COV), el metano (CH_4) y el monóxido de carbono (CO). Son muchas las actividades humanas que producen estos contaminantes, incluidos la quema de combustibles fósiles, sobre todo para el transporte, y el uso de productos que contienen disolventes orgánicos (Agencia Europea de Medio Ambiente).

En Europa, las emisiones antropogénicas de los precursores principales, NO_x y COV, han ido disminuyendo desde que se realizara la evaluación Dobris, pero no lo suficiente para alcanzar los objetivos aceptados a escala internacional respecto de la reducción de emisiones. La luz solar, al actuar sobre estos precursores, provoca la formación de una serie de compuestos conocidos como oxidantes fotoquímicos (Agencia Europea de Medio Ambiente).

El oxidante fotoquímico más importante por su abundancia y toxicidad es el ozono (O_3). Los niveles umbral de ozono, establecidos para la protección de la salud humana, la vegetación y los ecosistemas, suelen superarse en casi

todos los países europeos. No parece que los oxidantes fotoquímicos distintos al ozono entrañen riesgos importantes para la salud o la vegetación a los niveles observados actualmente en el medio ambiente. Sin embargo, se sabe que, a concentraciones más elevadas, el peroxiacetilnitrato (PAN) produce irritación del aparato respiratorio y daños en la flora similares a los del ozono (Agencia Europea de Medio Ambiente).

A las concentraciones de ozono habituales, que han aumentado casi al doble desde la década de 1950, se suman otras esporádicas. El aumento del nivel habitual de ozono se debe principalmente al aumento de las concentraciones de NO_x a nivel mundial y, por tanto, el ozono sobre Europa se ve afectado también por las emisiones de otros continentes.

El ozono de la tropósfera es también un factor relevante respecto del cambio climático. Se calcula que el ozono troposférico añade un 16 por ciento al efecto total de calentamiento provocado por los principales gases antropogénicos con efecto invernadero, emitidos hasta hoy (Agencia Europea de Medio Ambiente).

Los procesos de formación y los efectos de los oxidantes fotoquímicos son complejos e interactúan con otros problemas medioambientales. Así, los efectos del ozono sobre la salud humana se agravan con la mezcla de contaminantes presentes en el aire. Dado que los oxidantes fotoquímicos son transportados a largas distancias y atraviesan las fronteras, es necesario un esfuerzo internacional para establecer políticas de reducción coherentes. El nuevo protocolo sobre múltiples contaminantes multiefecto, adoptado conforme al Convenio de la CEPE sobre contaminación atmosférica fronteriza a larga distancia, es un ejemplo en este sentido (Agencia Europea de Medio Ambiente).

1.4.2. Posibilidades de control

Si se están emitiendo COV y se requiere, por la reglamentación o por propia política interna, reducir o eliminar esa emisión, se tienen las siguientes posibilidades de control:

- Se puede hacer una sustitución con otro material que no sea COV.
- Se pueden impedir las fugas del COV de los recipientes, por los sellos.
- Se pueden adsorber los COV de las corrientes de aire que los contienen, sobre un adsorbente sólido y, después, disponer del adsorbente (hallar un lugar para disponer esas cosas se están volviendo más difíciles con el tiempo), o bien, regenerar el adsorbente y recuperar el COV en forma semidura, para volverlo a usar o para destruirlo.
- Se puede quemar el COV, formando materiales mucho menos dañinos, y descargar estos últimos en la atmósfera.
- Se puede condensar el COV de la corriente de gas, y recuperarlo para volverse a usar o para su destrucción.
- Se puede modificar el proceso con el fin de reducir o eliminar la liberación de COV.

1.5. Adsorción de COV

En los sistemas con adsorbentes, el contaminante es adsorbido sobre la superficie (principalmente por la superficie interna) de un gránulo, perla o cristal de material adsorbente. No es absorbido por medio de reacción química. Esta es una diferencia importante. El material es retenido físicamente sin demasiada fuerza y puede ser liberado (desorbido) de modo relativamente fácil ya sea por calor o al vacío. Por el contrario, un absorbente reacciona químicamente con la sustancia que está siendo absorbida y de esta manera la retiene mucho más fuertemente, requiriendo mucha más energía para liberarla.

1.5.1. Sistemas de adsorción

Uno de los adsorbentes es llamado “carbón absorbente”. Esta persistente confusión proviene de antes de los años veinte, cuando la adsorción llegó a entenderse. Un término más apropiado es el de “carbón activado”. El carbón se activa por medio de la pirólisis del carbón mineral, la madera, la corteza de árbol, la cáscara del coco, etc., para eliminar todo el material volátil en forma de gas o vapor y dejar únicamente el carbón elemental.

A continuación, este carbón también podría ser parcialmente oxidado para agrandar sus poros.

Otro adsorbente es la estructura cristalina de aluminosilicato conocida como “zeolita”, que posee poros de tamaño uniforme (también llamados ventanas), a través de toda su estructura de cristal. La estructura de cristal de los 118 tipos establecidos de zeolitas se determina por la relación de silicio a aluminio en el cristal cuando este se forma. Toda la zeolita que ocurre

naturalmente es hidrofílica (o sea, que posee una afinidad por las moléculas polares, tales como el agua) y contiene aluminio.

La desaluminización de la zeolita natural la vuelve hidrofóbica (o sea, que posee afinidad por las sustancias no polares, tales como muchos COV). Las zeolitas se desaluminizan por medio del intercambio del aluminio por silicio sin cambiar la estructura del cristal. La zeolita hidrofóbica también puede ser sintetizada en cristales desde 1 micra hasta 1 milímetro de diámetro y estos pueden ser aglomerados en forma de gránulos más grandes y reducir su resistencia al flujo del aire. Puesto que la síntesis es costosa, por lo general se reserva para producir ya sea las zeolitas hidrofóbicas o catalizadores de zeolita con un tamaño específico de poro grande.

Los polímeros adsorbentes poseen poros formados durante su manufactura. Estos pueden variar desde macroporos hasta tamaños moleculares, pero los poros más pequeños son por lo general más grandes que los microporos de un carbón activado. Los polímeros se utilizan como gránulos o perlas y, como el nombre lo implica, son plásticos. Se ha observado que desorben más rápidamente que el carbón.

Al igual que el carbón, no son considerados altamente selectivos con respecto a cuál COV van a adsorber, aunque cualquier polímero específico adsorberá a algunos COV mejor que a otros.

La selección del mejor adsorbente para cada situación no es sencilla. Hay varios problemas relacionados que se discutirán, para familiarizarlo con los diferentes adsorbentes y sistemas (Agencia de Protección Ambiental, USA, 1999).

1.5.2. Importancia de los sistemas de adsorción

Los sistemas de adsorción han sido utilizados principalmente para controlar la emisión de COV. Típicamente, el control de emisiones de COV reduce las concentraciones desde un rango entre 400 y 2,000 partes por millón (ppm) hasta menos de 50 ppm.

Actualmente, la tecnología de adsorción puede ampliar este rango de concentración de COV desde 20 ppm hasta una cuarta parte del Límite Inferior de Explosividad (LIE). En el extremo inferior de este rango, las concentraciones tan bajas pueden ser difíciles o muy caras como para ser controladas por alguna otra tecnología y no por todos los adsorbentes.

En el extremo superior del rango de concentraciones, los incineradores, los separadores por membrana y los condensadores, pueden ser económicamente viables cuando son utilizados en lugar de los sistemas de adsorción. Además del control de emisión, un sistema de adsorción hace posible la recuperación de COV. La recuperación de un COV reutilizable o comercial puede contrarrestar significativamente el costo de controlar la emisión.

Los sistemas de adsorción también pueden aumentar la concentración de COV, permitiendo que la destrucción por incineración o la recuperación por membrana o por condensador sean económicamente viables (Agencia de Protección Ambiental, USA, 1999).

1.5.3. ¿Cómo funciona la adsorción?

Los COV son vapores condensables que parecen condensarse sobre la superficie del adsorbente. Cuando la superficie ha adsorbido casi todo lo que le es posible, el COV es desorbido como parte de la regeneración del adsorbente. Por lo general, al ser desorbidos, los vapores de COV se encuentran a una concentración más alta, después de lo cual el COV puede ser recuperado o destruido.

Se podría generalizar que la función de todos los sistemas de adsorción es la captura de COV a partir de una concentración diluida y su liberación a una concentración más alta. Los sistemas de adsorción también pueden ser considerados como separadores del flujo de COV y del flujo de aire de un proceso.

La concentración real del COV es la clave para determinar cuándo y cómo se va a utilizar un sistema de adsorción.

Un sistema de adsorción se vuelve casi inútil cuando la concentración a la entrada disminuye tanto que el COV no será adsorbido efectivamente, pero permite que la recuperación del COV sea a una concentración alta. Por razones de seguridad se indica que las concentraciones de COV se mantengan por debajo de la cuarta parte del LIE.

Cuando la concentración está cerca de una cuarta parte del LIE, se puede disponer económicamente del COV por medio de un incinerador, capturar por una membrana, o recuperar con un condensador. Sin embargo, una concentración por debajo de una cuarta parte del LIE es demasiado baja para sustentar la combustión sin añadir un combustible auxiliar.

Por lo tanto, a medida que la concentración de COV a la salida del adsorbente desciende por debajo de una cuarta parte del LIE, se debe añadir más combustible para proporcionar una combustión adecuada al COV en un incinerador (Agencia de Protección Ambiental, USA, 1999).

1.5.4. Adsorción de los contaminantes

Una molécula sobre una superficie, se encuentra normalmente a una distancia de dicha superficie. Existe una repulsión entre la nube de electrones en los átomos que forman la superficie y los de la molécula y existe además una fuerza de atracción nuclear de Van der Waals. La atracción nuclear tiene un radio de influencia mucho más corto, de manera que hay una distancia corta (por lo general de nanómetros), desde la superficie, donde existe un “vado” o “pozo” en la curva de energía potencial. Las moléculas o los átomos que llegan a este “pozo”, son atrapados o “adsorbidos” por este “pozo” de energía potencial hasta que pueden obtener la suficiente energía cinética para escapar fuera del pozo.

La energía cinética se convierte en energía potencial, tal como cuando uno brinca hacia arriba en contra de la gravedad. Por lo tanto, se debe añadir energía cinética para permitir que las moléculas escapen o se “desorban”. La energía cinética de las moléculas se manifiesta como temperatura; siendo más energética cuanto más caliente.

Históricamente, el carbón fue el primer material en el que se observó que contenía una gran superficie con esta propiedad. Más recientemente, se ha observado que los adsorbentes de zeolita y de polímeros también poseen una gran superficie interna con esta propiedad.

Durante décadas se ha sabido que antes de poder obtener un alto vacío (tal como 1 micra de Hg), aún los sistemas de vidrio deben “desgasar” el aire adsorbido. Lo que distingue a estos adsorbentes, es que tienen una superficie tan grande (principalmente interna), con esta propiedad por unidad de peso y que puede ser desorbida sin dificultad (Agencia de Protección Ambiental, USA, 1999).

1.5.5. ¿Qué es la desorción?

La desorción se logra a través de oscilaciones tanto de temperatura como de presión. De acuerdo con la teoría cinética de la materia, las moléculas ganan energía cinética cuando son calentadas y esto permite que una molécula calentada “vuele” fuera del pozo. El calor puede ser proporcionado por medio de vapor, nitrógeno calentado o por microondas, entre otras técnicas.

Para la regeneración al vacío, las moléculas tendrán en algún momento suficiente energía como para escapar, siempre que los choques entre ellas no las envíen de nuevo hacia el pozo. Por lo tanto, la desorción puede ser realizada ya sea calentando el material adsorbido o evacuando el espacio sobre él. Existe un equilibrio entre las moléculas atrapadas y las que escapan.

Impartirle al material adsorbido la energía cinética para escapar o desorber es parte de la regeneración del adsorbente. Esta regeneración debe ser llevada a cabo antes de que todo el adsorbente sea incapaz de retener más, y de que pueda ser utilizado de nuevo. La otra parte de la regeneración es el secado, el enfriamiento o la preparación del adsorbente de alguna otra manera para adsorber de nuevo al COV (Agencia de Protección Ambiental, USA, 1999).

1.5.6. Isoterma de adsorción

Cada adsorbente tiene una capacidad de adsorción a la que se le conoce como “isoterma de adsorción”. Históricamente, con el carbón, la isoterma se utilizaba para medir las libras de contaminante por libra de adsorbente que podía ser adsorbida a una temperatura dada. Sin embargo, la isoterma de adsorción también es una función de la concentración del contaminante, medida por la presión parcial del vapor y es también una función de la presión ambiental total alrededor del adsorbente.

