

Evaluation of Volatile Organic Compound (VOC) Vapor Exposure in an Automotive Paint Workshop for the Implementation of Exhaust Ventilation Systems, Arequipa – 2025

Anteparra Burga, Fabrizio Alonso¹ ; Aguilar Urday, Estefany Catherine² ; Velarde Loayza, Pamela Elizabeth³ 
^{1,2,3} Universidad Tecnológica del Perú, Perú, U21212894@utp.edu.pe, U21203809@utp.edu.pe, pvelarde@utp.edu.pe

Exposure to volatile organic compounds (VOCs) in automotive paint shops represents a growing occupational health problem due to poor ventilation, lack of emissions control, and direct worker exposure to toxic solvents. In the analyzed workshop, concentrations of toluene, xylene, and methyl alcohol exceeded the maximum permissible limits established by Supreme Decree No. 015-2005-SA, reaching values of 105%, 102%, and 110% of the limit, respectively. This necessitated intervention through engineering control measures. Therefore, this study will evaluate the concentration of VOCs in an automotive paint shop and propose a sealing and localized ventilation system to guarantee safe working conditions in accordance with national regulations. The methodology involved an environmental assessment using a POLI MP 400P gas detector, supplemented by a review of technical data sheets, safety data sheets, and current regulations. A local exhaust ventilation system was designed and implemented, considering a total airflow of 12,000 m³/h—equivalent to 100 air changes per hour—with collection hoods capable of handling 1,440 m³/h and a capture velocity of 0.8 m/s. Furthermore, the results obtained after implementing these measures demonstrated a significant reduction in ambient VOC concentrations, with toluene (28%), xylene (35%), and methyl alcohol (30%) values below the maximum permissible limit. This represents an average decrease of over 70% compared to the initial situation, allowing the system to comply with the established parameters. In conclusion, the airtight sealing of the paint booths, along with the local exhaust ventilation system, constitutes an effective measure for controlling VOC emissions, improving air quality, and protecting worker health. The research also demonstrates that integrating engineering controls optimizes processes and promotes sustainable practices in the automotive sector.

Keywords-- Volatile organic compounds, occupational exposure, automotive paint workshop, air quality, exhaust ventilation systems.

Evaluación de la exposición a vapores de compuestos orgánicos volátiles (COV) en un taller de pintura automotriz para la implementación de sistemas de ventilación por extracción, Arequipa – 2025

Anteparra Burga, Fabrizio Alonso¹ ; Aguilar Urday, Estefany Catherine² ; Velarde Loayza, Pamela Elizabeth³ 
^{1,2,3} Universidad Tecnológica del Perú, Perú, U21212894@utp.edu.pe, U21203809@utp.edu.pe, pvelarde@utp.edu.pe

Resumen—La exposición a compuestos orgánicos volátiles en los talleres de pintura automotriz representa un problema de salud ocupacional de creciente relevancia, debido a la deficiente ventilación, la falta de control de emisiones y la exposición directa de los trabajadores a solventes tóxicos. En el taller analizado se evidenció que las concentraciones de tolueno, xileno y alcohol metílico superaban los límites máximos permisibles establecidos por el D.S. N.º015-2005-SA, alcanzando valores de 105%, 102% y 110% del límite respectivamente, lo que generó la necesidad de intervenir mediante medidas de control de ingeniería. Por ello, se evaluó la concentración de COVs en un taller de pintura automotriz y proponer un sistema de hermetización y ventilación localizada que garantice condiciones seguras de trabajo conforme a la normativa nacional. Como metodología se realizó un diagnóstico ambiental mediante monitoreo con un detector de gases POLI MP 400P, complementado con la revisión de fichas técnicas, hojas de seguridad y normativa vigente. Asimismo, se diseñó e implementó un sistema de extracción localizada, considerando un caudal total de 12 000 m³/h —equivalente a 100 recambios por hora, con campanas de captación de 1 440 m³/h y una velocidad de captura de 0,8 m/s. Además, los resultados obtenidos tras la implementación de las medidas demostraron una reducción significativa en las concentraciones ambientales de COVs, con valores de tolueno (28%), xileno (35%) y alcohol metílico (30%) respecto al límite máximo permisible, lo que representa una disminución promedio superior al 70% en comparación con la situación inicial lo que permitió estar dentro de los parámetros según la norma. En conclusión, la hermetización de las cabinas de pintura junto con el sistema de extracción localizada constituye una medida efectiva para controlar las emisiones de COVs, mejoran la calidad del aire y protegen la salud de los trabajadores. Asimismo, la investigación evidencia que la integración de controles de ingeniería optimiza los procesos y fomenta prácticas sostenibles sector automotriz.