El número de moléculas que pueden ser almacenadas en el “pozo” depende de la presión, correspondiendo a mayor presión un menor espacio entre las moléculas adsorbidas. La isoterma de adsorción todavía se define como las libras de material que pueden ser adsorbidas por libra de adsorbente. Los sistemas de regeneración térmica utilizan la isoterma de temperatura; los sistemas de regeneración al vacío utilizan la isoterma de presión total y parcial, y los sistemas de regeneración por oscilación de presión, utilizan la isoterma de presión ambiental total.

La “isoterma” es realmente una función de todas estas variables. Por lo tanto, es realmente una función compleja que forma por lo menos una superficie tridimensional, en vez de ser una constante o una gráfica de dos dimensiones. La isoterma puede ser una función ya sea lineal o altamente no lineal, dependiendo del adsorbente, la presión, y el material que está siendo adsorbido.

La isoterma de adsorción también es una función de la cantidad de área de adsorción que pueden alcanzar las moléculas del COV.

Los poros en la superficie permiten la entrada al área interior de cada uno de estos adsorbentes. Es en el interior donde existe la mayor área de adsorción.

El carbón contiene poros que conducen a poros más pequeños, los que a su vez conducen a poros aún más pequeños. Esto aparentemente continúa ad infinitum en el carbón y la mayor parte de la superficie interna está en estos microporos.

Las zeolitas tienen poros uniformes que son parte de su estructura cristalina. Los polímeros tienen poros dentro de un rango de tamaño, pero generalmente no tienen los pequeños microporos. Por tanto, la isoterma de adsorción es diferente para cada tipo de adsorbente y cada tipo de contaminante (Agencia de Protección Ambiental, USA, 1999).

1.5.7. Selección del adsorbente

Existen muchos tipos de polímeros, de carbón y zeolitas adsorbentes. Documentar todas estas variaciones haría de este documento todo un tomo y lo convertiría en un manual de operaciones en vez de un documento de conceptos.

No se tiene la intención de describir adecuadamente todas las variaciones con tanto detalle. Solamente se puede tratar acerca de las propiedades generales y permitir que las selecciones específicas sean hechas por los diseñadores y sus clientes, con la ayuda de los manuales correspondientes.

De interés primordial es el tamaño molecular más grande a ser adsorbido contra el tamaño de los poros del absorbente. Esto es particularmente importante con las zeolitas, en las que los poros uniformes pueden ser de cualquier tamaño, desde 3 hasta 30 Ångstroms (0.3 a 3 nanómetros), dependiendo del tipo de zeolita. No debe esperarse que las zeolitas proporcionen alguna área de adsorción para moléculas mayores que sus poros, ni para moléculas por las cuales no tengan afinidad.

El carbón y los polímeros deben también tener poros más grandes que la molécula más grande a ser adsorbida. Sin embargo, debido al rango más amplio de tamaño de los poros en el carbón y los polímeros, este criterio es menos estricto de lo que es para la zeolita.

El área de adsorción a ser alcanzada por vía de los poros no debe ser tomada en cuenta si la molécula a ser adsorbida no puede ni alcanzarla ni ser desorbida de esta.

Independientemente del método de regeneración, el área de adsorción no puede ser regenerada cuando la molécula adsorbida brinca desde un pozo en un lado del poro hasta un pozo del otro lado del poro. Esto puede ocurrir en los microporos del carbón y de algunos polímeros y evitaría la desorción de las áreas donde los microporos se vuelven demasiado pequeños.

La afinidad del adsorbente por algunos tipos de sustancias puede ser mucho mayor que la afinidad por otras. Como resultado, cuando hay una afinidad fuerte por algunas de las moléculas, las moléculas que tienen menor afinidad se retendrán con una menor capacidad de adsorción o serán liberadas en favor de las moléculas por las cuales la afinidad sea mayor.

El carbón, el cual no es ni completamente hidrofóbico ni hidrofílico, retiene alguna superficie de adsorción con afinidad tanto por las moléculas polares como por las no polares. Debido a esto, la humedad tiene un efecto perceptible sobre el carbón. Un artículo de investigación hasta reporta que la desorción de COV del carbón ocurre mientras el vapor se condensa y el agua desplaza al COV.

Todas las zeolitas que existen en la naturaleza son hidrofílicas, teniendo una afinidad por las sustancias polares tales como el agua, pero las zeolitas sintéticas pueden ser hidrofílicas o hidrofóbicas.

Los polímeros son generalmente hidrofóbicos, a menos que sean producidos específicamente con otra afinidad. Por ejemplo, los bloques de copolímeros anfófilos pueden tener afinidades tanto hidrofílicas como hidrofóbicas. Por lo tanto, la afinidad debe ser considerada como parte de la selección de un adsorbente particular.

Algunos polímeros y las zeolitas hidrofóbicas son generalmente mucho menos sensibles a la humedad que los carbones y están también mucho menos sujetos a la posibilidad de incendio, desmoronamiento o pulverización. Por lo tanto, requieren ser reemplazados con mucha menor frecuencia. Los carbones son más baratos (al menos inicialmente).

El costo por libra de carbón es de aproximadamente \$2.00 dólares de EE.UU., lo cual es hasta 20 veces menos que el costo por libra ya sea de los polímeros o de las zeolitas. Sin embargo, la necesidad de reemplazar las zeolitas es muy rara y el reemplazo de los polímeros ocurre con una frecuencia solo ligeramente mayor.

El carbón necesita ser reemplazado desde cada seis meses hasta cada cinco años o cuando suceda algún incendio del lecho. La frecuencia depende del tipo de carbón, la frecuencia de la regeneración y de la temperatura a la cual se opera.

La desorción térmica de algunos polímeros adsorbentes fue evaluada por la compañía General Electric Company y se observó que estos desorben más rápidamente que el carbón, que tienen una mayor capacidad de adsorción ya sea a una humedad alta o baja después del acondicionamiento y que desorben a temperaturas más bajas. La temperatura máxima de desorción debe ser mayor que el punto de ebullición del COV, pero no exceder al punto de fusión del polímero.

La temperatura máxima de desorción es menos limitante para el carbón, el cual puede elevarse a temperaturas mucho más altas (121 a 177 °C) sin fundirse. Cuando la temperatura excede este rango, el carbón frecuentemente cataliza reacciones de oxidación. Para las zeolitas se usa comúnmente la misma temperatura máxima, pero el límite real depende ya sea de la temperatura de pirólisis, de la temperatura de catalización de los COV adsorbidos o del rango de temperaturas en el cual la estructura cristalina de la zeolita es estable. Se considera que este rango de temperaturas metaestables es por lo general de hasta aproximadamente 534 °C (1000°F).

1.5.8. Zona de transferencia de masa

La zona de transferencia de masa (ZTM), existe en todos los adsorbentes. En la ZTM, la concentración de COV en el aire va desde el 100% de concentración de vapor a la entrada, hasta la menor presión de vapor disponible en equilibrio con el adsorbente desorbido.

La profundidad del lecho es la dimensión del adsorbente en la dirección del flujo del aire y la ZTM es por lo general mucho más corta que la profundidad del lecho. La ZTM se mueve a través del lecho a medida que este alcanza su capacidad (se llena la isoterma de adsorción). Corriente arriba de la ZTM, el lecho ha alcanzado su capacidad, mientras que corriente abajo, el lecho permanece esencialmente sin adsorber.

La saturación ocurre cuando la ZTM llega al final del lecho de adsorbente, corriente abajo. La saturación se observa como una elevación en la concentración de vapor de COV que abandona el lecho, lo cual puede ocurrir a diferentes tiempos para diferentes COV.

Los adsorbentes de todos los tipos comparten una característica con las columnas utilizadas en la cromatografía de gases, puesto que estas también utilizan la adsorción.

En cada sistema, el material adsorbido se desorberá espontáneamente y emigrará corriente abajo con el flujo de gas. Esto es causado por el gradiente de presión, el cual es intencionalmente muy bajo cuando los sistemas de adsorción son utilizados como tecnología de control de emisiones y más bien alto, en las columnas de adsorción en la cromatografía de gases.

Esta migración de contaminantes es por lo general lo suficientemente lenta que puede ser despreciada durante el control de las emisiones. Sin embargo, esta propiedad define un tiempo máximo absoluto para la adsorción antes de regenerar el lecho.

La saturación es realmente un proceso gradual, porque el equilibrio entre la presión de vapor y el adsorbente está variando continuamente.

De este modo, la saturación puede ser definida como cualquier elevación notable en la concentración del efluente.

La ZTM también emigrará hacia la saturación independientemente de la carga de COV. Un pico en la concentración de entrada de COV, junto con la migración de la ZTM, permitirá que el COV se distribuya y reducirá la concentración que será desorbida a la saturación.

Un ejemplo de cómo pudiera un adsorbente utilizar la característica de migración de la ZTM, es en el flujo de aire de un extractor en una planta que maneja mercaptano.

El gas natural es inoloro y se le añade mercaptano para crear una indicación por el olfato (olor) en caso de fuga.

Si un derrame de mercaptano da lugar a emisiones en concentraciones mayores a una parte por billón, la gente podría olerlo y alarmarse, porque pensarían que existe una fuga de gas. Por lo tanto, los extractores en los que se maneja el mercaptano están equipados con un adsorbente de tamaño adecuado.

Este adsorbente captura cualquier vapor proveniente de derrames y, cuando la ZTM emigra hacia la saturación, el mercaptano es liberado a una concentración más baja en este caso. Esto es debido a que no fue una emisión continua de mercaptano; el adsorbente no agotó su capacidad y por lo tanto, la saturación ocurrió a una concentración menor que el valor del umbral de detección del olor. Para este propósito, la desorción o la regeneración no son necesarias a menos que los derrames sean demasiado frecuentes (Agencia de Protección Ambiental, USA, 1999).

1.5.9. Capacidad de trabajo

Los “ciclos de acondicionamiento” corresponden al número de ciclos (usualmente alrededor de cinco), que se requieren para alcanzar una cantidad estable de adsorción y de regeneración. El carbón, después de alcanzar los ciclos de acondicionamiento, es capaz de adsorber alrededor del 50% de la cantidad que fue adsorbida por el material virgen.

Las zeolitas son capaces de adsorber alrededor del 90% de la cantidad adsorbida por el material virgen. Los polímeros pueden variar en el rango del 50% al 90%. Esta “isoterma acondicionada” también define la “capacidad de trabajo” del adsorbente.

El hecho de que el carbón y algunos polímeros típicamente resorban solo el 50% de lo que adsorbe el material virgen, se estima que sea debido a la recaptura continua de moléculas (esto es, la reducción de la presión de vapor), en los microporos. El COV podría ser removido de estos microporos únicamente por medio de pirólisis, la cual destruiría el COV, además de que destruiría el polímero o alteraría las propiedades del carbón.

Las zeolitas tienen un tamaño de poros uniforme, por lo que no exhiben este fenómeno. Los polímeros tienen un rango más amplio de tamaños de poro y de cierta manera son similares a los carbones, pero se cree que algunos polímeros carecen de los pequeñísimos microporos. El carbón también muestra una distribución del COV en función del tiempo desde los macroporos hasta los microporos. Las zeolitas y los polímeros muestran esta distribución dependiente del tiempo, en un grado mucho menos observable.

La “capacidad de trabajo” del adsorbente está determinada por la diferencia entre el nivel que tiene al regenerarse (desorbido), una vez acondicionado, y la isoterma de adsorción completa del adsorbente. Por tanto, el efecto del acondicionamiento debe ser considerado al determinar el tamaño del lecho de adsorbente.

El efecto del acondicionamiento puede requerir hasta el doble de adsorbente en el lecho. Puesto que la regeneración debiera ocurrir solamente cada 8 o 16 horas de operación, la capacidad del (los) lecho(s) puede ser determinada por la concentración de COV, la velocidad del flujo de aire, el peso del adsorbente en el (los) lecho(s), el tipo de adsorbente y la “capacidad de trabajo” del adsorbente. De esta manera, la “capacidad de trabajo” puede tener un efecto significativo sobre el costo de la instalación, operación y mantenimiento de un sistema de adsorción.

2. MÉTODOS Y TÉCNICAS

2.1. Metodología

Todo el proceso metodológico utilizado, se explica a continuación.

2.1.1. Tipo de estudio

Los estudios exploratorios se efectúan, normalmente, cuando el objetivo es examinar un tema o problema de investigación poco estudiado o que no ha sido abordado antes (Hernández, 1997). De acuerdo con este concepto, el presente estudio se define como exploratorio, puesto que para la situación particular, es decir, para el tipo de industria, en el municipio de San Juan Sacatepéquez, Guatemala, nunca se había realizado este tipo de medición; por lo que dicho estudio servirá para aumentar el grado de familiaridad con fenómenos no estudiados a nivel nacional, identificando relaciones potenciales entre variables y estableciendo el precedente para investigaciones posteriores más rigurosas.

2.1.2. Variables

- **Independientes:**
 - Tiempo de toma de muestra: la cantidad en minutos de tiempo que se hará pasar aire por medio de una bomba a través de cada tubo de muestreo.

- Peso de carbón activado para tubo de muestreo: cantidad en miligramos que se agregara a cada sección del tubo de muestreo.
- Volumen de sulfuro de carbono: cantidad en mililitros que se usarán de desorbente para cada muestra en los tubos de muestreo.
- **Dependientes:**
 - Volumen de aire muestreado: cantidad en metros cúbicos.
 - Composición de la muestra: cantidad porcentual que expresa la proporción de presencia de cada componente sobre el total de la muestra, según cromatografía de gases.
 - m_s es la cantidad total de analito presente en la muestra, en miligramos.
 - c_f es la concentración de analito en miligramos por mililitro en la sección frontal del tubo de muestreo.
 - C_{aire} es la concentración de analito en el aire muestreado, en miligramo por metro cúbico.

2.1.3. Muestreo

La fábrica de muebles donde se realizó el estudio se encuentra en el municipio de San Juan Sacatepéquez (figuras 2 y 3), dentro del casco urbano, aledaño a viviendas y al cementerio de la localidad.

Se dedican a hacer muebles finos de maderas como palo blanco, cedro y caoba; producen alrededor de 5 hasta 10 muebles completos diarios, que van desde camas, amueblados de sala, roperos, conjuntos de comedor y complementos.

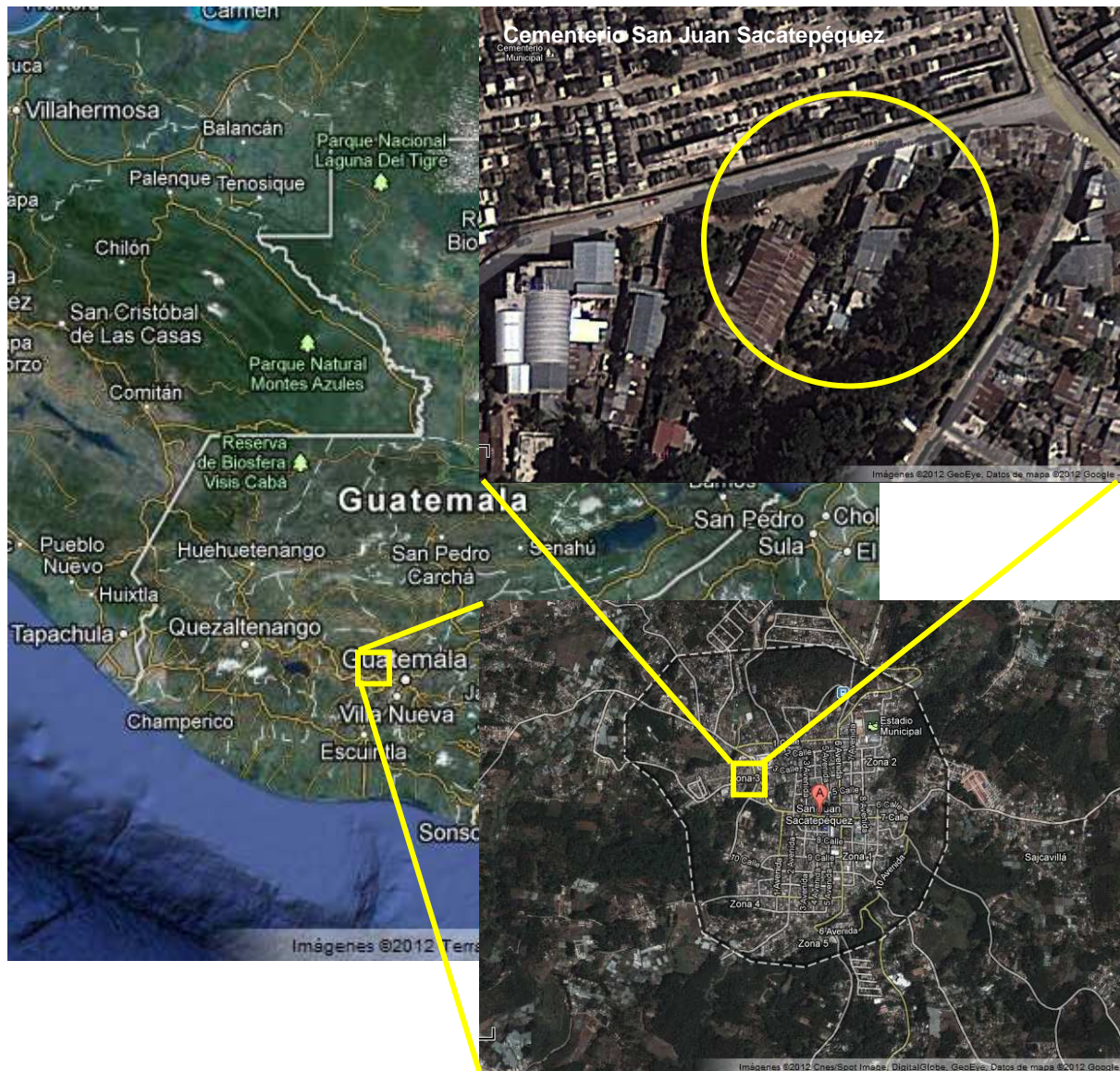
Figura 2. **Fábrica de muebles**



Fuente: elaboración propia.

La cantidad de muestras que se tomaron fue de 10, dividiéndose en grupo de 3, en tres lugares diferentes. El primero es dentro del taller de aplicación de barnices (figura 4), donde los trabajadores están expuestos directamente a los vapores de esta aplicación. Esta área se encuentra aislada de las demás por una separaciones de plástico, sin sellos de ningún tipo, colindando con el taller de carpintería y armado de los muebles y con salida directa al ingreso de camiones, por donde tiene siempre ventanas abiertas para la ventilación. En esta área trabajan tres empleados durante 8 horas al día, de lunes a viernes.

Figura 3. Ubicación de la fábrica de muebles



Fuente: www.maps.google.com.gt. Consulta: mayo de 2012.

Figura 4. Taller de barnizado



Fuente: elaboración propia.

Al primer grupo de muestras se le denominó “A”, en la Figura 5 se observa el muestreo.

Figura 5. Taller de barnizado y toma de las muestras “A”



Fuente: elaboración propia.

El segundo grupo de muestras se denominó “B”, y se realizó en el taller de carpintería (figura 6), que se encuentra aledaño al taller de barnizado, únicamente aislados por una película de plástico sin sellos herméticos. En todos los casos las muestras se hicieron por triplicado.

Figura 6. Toma de muestras “B”, en taller de carpintería



Fuente: elaboración propia.

El tercer grupo de muestras se denominó “C” y fue tomada en las oficinas administrativas (figura 7), que se encuentran a 6 metros del taller de barnizado, totalmente aisladas por paredes, pero con ventanas que dan hacia el mismo pasillo abierto al aire libre donde entran los camiones, de terracería.

Se puede observar un esquema de distribución de la fábrica de muebles en el anexo B.

Figura 7. **Toma de muestras “C”, en oficinas administrativas**



Fuente: elaboración propia.

2.2. Técnicas

La muestra se recoge haciendo pasar una cantidad conocida de aire a través de un tubo relleno de carbón activo, mediante una bomba de muestreo personal, en un intervalo de concentración global de 3 mg/m^3 a 3000 mg/m^3 , quedando los vapores orgánicos adsorbidos sobre el carbón. Posteriormente, se desorben con sulfuro de carbono y se analiza la disolución resultante en un cromatógrafo de gases, equipado con detector de ionización de llama. Se obtienen las áreas de los picos de los analitos de interés y del patrón interno, determinando la cantidad presente en la muestra. A partir de la masa de los analitos presentes en la muestra se obtienen las concentraciones ambientales.

2.2.1. Reactivos y productos

- Gases
 - Nitrógeno purificado
- Reactivos (Todos los reactivos deben ser de calidad analítica)
 - Sulfuro de carbono: debe estar exento de compuestos que coeluyan con los analitos de interés, en la Figura 8 se muestra el reactivo utilizado.

Figura 8. Sulfuro de carbono utilizado como desorbente



Fuente: elaboración propia.

2.2.2. Aparatos y material

- Aparatos y material para la toma de muestra:
 - Bomba de muestreo: se requiere una bomba de muestreo portátil capaz de mantener un funcionamiento continuo durante todo el tiempo de muestreo. El caudal de la bomba ha de mantenerse constante dentro de un intervalo $\pm 5\%$. Para conectar la bomba y el tubo de carbón (o el soporte del tubo) se utilizará un tubo de goma o de plástico de longitud y diámetro adecuados, a fin de evitar estrangulamientos y fugas en las conexiones. Para la calibración de la bomba se utilizará preferentemente un medidor de burbuja de jabón. El instrumento utilizado para la toma de la muestra (figura 9), fue una bomba de muestreo de aire marca SKC, modelo PCXR8, con rango de flujo de 1000 a 5000 ml/min, con ajuste de tiempo de muestreo. Las características del equipo se presentan en el apéndice A.

Figura 9. **Bomba de muestreo SKC, modelo PCXR**



Fuente: www.skcinc.com. Consulta: septiembre de 2012.

Se utilizaron tubos de vidrio de 7 cm de longitud, 6 mm de diámetro externo y 4 mm de diámetro interno, conteniendo dos secciones de carbón activo separadas por una porción de espuma de poliuretano de 2 mm. La primera sección contiene 100 mg de carbón activo 20/40 mallas y la segunda 50 mg (tubo tipo NIOSH). Entre el extremo de salida del tubo y la segunda sección se coloca una porción de 3 mm de espuma de poliuretano. Se dispondrá de algún elemento de sujeción a fin de mantener el tubo de muestreo en disposición vertical en la zona de respiración del trabajador.

El pesaje del carbón activado se hizo con una balanza analítica de precisión de ± 0.0001 gramo; en la figura 10, se muestra este procedimiento. Se tapó esta sección con espuma de poliuretano hasta el tope del tubo y se cerraron ambos extremos del mismo con sellos de papel parafilm. En la figura 11 se muestra el dispositivo de muestreo terminado.

Figura 10. **Pesado de carbón en balanza analítica**



Fuente: elaboración propia.

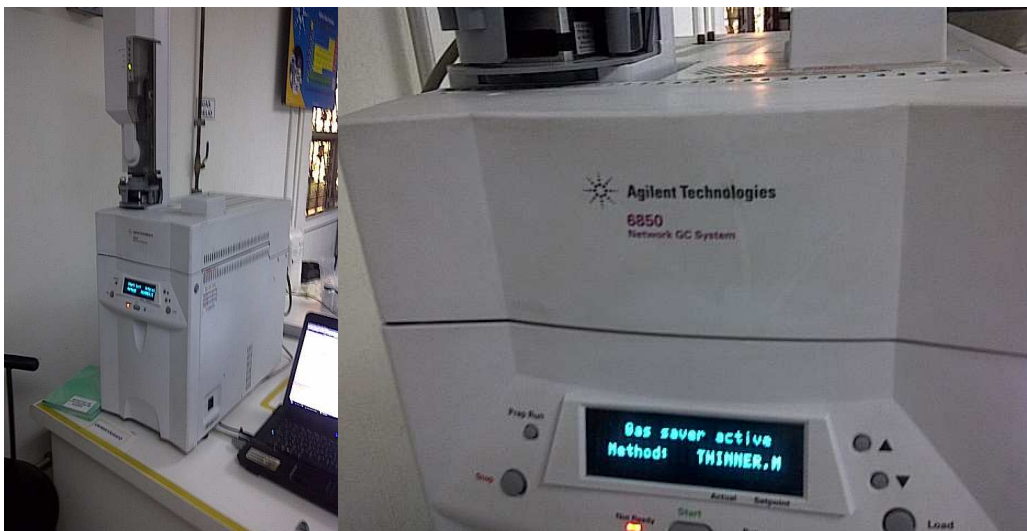
Figura 11. **Tubo de muestreo**



Fuente: elaboración propia.