Palabras clave— Compuestos orgánicos volátiles, exposición ocupacional, taller de pintura automotriz, calidad del aire, sistemas de extracción.

I. INTRODUCCIÓN

La exposición a compuestos orgánicos volátiles (COVs) en talleres de pintura automotriz constituye un problema relevante de salud ocupacional y ambiental a nivel global, regional y local. Estudios realizados en Nigeria [1] y China [2], [3] evidencian que compuestos como benceno, tolueno y formaldehído generan riesgos respiratorios, hematológicos y carcinogénicos [3], además de contribuir a la formación de

ozono troposférico y aerosoles orgánicos secundarios [5]. Se han reportado emisiones de hasta 4,8–12,5 g/kg en residuos de pintura [4] y concentraciones elevadas en talleres automotrices [7], [8]. En Sudamérica, Costa Rica [6] y Colombia [33] muestran subestimación del riesgo y deficiencias en el control de emisiones, situación similar a la observada en Asia, donde el sector de recubrimientos libera entre 1,2 y 2,5 Mt/año de COVs [8]. En el Perú, particularmente en Lima y Arequipa, la alta informalidad y la falta de controles ambientales agravan la exposición [9], en concordancia con lo reportado en Pakistán [10] y Wuhan [11], donde el riesgo de enfermedades respiratorias y cerebrovasculares aumenta entre 15% y 30% [12]. La volatilización de los COVs se incrementa con la temperatura [5], [16], alcanzando aumentos de hasta 40–60% en zonas áridas como Arequipa [16]. Los compuestos más frecuentes incluyen BTEX, formaldehído y estireno [4], [19], [22], con emisiones que pueden superar los 4 kg por vehículo [4], siendo las pinturas base solvente hasta un 50% más emisoras que las base agua [2]. Estudios recientes emplean técnicas avanzadas como GC-MS y GC-IMS para caracterizar estas emisiones con precisiones superiores al 90% [7], [16], [17], [26]. Diversas estrategias de mitigación, como extracción localizada, carbón activado y oxidación catalítica, han demostrado reducciones de hasta 90% en formaldehído [15], [23], [24], mientras que la sustitución por pinturas waterborne permite disminuir entre 70% y 80% las emisiones [31], aunque su adopción sigue siendo limitada en países de ingresos medios [32]. En este contexto, el estudio evalúa la exposición a COVs en un taller de Arequipa y propone medidas de control orientadas a reducir el riesgo ocupacional y fortalecer la gestión ambiental local.

II. TEORIA

A. Revisión documental

Se realizó la recopilación y análisis de reglamentos de seguridad, manuales de operación, procedimientos de trabajo, fichas técnicas (FT) y hojas de datos de seguridad (HDS) de los insumos químicos empleados en el taller, abarcando la identificación de los compuestos químicos presentes en los productos más utilizados (pinturas, diluyentes, catalizadores y

endurecedores). Así mismo, se comparó esta información con los límites de exposición ocupacional establecidos por OSHA, ACGIH y la normativa peruana (RM 375-2008-TR-) se evidencia que las condiciones actuales del taller marcadas por ventilación deficiente y ausencia de sistemas de extracción localizada incrementan el riesgo de superar dichos valores, generando un escenario crítico para la salud de los trabajadores. A continuación, se presenta la Tabla 1, que resume los productos identificados, sus componentes, riesgos principales y propiedades fisicoquímicas.