- Aparatos y material para el análisis:
 - Tubos con tapón roscado: de 2 ml de capacidad o mayores, con junta recubierta de politetrafluoroetileno.
 - Cromatógrafo de gases equipado con detector de ionización de llama: capaz de detectar una inyección de 5 ng de tolueno con una relación señal-ruido de, 5 a 1. Para el análisis cromatográfico se utilizó un cromatógrafo de cromatografía líquida de alta eficacia (HPLC, por sus siglas en inglés) Agilent Technologies, serie 5850 (figura 12); las especificaciones del equipo se muestran en el apéndice A.

Figura 12. Cromatógrafo utilizado para el análisis químico



Fuente: elaboración propia.

La columna cromatográfica es capaz de separar los analitos de interés de cualquier otro componente.

La columna que se utilizó es la DB-WAX (figura 13); esta columna de alta polaridad está diseñada para el análisis de disolventes, compuestos aromáticos, glicoles, aceites esenciales, sabores, fragancias y ácidos grasos volátiles.

El rango de temperatura de operación comienza a 20 °C (4 °F) y tiene un límite superior de temperatura de 260 °C (500 ° F). Esto permite una mejor resolución en analitos de bajo punto de ebullición. (11).

Figura 13. **Empaque de la columna utilizada para la cromatografía**



Fuente: elaboración propia.

2.2.3. **Proceso del experimento**

- **Fase 1:** posterior a la adquisición de los materiales y equipo necesario se procede al muestreo.
 - Toma de muestra:
 - Calibrar la bomba portátil conectada a un tubo de muestreo en condiciones representativas de la toma de muestra, utilizando un medidor de caudal externo (medidor de burbuja de jabón). En todos los casos el flujo se calibró a

1000 mL/min, durante un periodo constante de muestreo de 15 minutos.

- Conectar la bomba al tubo de carbón con un tubo de goma o de plástico de tal forma que la sección menor del tubo (segunda sección) sea la más próxima a la bomba. Evitar toda conexión anterior a la entrada del tubo de carbón, a fin de evitar posibles adsorciones de contaminantes en la misma, que conlleven a errores en las determinaciones.
- Colocar verticalmente el tubo de muestreo en la zona de respiración del trabajador (por ejemplo, sujeto a la solapa). La bomba de muestreo se sujeta en el cinturón del trabajador o en su bolsillo. En el caso de muestras estáticas debe elegirse un lugar de muestreo adecuado.
- Poner en marcha la bomba y controlar la duración del muestreo. El volumen máximo a muestrear depende de muchos factores que deben tenerse en cuenta a la hora de realizar la toma de muestras.
- Finalizado el muestreo, desconectar la bomba, retirar los tubos de muestreo y cerrar ambos extremos con los tapones de polietileno. Etiquetar convenientemente cada tubo.
- Las muestras pueden ser enviadas para su análisis posterior refrigeradas para no favorecer la migración de los analitos hacia la segunda sección de carbón activo. En

cualquier caso, las muestras deben ser enviadas en recipientes adecuados a fin de evitar roturas y pérdidas.

- Preparación de muestras: se añadió 1 ml de sulfuro de carbono a un tubo roscado que se cierra inmediatamente. Se añadió la primera sección de carbón al tubo con la disolución desorbente y se volvió a cerrar. Se agita el tubo ocasionalmente durante un período de 30 minutos para asegurarse de que la desorción sea máxima. Se repite el mismo procedimiento para la segunda sección de carbón utilizando otro tubo roscado. Los tubos roscados (figura 14) se identificaron con la misma codificación de los tubos de muestreo y dado que el equipo de análisis cromatográfico se encuentra en otro laboratorio, se procedió a su transporte refrigerado, para evitar la evaporación del sulfuro de carbono que es extremadamente volátil.

Figura 14. **Tubos con muestras de carbón disueltas en sulfuro de carbono**



Fuente: elaboración propia.

- **Fase 2:** posterior al tratamiento de las muestras, se llevan al análisis cromatográfico para la determinación de la presencia de COV.
 - Análisis cromatográfico: inyectar una alícuota de 1 a 5 µl tanto de las disoluciones resultantes de las desorciones del tubo de carbón como de las disoluciones patrón en el cromatógrafo de gases. Determinar las áreas de los picos de los analitos de interés y del patrón interno.

- **Fase 3:** ya obtenidos los resultados de la cromatografía de gases se hace la tabulación y análisis de los datos.
 - Determinación de la cantidad de analito presente en la muestra: una vez determinada la concentración de analito en la disolución de desorción, se calcula la cantidad en mg de compuesto en el tubo de muestreo mediante la siguiente expresión:

$$m_s = c_f \times V_d$$

Donde:

m_s es la cantidad total de analito presente en la muestra, en mg.

c_f es la concentración de analito en mg/ml en la sección frontal del tubo de muestreo.

V_d es el volumen de disolución desorbente, en ml.

- Determinación de la concentración de analito en aire: se calcula la concentración de analito en aire muestreado, en miligramos por metro cúbico, por medio de la siguiente ecuación:

$$C_{\text{aire}} = \frac{m_s}{V}$$

Donde:

C_{aire} es la concentración de analito en el aire muestreado, en mg/m^3 .

m_s es la cantidad total de analito presente en la muestra, en mg.

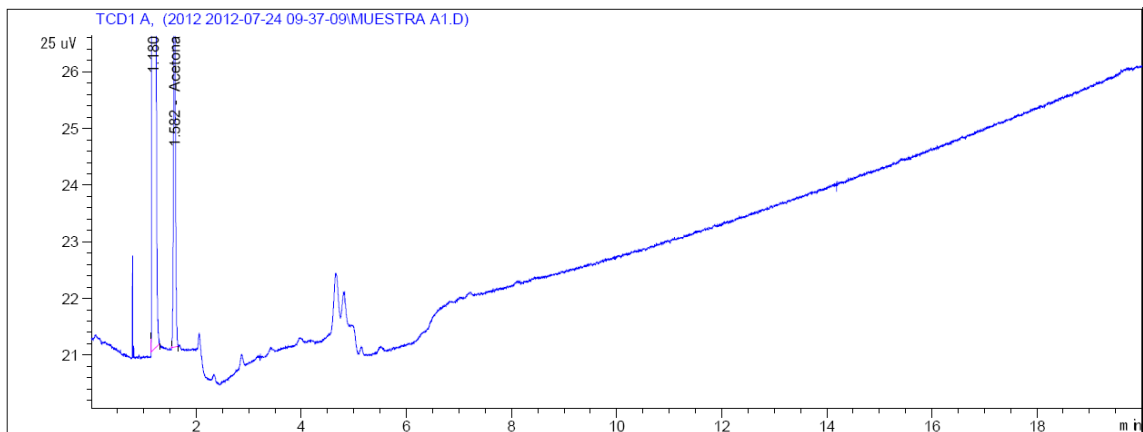
V es el volumen de aire muestreado, en m^3 .

3. RESULTADOS

3.1. Resultados de cromatografía

A continuación se presentan los gráficos obtenidos del análisis cromatográfico a las muestras. Posterior a cada gráfico se adjunta la tabla de resultados que proporcionó el equipo, donde interpreta los porcentajes de composición de las muestras.

Figura 15. **Gráfico de composición según cromatografía de la muestra A1**



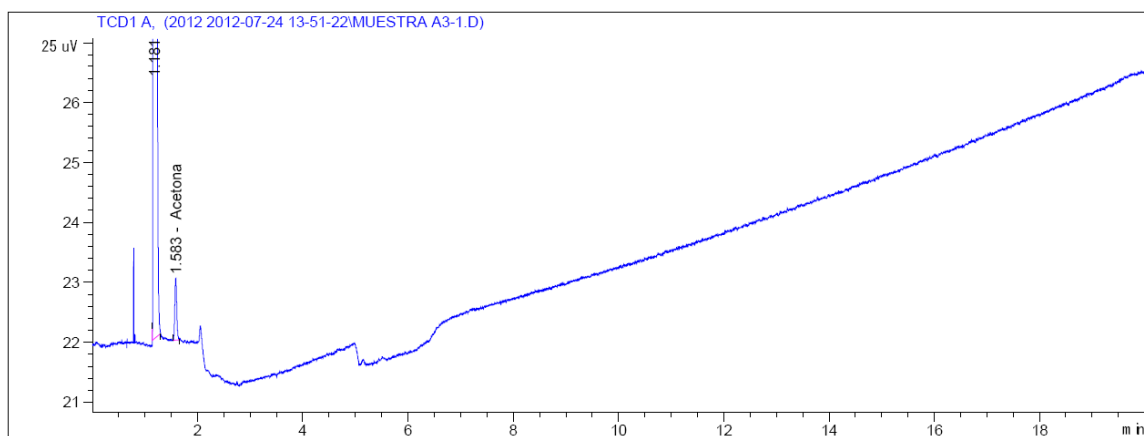
Fuente: impresión de cromatógrafo Agilent Technologies, serie 5850.

Tabla V. Resultados de la composición según cromatografía de la muestra A1

RetTime [min]	Type	Area [25 uV*s]	Amt/Area	Norm %	Grp	Name
0.778	-	-	-	-	-	Isopentano
0.872	-	-	-	-	-	Hexano 1
0.897	-	-	-	-	-	Hexano 2
1.023	-	-	-	-	-	Hexano 3
1.070	-	-	-	-	-	Heptano
1.180	BB S	7968.67920	5.30973e-2	99.778347	?	
1.582	BB	17.04441	5.51462e-2	0.221653		Acetona
1.900	-	-	-	-	-	THF
2.157	-	-	-	-	-	Acetato de Etilo
2.329	-	-	-	-	-	MEK
2.333	-	-	-	-	-	Metanol

Fuente: impresión de cromatógrafo Agilent Technologies, serie 5850.

Figura 16. Gráfico de composición según cromatografía de la muestra A2



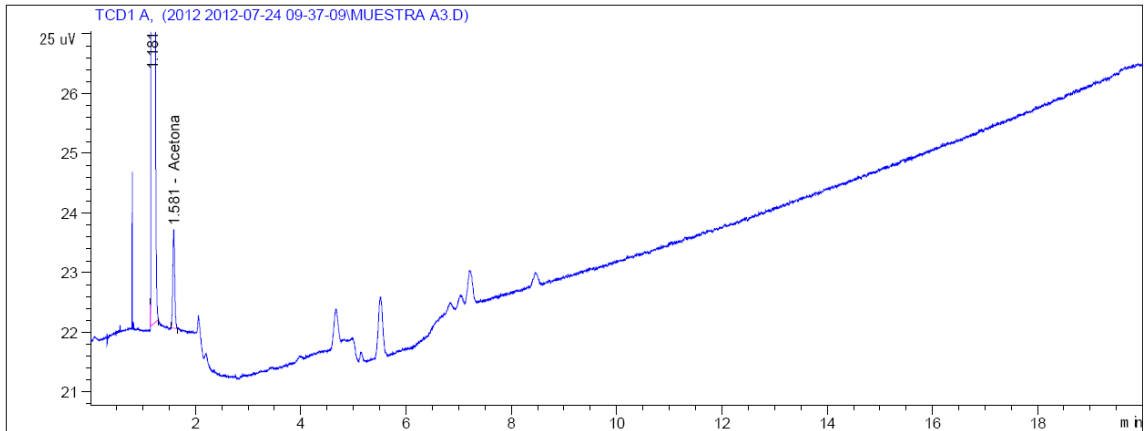
Fuente: impresión de cromatógrafo Agilent Technologies, serie 5850.

Tabla VI. **Resultados de la composición según cromatografía de la muestra A2**

RetTime [min]	Type	Area [25 uV*s]	Amt/Area	Norm %	Grp	Name
0.778		-	-	-		Isopentano
0.872		-	-	-		Hexano 1
0.897		-	-	-		Hexano 2
1.023		-	-	-		Hexano 3
1.070		-	-	-		Heptano
1.181	BB S	6530.12793	5.30973e-2	99.958424	?	
1.583	BB	2.61520	5.51462e-2	0.041576		Acetona
1.900		-	-	-		THF
2.157		-	-	-		Acetato de Etilo
2.329		-	-	-		MEK
2.333		-	-	-		Metanol

Fuente: impresión de cromatógrafo Agilent Technologies, serie 5850.

Figura 17. **Gráfico de composición según cromatografía de la muestra A3**



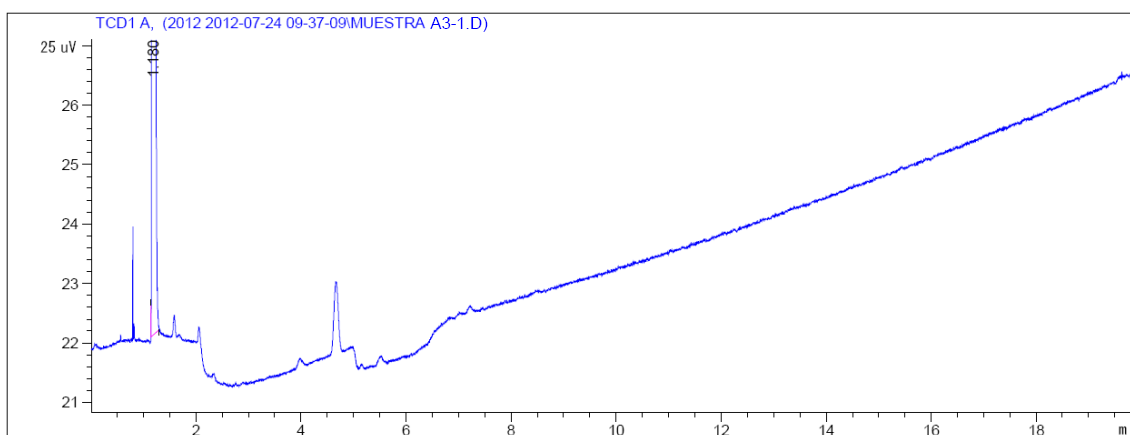
Fuente: impresión de cromatógrafo Agilent Technologies, serie 5850.

Tabla VII. **Resultados de la composición según cromatografía de la muestra A3**

RetTime [min]	Type	Area [25 uV*s]	Amt/Area	Norm %	Grp	Name
0.778	-	-	-	-	-	Isopentano
0.872	-	-	-	-	-	Hexano 1
0.897	-	-	-	-	-	Hexano 2
1.023	-	-	-	-	-	Hexano 3
1.070	-	-	-	-	-	Heptano
1.181	BB S	5967.70996	5.30973e-2	99.926724	?	
1.581	BB	4.21351	5.51462e-2	0.073276		Acetona
1.900	-	-	-	-	-	THF
2.157	-	-	-	-	-	Acetato de Etilo
2.329	-	-	-	-	-	MEK
2.333	-	-	-	-	-	Metanol

Fuente: impresión de cromatógrafo Agilent Technologies, serie 5850.

Figura 18. **Gráfico de composición según cromatografía de la muestra A3-1**



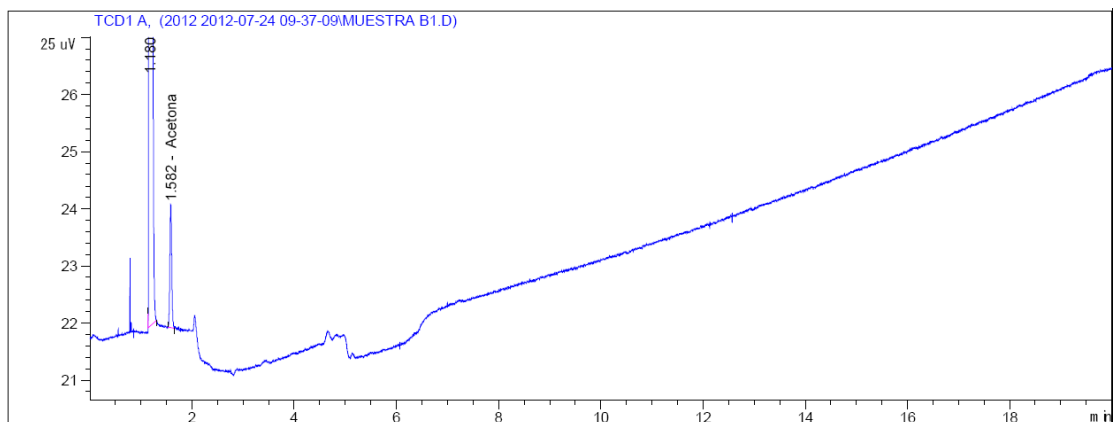
Fuente: impresión de cromatógrafo Agilent Technologies, serie 5850

Tabla VIII. **Resultados de la composición según cromatografía de la muestra A3-1**

RetTime [min]	Type	Area [25 uV*s]	Amt/Area	Norm %	Grp	Name
0.778		-	-	-		Isopentano
0.872		-	-	-		Hexano 1
0.897		-	-	-		Hexano 2
1.023		-	-	-		Hexano 3
1.070		-	-	-		Heptano
1.180	BB S	7569.73926	5.30973e-2	100.000000	?	

Fuente: impresión de cromatógrafo Agilent Technologies, serie 5850.

Figura 19. **Gráfico de composición según cromatografía de la muestra B1**



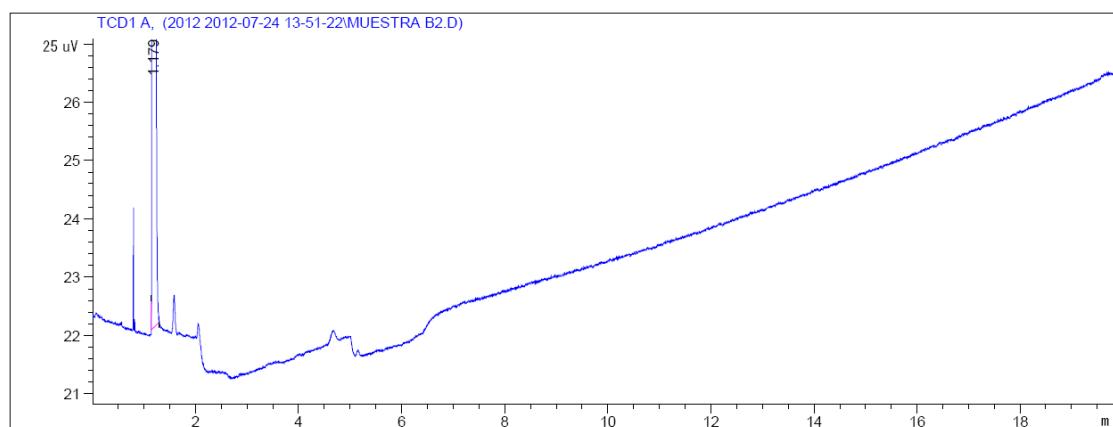
Fuente: impresión de cromatógrafo Agilent Technologies, serie 5850.

Tabla IX. **Resultados de la composición según cromatografía de la muestra B1**

RetTime [min]	Type	Area [25 uV*s]	Amt/Area	Norm %	Grp	Name
0.778	-	-	-	-	-	Isopentano
0.872	-	-	-	-	-	Hexano 1
0.897	-	-	-	-	-	Hexano 2
1.023	-	-	-	-	-	Hexano 3
1.070	-	-	-	-	-	Heptano
1.180	BB S	7337.34229	5.30973e-2	99.921796	?	?
1.582	BB	5.52921	5.51462e-2	0.078204		Acetona
1.900	-	-	-	-	-	THF
2.157	-	-	-	-	-	Acetato de Etilo
2.329	-	-	-	-	-	MEK
2.333	-	-	-	-	-	Metanol

Fuente: impresión de cromatógrafo Agilent Technologies, serie 5850.

Figura 20. **Gráfico de composición según cromatografía de la muestra B2**



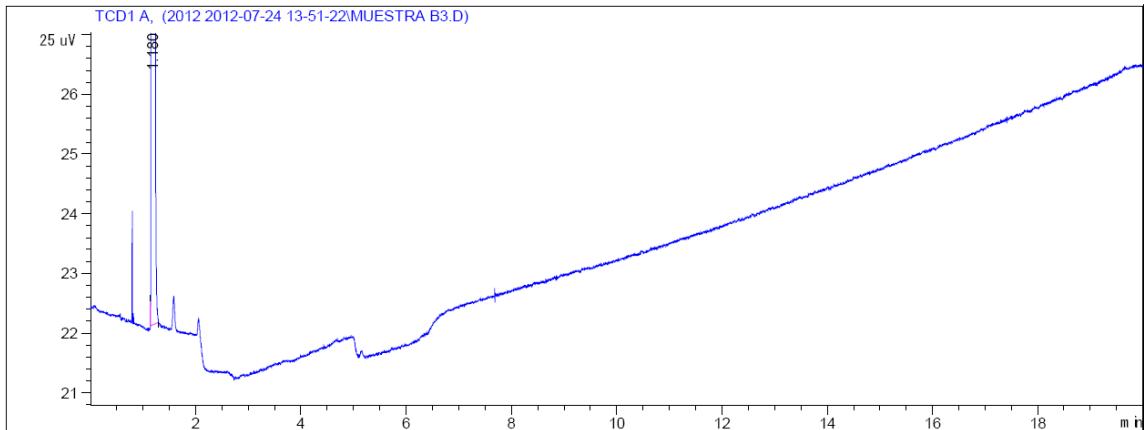
Fuente: impresión de cromatógrafo Agilent Technologies, serie 5850.

Tabla X. **Resultados de la composición según cromatografía de la muestra B2**

RetTime [min]	Type	Area [25 uV*s]	Amt/Area	Norm %	Grp	Name
0.778		-	-	-		Isopentano
0.872		-	-	-		Hexano 1
0.897		-	-	-		Hexano 2
1.023		-	-	-		Hexano 3
1.070		-	-	-		Heptano
1.179	BB S	7796.07520	5.30973e-2	100.000000	?	

Fuente: impresión de cromatógrafo Agilent Technologies, serie 5850.

Figura 21. **Gráfico de composición según cromatografía de la muestra B3**



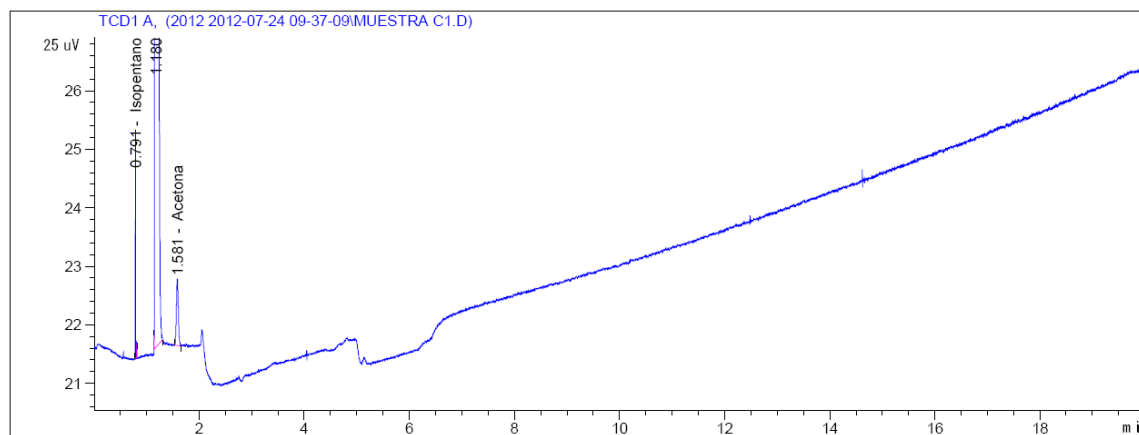
Fuente: impresión de cromatógrafo Agilent Technologies, serie 5850.

Tabla XI. **Resultados de la composición según cromatografía de la muestra B3**

RetTime [min]	Type	Area [25 uV*s]	Amt/Area	Norm %	Grp	Name
0.778	-	-	-	-	-	Isopentano
0.872	-	-	-	-	-	Hexano 1
0.897	-	-	-	-	-	Hexano 2
1.023	-	-	-	-	-	Hexano 3
1.070	-	-	-	-	-	Heptano
1.180	BB S	5020.62646	5.30973e-2	100.000000	?	

Fuente: impresión de cromatógrafo Agilent Technologies, serie 5850.

Figura 22. **Gráfico de composición según cromatografía de la muestra C1**



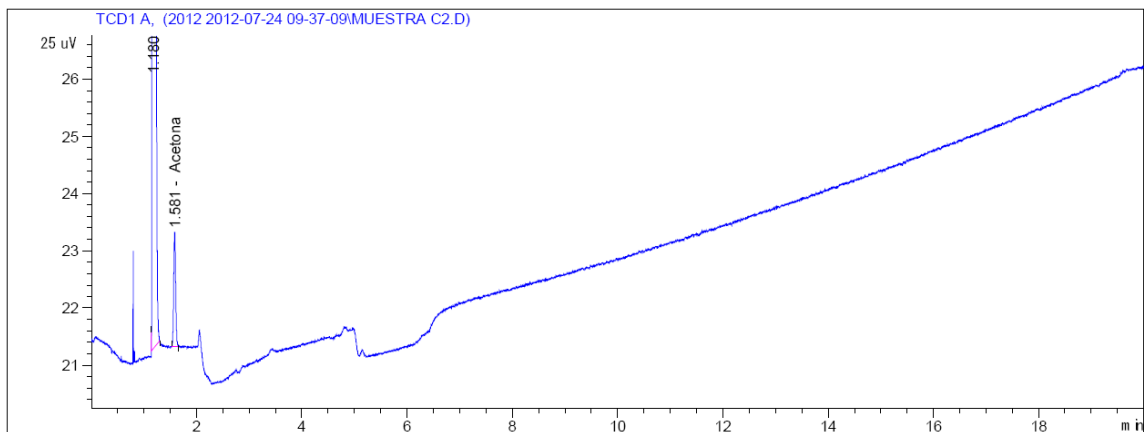
Fuente: impresión de cromatógrafo Agilent Technologies, serie 5850.

Tabla XII. **Resultados de la composición según cromatografía de la muestra C1**

RetTime [min]	Type	Area [25 uV*s]	Amt/Area	Norm %	Grp	Name
0.791	BB	1.46956	1.00000e-1	0.035575		Isopentano
0.872		-	-	-		Hexano 1
0.897		-	-	-		Hexano 2
1.023		-	-	-		Hexano 3
1.070		-	-	-		Heptano
1.180	BB S	7774.10156	5.30973e-2	99.925140		?
1.581	BB	2.94286	5.51462e-2	0.039286		Acetona
1.900		-	-	-		THF
2.157		-	-	-		Acetato de Etilo
2.329		-	-	-		MEK
2.333		-	-	-		Metanol

Fuente: impresión de cromatógrafo Agilent Technologies, serie 5850.

Figura 23. **Gráfico de composición según cromatografía de la muestra C2**



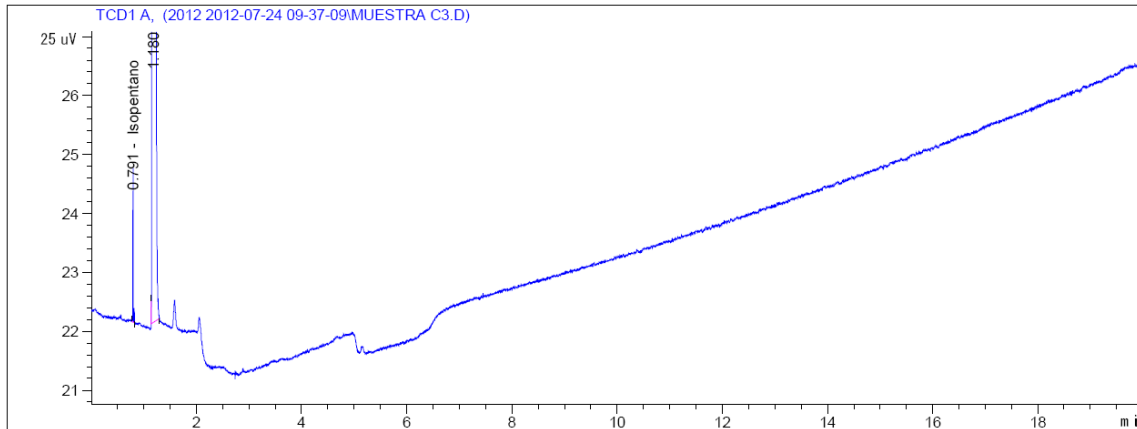
Fuente: impresión de cromatógrafo Agilent Technologies, serie 5850.

Tabla XIII. **Resultados de la composición según cromatografía de la muestra C2**

RetTime [min]	Type	Area [25 uV*s]	Amt/Area	Norm %	Grp	Name
0.778	-	-	-	-	-	Isopentano
0.872	-	-	-	-	-	Hexano 1
0.897	-	-	-	-	-	Hexano 2
1.023	-	-	-	-	-	Hexano 3
1.070	-	-	-	-	-	Heptano
1.180	BB S	7887.42627	5.30973e-2	99.931008	?	?
1.581	BB	5.24316	5.51462e-2	0.068992	Acetona	Acetona
1.900	-	-	-	-	THF	THF
2.157	-	-	-	-	Acetato de Etilo	Acetato de Etilo
2.329	-	-	-	-	MEK	MEK
2.333	-	-	-	-	Metanol	Metanol

Fuente: impresión de cromatógrafo Agilent Technologies, serie 5850.

Figura 24. **Gráfico de composición según cromatografía de la muestra C3**



Fuente: impresión de cromatógrafo Agilent Technologies, serie 5850

Tabla XIV. **Resultados de la composición según cromatografía de la muestra C3**

RetTime [min]	Type	Area [25 uV*s]	Amt/Area	Norm %	Grp	Name
0.791	BB	1.13194	1.00000e-1	0.033295		Isopentano
0.872		-	-	-		Hexano 1
0.897		-	-	-		Hexano 2
1.023		-	-	-		Hexano 3
1.070		-	-	-		Heptano
1.180	BB S	6400.62695	5.30973e-2	99.966705		?

Fuente: Impresión de cromatógrafo Agilent Technologies, serie 5850.

Tabla XV. **Resumen de resultados de cromatografía**

Muestra	Acetona (%)	Isopentano (%)	Sulfuro de carbono (%)
A1	0.221653	0	99.778347
A2	0.041576	0	99.958424
A3	0.073276	0	99.926724
A3-1	0	0	100
B1	0.078204	0	99.921796
B2	0	0	100
B3	0	0	100
C1	0.035575	0.039286	99.925140
C2	0.068992	0	99.931008
C3	0	0.033295	99.966705

Fuente: elaboración propia en base a resultados de cromatógrafo Agilent Technologies, serie 5850.

3.2. Cálculos

A continuación se presentan los cálculos efectuados en la presente investigación.

3.2.1. Determinación de la cantidad de analito presente en la muestra

Una vez determinada la concentración de analito en la disolución de desorción, se calcula la cantidad en mg de compuesto en el tubo de muestreo mediante la siguiente expresión:

$$m_s = c_f \times V_d$$

La concentración del analito viene dada por el resultado del cromatógrafo, por ejemplo para la muestra A1, el porcentaje de analito (acetona) es de 0.221653%, lo que significa que en cada mililitro de muestra se tienen 0.00221653 miligramos de acetona. Para calcular los COV totales, en los casos donde hay más de un solvente presente, se suman las cantidades de los mismos.

El total de disolución desorbente (sulfuro de carbono) que se utilizó para la desorción fue de un mililitro. Al multiplicar esta cantidad por los miligramos de COV encontrados, se obtiene la cantidad total en miligramos presente en la muestra. Para el caso del ejemplo A1, son 0.00221653 miligramos. Los resultados de este cálculo para las demás muestras se presentan en la tabla XVI.

3.3.2. Determinación de la concentración de analito en el aire

Se calcula la concentración de analito en aire muestreado, en miligramos por metro cúbico, por medio de la siguiente ecuación:

$$C_{\text{aire}} = \frac{m_s}{V}$$

El flujo de aire muestreado, fue de 1000mL/minuto (1L/min); el tiempo de toma de muestra fue en todos los casos de 15 minutos.

Dado que un litro corresponde a 0.001 metro cúbico, el volumen total de cada muestra es de 0.015 m³. Para el ejemplo de la muestra A1, se divide entonces la cantidad total de analito 0.00221653 mg dentro del volumen de aire muestreado de 0.015 m³, lo que da como resultado 0.147769 mg/m³.

Un miligramo corresponde a 0.001 microgramos (µg); por lo que este resultado se puede expresar como 147.769 µg/m³. Los resultados de este cálculo para las demás muestras se presentan en la tabla XVI.

Tabla XVI. **Resultados de cálculos**

Muestra	Acetona (%)	Isopentano (%)	Sulfuro de Carbono (%)	Total de COV mg/mL	mg de COV en tubo de muestreo	Concentración de COV en el aire mg/m ³	Concentración de COV en el aire µg/m ³
A1	0.221653	0.000000	99.778347	0.002217	0.002217	0.147769	147.768667
A2	0.041576	0.000000	99.958424	0.000416	0.000416	0.027717	27.717333
A3	0.073276	0.000000	99.926724	0.000733	0.000733	0.048851	48.850667
A3-1	0.000000	0.000000	100.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
B1	0.078204	0.000000	99.921796	0.000782	0.000782	0.052136	52.136000
B2	0.000000	0.000000	100.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
B3	0.000000	0.000000	100.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
C1	0.035575	0.039286	99.925140	0.000749	0.000749	0.049907	49.907333
C2	0.068992	0.000000	99.931008	0.000690	0.000690	0.045995	45.994667
C3	0.000000	0.033295	99.966705	0.000333	0.000333	0.022197	22.196667

Fuente: elaboración propia, basada en los resultados del cromatógrafo Agilent Technologies, serie 5850.

3.2. **Discusión de resultados**

De acuerdo con los resultados obtenidos, luego de los cálculos derivados de los datos de la cromatografía, se puede observar que el método fue efectivo en la detección y que las cantidades encontradas son coherentes al uso de esta metodología.

Según la normativa internacional, en general los COV totales no deberían exceder los 300 µg/m³ y ningún compuesto individual debe tener una concentración mayor a 10% de COV totales. Para los Estados Unidos tiene un valor de 200 µg/m³, Alemania de 300 µg/m³ y Australia de 500 µg/m³.

Los valores extremos donde se recomienda una intervención oficial son de 1000 a 3000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (5). De acuerdo con estos valores, se puede hacer el siguiente análisis: para las muestras "A", tomadas en el taller de pintura y aplicación de barnices, en todos los casos solo se detectó acetona, que es el componente mayoritario en los barnices aplicados; en algunos casos es exclusivo en las formulaciones, por lo que el resultado lo confirma.

Durante la toma de las muestras existieron intervalos naturales de pausas en la aplicación, por movimiento del mueble, cambio de tipo de recubrimiento (fondo y acabado) y la forma de aplicación que por momentos fue manualmente y otras por atomización.

En la muestra A1, se puede observar el dato de microgramos por metro cúbico de aire más alto del experimento; esto deriva del lugar donde fue tomada la muestra. A pesar de ser un nivel alto, no llega a exceder los límites inferiores más estrictos, como es el caso de los Estados Unidos, de 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; sin embargo se acerca, porque se obtuvo el resultado de 147.77 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Para el caso de la muestra A2, el nivel fue menor siendo de solo 27.72 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, y para la muestra A3 se detectó un nivel de 48.85 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; en estos dos últimos casos el nivel está muy por debajo del nivel de 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Esto se puede deber a la ventilación del taller, pues el mismo tiene ventanas que permiten la circulación del aire, disminuyendo el riesgo para el operario, pero dejando libres estos vapores a las áreas aledañas, pues no son capturados o tratados, lo que se demuestra en las siguientes mediciones. La muestra A3-1, se hizo desorbiendo la segunda sección de carbón del tubo de muestreo correspondiente a A3, esto para hacer la verificación de que se capturan todos los COV en la primera sección del tubo y no existe escape.

Se pudo observar que no existe presencia de COV en el análisis, con lo que se demuestra que el método de toma de muestra fue efectivo.

Para el caso del grupo de muestras "B", se tomaron en el área aledaña al taller de aplicación de recubrimientos, en este caso el taller de carpintería. La muestra B1 fue la única que mostró algún nivel de COV, siempre es el caso que solo se presenta acetona en un nivel de $52.14 \mu\text{g}/\text{m}^3$; este dato tampoco es mayor al máximo de $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$, sin embargo, existiendo un aislamiento entre las áreas, no debería haber fugas hacia las áreas circundantes, lo que demuestra que no es efectiva la separación.

Esto afecta a los trabajadores que no tienen contacto directo con la aplicación, pues siempre perciben, aunque en menor frecuencia, los COV en el aire de su área de trabajo. Para las muestras B2 y B3, no se detectaron COV, lo que demuestra que esta presencia se puede deber a momentos donde la corriente es mayor y lleva a un arrastre de la contaminación.

El grupo de muestras "C" fue tomado en la oficina administrativa que se encuentra a 6 metros del taller de barnizado, totalmente aisladas por paredes, pero con ventanas que dan hacia el mismo pasillo abierto al aire libre donde entran los camiones de terracería.

La muestra C1 demostró tener presencia de acetona e isopentano; este último no se utiliza en diluciones de recubrimientos para madera, pero dadas las condiciones de temperatura y tiempo de permanencia, este debe ser producto de la descomposición de otro solvente o mezcla de solventes, siempre de los recubrimientos.

Para el cálculo de COV totales se suman todos los componentes encontrados; para este caso se suma la cantidad de acetona e isopentano. Esto da un total de $49.91 \mu\text{g}/\text{m}^3$, cantidad que se encuentra por debajo del máximo de $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$. El mismo caso fue para la muestra C2, donde solo se encontró acetona en una cantidad de $45.99 \mu\text{g}/\text{m}^3$, y en la muestra C3, donde se encontró isopentano en una cantidad de $22.20 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ambas por debajo del máximo de $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

El dato relevante de estas tres muestras, es que siempre se encontraron COV, en un ambiente totalmente diferente a cualquier parte de la producción del mueble de madera y donde el personal expuesto a esta contaminación, no es operativo. Esto demuestra de que a pesar de que los niveles son más bajos al máximo permitido, la existencia de COV siempre implica un peligro a la salud, pues dado que las tres muestras ofrecieron el dato de esta existencia, se deduce que los niveles se mantienen todo el tiempo, prolongando la exposición a los mismos, siendo el factor de constancia y acumulación, muy peligroso a largo plazo.

A pesar de que en ningún caso los niveles exceden el máximo permitido, la composición de los COV totales, siempre tiene uno o dos compuestos (acetona e isopentano) con una concentración mayor al 10% del total, y según las normas internacionales, ningún compuesto individual debe tener una concentración mayor a 10% de COV totales o 10% de la concentración proporcional a esta clase de COV. Sin embargo los niveles mínimos para materiales más peligrosos que la acetona o isopentano, como el tolueno, se establecen en $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$, por lo que en ningún caso se excede el mismo.

La cantidad de COV para los niveles de producción de esta fábrica, se mantiene aún por debajo de los máximos exigidos internacionalmente, lo que da un ejemplo de las emisiones de la industria en San Juan Sacatepéquez.

CONCLUSIONES

1. Las áreas circundantes a las de aplicación de recubrimientos en madera, se ven afectadas también por la contaminación del aire, debida a los solventes que escapan por el aislamiento incorrecto y la falta de captura de los mismos.
2. La presencia detectable de COV en el aire, provenientes de acabados para madera, presenta en su mayoría acetona, pues es el disolvente más utilizado en este tipo de formulaciones.
3. Se pueden detectar COV provenientes de la descomposición de los solventes originales usados en los recubrimientos para madera, por el tiempo de permanencia de estos en el ambiente.
4. Los niveles detectados de COV totales no exceden los niveles máximos establecidos por reglamentaciones internacionales; sin embargo la concentración individual de los solventes encontrados, es mayor al 10% del total de COV, por lo que las medidas de seguridad industrial toman importancia.
5. Dados los niveles detectados de COV, se establece que no hay riesgo directo para los trabajadores, tanto del taller de aplicación, como en las áreas aledañas.

6. Existe una emisión detectable de COV, que tiene un impacto ambiental, debido a que estos llegan a la atmósfera, promoviendo la formación de ozono troposférico y gas de efecto invernadero.

RECOMENDACIONES

1. Para futuros estudios se recomienda realizar mayor cantidad de mediciones, en especial en diferentes épocas del año, tanto por temporadas altas y bajas de producción, como por las condiciones climáticas.
2. La medición se puede extender a más cantidad de talleres, en especial de otros lugares de fabricación, diferentes al municipio de San Juan Sacatepéquez.
3. Se podrían evaluar alternativas de recubrimientos con niveles bajos de COV o basados en agua, para establecer la diferencia en sus emisiones.
4. Este estudio establece un precedente en la medición de COV en Guatemala, por lo que sus datos pueden servir de sustento a futuros estudios más amplios y/o a propuestas de reglamentación del uso de COV en la formulación de recubrimientos y reglamentación para el uso de recubrimientos en la industria de madera, doméstica o automotriz.
5. La metodología utilizada se puede extrapolar a la medición de COV en el aire de ciudades, hogares o industrias no relacionadas con la fabricación de recubrimientos, pero donde se pueden encontrar fuentes de emisión diferentes.

6. Dado que en la investigación se encontraron niveles de COV, se recomienda el uso del equipo de seguridad industrial para los trabajadores (ver anexo C).
7. Se debe adoptar un medio de mitigación de las emisiones de COV en estas industrias, pues los mismos son importantes contaminantes atmosféricos.
8. De acuerdo con las mediciones realizadas y las reglamentaciones ya establecidas internacionalmente, se propone un rango máximo de COV para este tipo de industria en Guatemala de $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de aire. Este parámetro puede ser adoptado para reglamentaciones futuras.

BIBLIOGRAFÍA

1. AGENCIA DE PROTECCIÓN AMBIENTAL DE LOS ESTADOS UNIDOS, Centro de Información sobre Contaminación de Aire. “*Seleccionando un sistema de adsorción para COV: ¿carbón, zeolita o polímeros?*”. Estados Unidos: EPA, 1999. 34 p.
2. AGENCIA EUROPEA DE MEDIO AMBIENTE PARA SUSTANCIAS TOXICAS Y EL REGISTRO DE ENFERMEDADES. “*Ozono troposférico*” [en línea]. Disponible en: <<http://www.eea.europa.eu/es/publications/92-828-3351-8/page005.html>> [consulta: 4 de noviembre de 2012].
3. AGENCIA PARA SUSTANCIAS TÓXICAS Y EL REGISTRO DE ENFERMEDADES. “*Toxicidad de VOC*” [en línea]. [Disponible en: <<http://www.atsdr.cdc.gov/>> [consulta: 17 de agosto de 2012].
4. AGILENT TECHNOLOGIES. “*Agilent J&W DB®-WAX and DB-WaxFF GC Columns*”. [en línea]. Disponible en: <https://us.vwr.com/store/catalog/product.jsp?product_id=4623876> [consulta: 1 de agosto de 2012].
5. BERNARDO ECENARRO, S.A. “*Seguridad industrial laboral, prevención y tratamiento*”. [en línea]. Disponible en: <<http://www.guiasgtp.com/pdf/225-770086-5.pdf>> [consulta: 4 de noviembre de 2012].

6. CANCINO, Roberto y Mario Rodríguez. “Competitividad y Ambiente de la Cadena Productiva de la Industria del Mueble de San Juan Sacatepéquez Guatemala”. USAC. [en línea]. Disponible en: <<http://www.una.ac.cr/redibeccisda/ponencias/Metodologia/Roberto.pdf>> [consulta: 26 de mayo de 2012].
7. DE NEVERS, Noel. *Ingeniería de control de la contaminación del aire*. 2a ed. México: McGraw-Hill Interamericana Editores, 1998. 374 p.
8. HERNÁNDEZ, Roberto et. al. *Metodología de la investigación*. 3a ed. México: McGraw Hill, 1997. 128 p.
9. INSTITUTO NACIONAL DE HIGIENE EN EL TRABAJO. “*Determinación de vapores orgánicos en aire - Método de adsorción en carbón activo / cromatografía de gases*” Publicación del Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales, Gobierno de España (España):1. 2008. 17 p.
10. Instituto Sindical de Trabajo, Ambiente y Salud de España. “*Daños para el Medio Ambiente y la Salud Humana por vapores*” [en línea]. Disponible en: <<http://www.istas.net/fitema/att/di5.htm>> [consulta: 25 de mayo de 2012].
11. PLUSCHKE, Peter. *Indoor air pollution* (The Handbook of Environmental Chemistry, Volume 4, Part F). Germany: Springer-Verlag, 2004. 279 p.

12. RIVERO, Octavio et. al. *Contaminación Atmosférica y enfermedad respiratoria* (Biblioteca de la Salud. Secretaria de Salud, Universidad Nacional Autónoma de México). México: Editorial Fondo de la Cultura Económica, 1993. 145 p.

13. U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY OFFICE OF AIR QUALITY PLANNING AND STANDARDS, EMISSION STANDARDS DIVISION. "*Guideline Series Control of Volatile Organic Compound Emissions from Wood Furniture Manufacturing Operations*". United States of America: EPA, 1996. 326 p.

ANEXOS

ANEXO A

Anexo A.1. **Especificaciones técnicas de la bomba de muestreo de aire marca SKC, modelo PCXR8**

Rango de flujo	1000 a 5000 ml/min
Peso	34 oz (964 g)
Dimensiones	5.1 x 4.7 x 1.9 pulgadas (13 x 11.9 x 4.8 cm)
Rango de compensación	1000 a 2500 ml/min a 40 pulgadas de presión en agua 3000 ml/min a 35 pulgadas de presión en agua 4000 ml/min a 20 pulgadas de presión en agua 5000 ml/min a 10 pulgadas de presión en agua
Control de flujo	Mantener flujo constante a $\pm 5\%$ del punto de inicio
Rango de ajuste de tiempo	1 a 9999 minutos (6.8 días). La bomba se puede apagar a los 9999 minutos. Para resetear, resetear la bomba.
Temperatura de operación	32 a 113°F (0 a 45°C)
Temperatura de almacenaje	-4 a 113°F (-20 a 45°C)
Temperatura de carga	50 a 113°F (10 a 45°C)
Humedad de operación	0 a 95% sin condensado
Tubería	Requiere tubos de ¼ de pulgada

Fuente: <http://www.skcinc.com>. Consulta: octubre de 2012.

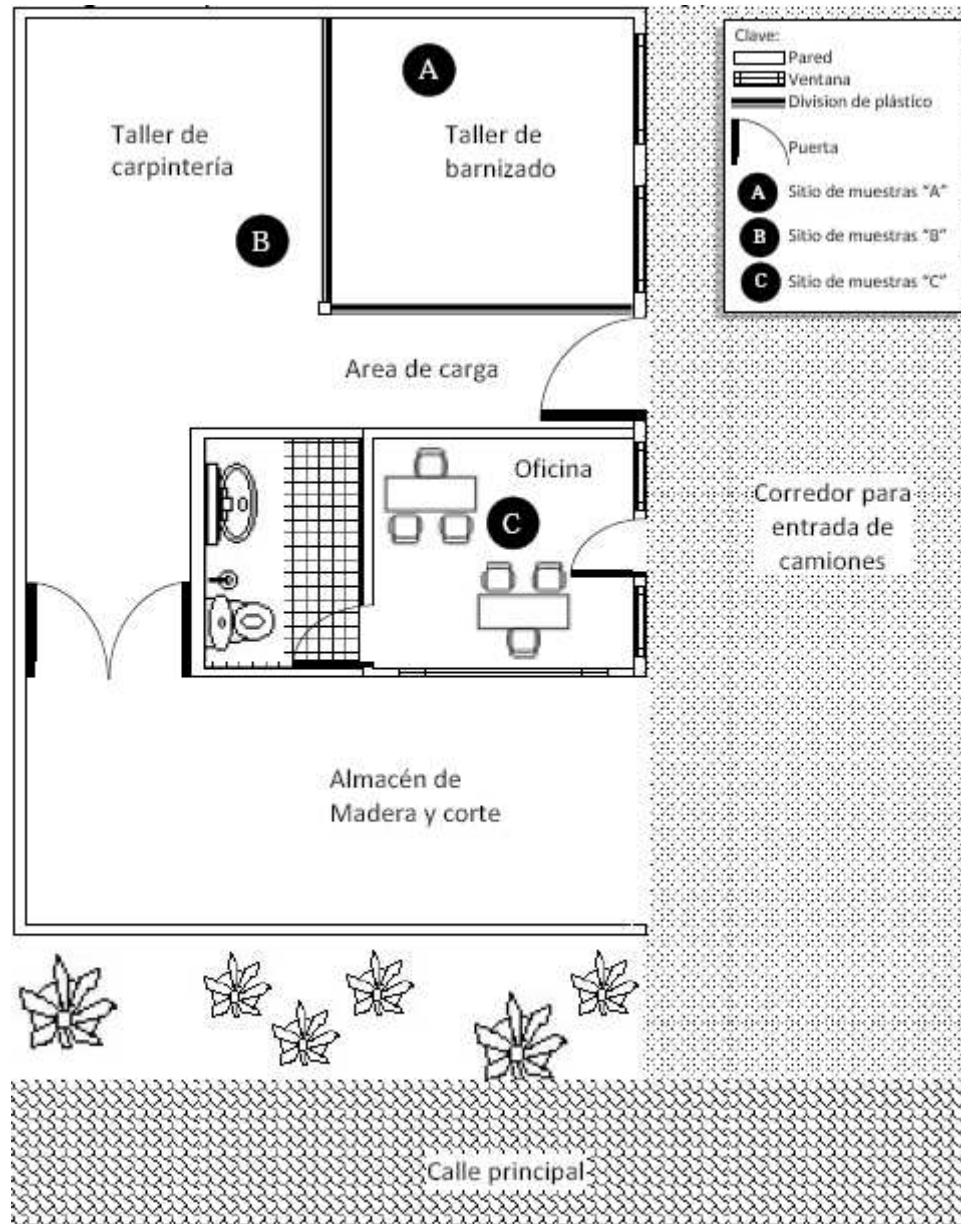
Anexo A.2. **Especificaciones técnicas del cromatógrafo Agilent Technologies, serie 5850**

Condiciones ambientales	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura ambiente para operación: 15 °C a 35 °C • Humedad ambiental para operación: 5% a 95% • Extremos de almacenaje: -40 °C a 70 °C • Disipación de calor: 3,000 Btu/h, 0.88 kW típico (a 100–120 V)
Detector de flama de ionización	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura máxima: 375 °C • Ignición automática • Detección de flama y reignición • Mínimo detectable: <5 pg carbón/os como propano usando N2 como portador • Rango lineal dinámico: 107 (±10%) • Flujos: aire, 0 a 800; hidrógeno, 0 a 100; calibración (He o N2), 0 a 100 mL/min
Detector de conductividad térmica	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura máxima: 375 °C • Mínimo detectable: <400 pg propano/mL helio como portador • Rango lineal dinámico: 105 (± 5%) • Flujo: gas de referencia, 0 a 100; calibración (He, H2, N2), 1 a 12 mL/min
Generales	<ul style="list-style-type: none"> • Programación de tiempo (24 h) • Una secuencia • Válvula Interna de control; 24 VDC, 200 mA • Control del poder integrado para el autoinyector Agilent 7683

Fuente: <http://www.chem.agilent.com>. Consulta: octubre de 2012.

ANEXO B

Anexo B.1. Esquema de distribución de la fábrica de muebles y puntos de muestreo



Fuente: elaboración propia.

ANEXO C

Anexo C.1. Seguridad industrial laboral, prevención y tratamiento

MANIPULACIÓN DE PINTURAS Y DISOLVENTES

c CONSEJOS GENERALES PARA LA MANIPULACIÓN

Por una parte, los productos inflamables suponen un riesgo para la seguridad del trabajador, y por otra, la inhalación de vapores o polvos, así como el contacto constante de la piel con los disolventes pueden ser generadores de enfermedades que normalmente se manifiestan cuando el proceso evolutivo ya ha avanzado.

Con carácter general, la manipulación de pinturas y/o disolventes debe realizarse siguiendo la información al respecto que el usuario profesional puede encontrar en la etiqueta y en las fichas de datos de seguridad:

-
- Leer atentamente las etiquetas de los envases, así como las correspondientes Fichas Técnicas y de Seguridad.
 - No abrir los envases con herramientas que puedan provocar chispas.

-
- Evitar el contacto directo con la piel y los ojos, utilizando guantes de goma y gafas de seguridad, evitando derrames y salpicaduras.
-
- Disponer de ventilación suficiente con arrastre a nivel del suelo.
-
- Evitar la acumulación de electricidad estática en los trasvases o mezclas de dos componentes o en la dilución, siendo conveniente conectar eléctricamente los dos recipientes a tierra, prescindiendo de recipientes de plástico.
-
- Emplear agitadores neumáticos y no eléctricos para homogeneizar y realizar mezclas.
-
- Prohibir cualquier operación cercana que conlleve producción de chispas, fuego o calor.
-
- Secar de inmediato cualquier vertido con arena o tierra, recogiendo y trasladando el residuo lo antes posible a recipientes adecuados.
-
- Dejar todos los envases bien cerrados después de su utilización.
-
- Protección contra la generación de electricidad estática: Las conexiones de entrada en recipientes destinados a contener líquidos de la clase B (ver apartado número 3, almacenamiento de productos químicos), estarán diseñadas para evitar la generación de electricidad estática. La tubería de llenado, cuando entra por la parte superior del recipiente, se prolongará hasta terminar a una altura inferior a 150 mm del fondo y será instalada de forma que se evite una excesiva vibración. Los sistemas de tuberías que manejan líquidos de clases A y B tendrán continuidad eléctrica.

Continuación de anexo C.1.

MANIPULACIÓN DE PINTURAS Y DISOLVENTES

MEDIDAS DE PREVENCIÓN

Se establecen siguiendo estos pasos:

RECONOCIMIENTO

Identificación previa de los contaminantes químicos que pueden estar presentes. Para ello revisaremos la

información recogida en las fichas de seguridad de los productos utilizados.

EVALUACIÓN

Estimación del nivel de riesgo, en ocasiones mediante mediciones ambientales y su comparación con un criterio de referencia (VLA's= Valores límite de

exposición admitidos para los diferentes contaminantes, TLV's = Threshold Limit Values).

FORMACIÓN E INFORMACIÓN

Los operarios expuestos a contaminantes serán informados sobre los valores a los que están expuestos y formados sobre las condiciones en las que deben manipular los mismos (EPI's= equipos

de protección individuales, Interpretación de etiquetas de peligrosidad, Medidas de Orden y limpieza de las zonas de trabajo, Uso de aspiraciones, etc.).

MANIPULACIÓN DE PINTURAS Y DISOLVENTES

EQUIPOS DE PROTECCIÓN INDIVIDUAL (EPI'S)

PROTECCIÓN RESPIRATORIA

Existen mascarillas con filtros en forma de cartuchos que pueden sustituirse cuando se comprueba la disminución de su eficacia. Estos cartuchos, que cumplirán en todo momento con las Normas EN 141 y 143, llevan en su interior carbono activado

que purifica el aire que se inhala al respirar los vapores de disolvente. Se recomienda el uso de estas mascarillas para la limpieza con disolventes de los útiles del pintor, pistolas y cuando se realicen ciertas aplicaciones de productos de pintura.

Las mascarillas deberán de cumplir con las Normas Europeas (EN) acordadas en la Directiva 26/656/CEE:



1

EN-136: Máscaras faciales (1). Requisitos. Ensayos de mercado.



2

EN-140: Define la media máscara como una pieza facial que cubre la nariz, la boca y la barbilla y el cuarto de máscara como la pieza facial que cubre la nariz y la boca (2).



3/4

EN-141: Clasifica filtros de gases (3) (eliminan gases y vapores específicos) y filtros mixtos (eliminan sólidos dispersos y/o partículas líquidas y los gases y vapores).

- P-1 sólidas.
- P-2 sólidas o sólidas y líquidas.
- P-3 sólidas y líquidas.



Continuación de anexo C.1.

MANIPULACION DE PINTURAS Y DISOLVENTES

EQUIPOS DE PROTECCIÓN INDIVIDUAL (EPI'S)



5

EN-149: Mascarillas Autofiltrantes contra partículas (5). Impide que junto con el aire que se inhala, penetren partículas y/o aerosoles de base agua, en la nariz y garganta. Suelen estar fabricadas de papel, cartón o cierto tipo de coloides. Han de retener partículas de no más de 5 micras y suelen tener grabadas la clase (FFP1; FFP2, FFP3). Son muy recomendables para las operaciones de lijado de masillas y cualquier tipo de pintura seca. No sirven para vapores de disolvente.



6

EN-371: Filtros AX. Para gases y filtros combinados...

EN-405: Mascarillas autofiltrantes con válvulas para gases y vapores. Requisitos mínimos que deben cumplir las mascarillas que constan de un adaptador facial del que forma(n) parte inseparable un(os) filtro(s) contra gases/vapores (6).

DIFERENTES FILTROS PARA MASCARILLAS. CLASIFICACIÓN SEGÚN COLORES: EN 141 - EN 143 - EN 371

TIPO	COLOR	CONTAMINANTES	CLASE (*)
A	Marrón	Vapores orgánicos con buenas propiedades de detección y punto de ebullición >65 °C	1-2
B	Gris	Gases y vapores inorgánicos con buenas propiedades de detección	1-2
E	Amarillo	Gases ácidos con buenas propiedades de detección	1-2
K	Verde	Amoniaco y sus derivados orgánicos con buenas propiedades de detección	1-2
AX	Marrón	Vapores orgánicos con buenas propiedades de detección y punto de ebullición <65 °C	1-2
P	Blanco	Partículas finas	1-2-3

(*) En función de la concentración máxima permisible del contaminante: CLASE 1 (baja capacidad) / CLASE 2 (media) / CLASE 3 (alta).

MANIPULACIÓN DE PINTURAS Y DISOLVENTES

EQUIPOS DE PROTECCIÓN INDIVIDUAL (EPI'S)



GAFAS.

NORMATIVA APLICABLE:

EN - 166. PROTECCIÓN INDIVIDUAL DE OJOS. ESPECIFICACIONES

Las gafas tienen el objetivo de proteger los ojos del trabajador. Recomendables durante operaciones de manipulación de disolventes y también cuando se emplee aire comprimido para soplado de polvos y secado de disolventes en operaciones de desengrasado.

En determinados casos, en que vayan a ser utilizadas de forma continuada por una persona que necesita gafas graduadas, pueden confeccionarse gafas de seguridad graduadas.

Las personas que necesiten llevar lentes de contacto durante los trabajos de pintado y desengrasado deben ser conscientes de los siguientes peligros potenciales:

Será prácticamente imposible retirar las lentes de contacto de los ojos después de que se haya derramado una sustancia química en el área ocular.

Las lentes de contacto interferirán con los procedimientos de lavado de emergencia.

Las lentes de contacto pueden atrapar y recoger humos y materiales sólidos en el ojo.

Si se produce la entrada de sustancias químicas en el ojo y la persona se queda inconsciente, el personal de auxilio no se dará cuenta que lleva lentes de contacto.

Por todo ello, la utilización de lentes de contacto debería considerarse con detalle.



Continuación de anexo C.1.

MANIPULACIÓN DE PINTURAS Y DISOLVENTES EQUIPOS DE PROTECCIÓN INDIVIDUAL (EPI'S)

GUANTES PARA EL MANEJO DE QUÍMICOS Y MICROORGANISMOS (CONT.)

Tabla de resistencias químicas de los guantes en función de su composición y del producto químico del que deben proteger.



Guantes de látex y de nitrilo que cumplen con la norma EN 374 (categoría 1).

Producto químico del que debe proteger	Material del guante			
	Látex	Neopreno	Nitrilo	PVC vinilo
Acetato de butilo	●	●	●	●
Acetona	●	●	●	●
Alcohol butílico (N-butanol)	●	●	●	●
Glicoles	●	●	●	●
Isobutilcetona	●	●	●	●
Metiletilcetona	●	●	●	●
Nafta	●	●	●	●
Pintura gliceroftálica	●	●	●	●
Pinturas base agua	●	●	●	●
Resinas de poliéster	●	●	●	●

● Muy bueno ● Bueno ● Aceptable ● Malo

Continuación de anexo C.1.

MANIPULACION DE PINTURAS Y DISOLVENTES EQUIPOS DE PROTECCIÓN INDIVIDUAL (EPI'S)



MONOS CON CAPUCHA

Son prendas de protección integral fabricadas en un material especial llamado "tyvek". Estos monos son muy higiénicos si se conservan en su embalaje. Resultan recomendables para operaciones de pintado con pistolas aerográficas, evitando que las nieblas producidas entren en contacto con alguna parte del cuerpo. No suelta pelusas.

Por tema de cargas electroestáticas, el personal que trabaje en instalaciones en las que se efectúen trasvases de líquidos inflamables no usará ropa de fibras sintéticas, y la vestimenta será preferiblemente de algodón, incluso la ropa interior. Es aconsejable también limitar en lo posible el uso de prendas de lana.



Tyvek-Pro.Tech® Modelo Classic

- ① Capucha de tres piezas
- ② Abertura facial elástica
- ③ Costuras externas (de tres hilos)
- ④ Cintura elástica
- ⑤ Puños y tobillos elásticos
- ⑥ Solapa de cremallera
- ⑦ Refuerzo adicional de tejido en la entepierna

Fuente: <http://www.guiasgtp.com/pdf/225-770086-5.pdf>. Consulta: septiembre de 2012.