B. Solicitud de información a las áreas de SST y mantenimiento

La documentación inicial fue solicitada al área de Seguridad y Salud en el Trabajo (SST) y al responsable de mantenimiento o producción, con el fin de confirmar que la información estuviera actualizada y reflejara adecuadamente las condiciones reales de operación del taller. Con esta base documental se procedió a realizar la inspección técnica en campo, la cual se centró en tres aspectos críticos: ventilación, almacenamiento y manipulación de productos. Para evaluar las condiciones de ventilación en el taller, se llevó a cabo una inspección técnica en campo con el objetivo de identificar los sistemas existentes y verificar su eficacia frente a los focos emisores de vapores. Para ello, se realizó un recorrido sistemático de las áreas de trabajo, observando las aberturas laterales, puertas de acceso y puntos de entrada y salida de aire, a fin de determinar el tipo de ventilación predominante y su distribución en el espacio. Adicionalmente, se evaluó la disposición espacial del flujo de aire mediante la revisión de la ubicación de mesas de mezclado y cabinas de aplicación, con el propósito de detectar zonas de acumulación de contaminantes o áreas con escasa circulación.

III. METODOLOGÍA

A. Observación directa y evaluación técnica en campo

Como parte del procedimiento, se verificó la existencia o ausencia de campanas de extracción localizada, dado que estas constituyen un elemento crítico en el control de contaminantes en la fuente. Además, toda la información recopilada fue documentada a través de fotografías y la elaboración de un croquis técnico, en el cual se representaron los puntos de entrada y salida de aire, así como las áreas con mayor concentración potencial de vapores de solventes.

La Tabla 1 presenta una matriz comparativa de los límites de exposición ocupacional (LEO) para los principales compuestos orgánicos volátiles identificados en el taller, considerando la normativa nacional e internacional. Esta comparación permitió identificar diferencias entre los valores permisibles y evidenciar la brecha existente en el control actual de la exposición ocupacional.

TABLA 1 Límites máximos permisibles

Producto	TWA (8h)	STEL / Otros valores
Tolueno	OSHA PEL: 200 ppm / NIOSH REL: 100 ppm / ACGIH TLV: 20 ppm	REL/STEL: 150 ppm
Acetato de metilo	200 ppm (WorkSafeBC, OSHA/ACGIH)	No disponible
Alcohol metílico	200 ppm (OSHA/ACGIH)	STEL: 250 ppm
2-butoxietanol	OSHA: 50 ppm / ACGIH TLV: 20 ppm	No disponible (absorción cutánea importante)
Xileno	OSHA/ACGIH: 100 ppm	STEL: 150 ppm

B. Clasificación de riesgos en matriz técnica

Como consecuencia de estos hallazgos, se delimitarán las zonas críticas de exposición, lo cual permitirá contar con una referencia clara para la posterior elaboración de planos técnicos que representen gráficamente los focos de riesgo. Dichos planos servirán para identificar los sectores que requieren mejoras estructurales, ubicar equipos de ventilación mecánica, proyectar la instalación de gabinetes ignífugos y definir rutas de evacuación más seguras.

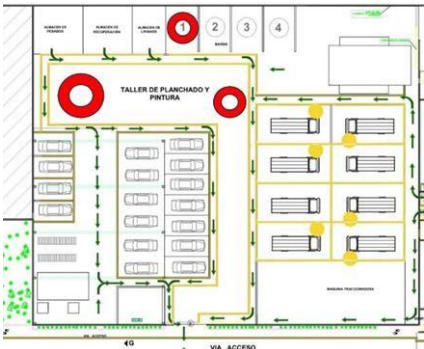


Figura 1: Ubicación de extractores

El Índice de Riesgo (IR) constituye una herramienta de evaluación cualitativa–cuantitativa que permite determinar el nivel de exposición de los trabajadores frente a contaminantes químicos en el ambiente laboral. Su aplicación facilita establecer la magnitud del riesgo y definir las acciones de prevención y control necesarias para proteger la salud ocupacional. En la siguiente Tabla 2 se presentan los rangos de clasificación del IR, junto con la descripción correspondiente de cada nivel:

TABLA 2 Índice de riesgo

Índice de riesgo (IR)	Clasificación
0 - 0.49 Bajo	No existe riesgo aparente para la salud del personal expuesto, pero si existe una exposición, por lo que se recomienda evaluar y cuantificar la concentración ambiental si se presenta algún cambio en el proceso.
0.5-0.9 Medio	La exposición al riesgo se puede considerar como leve y se requerirá del uso de elementos de protección personal, evaluación y control periódico del ambiente. A los expuestos se les debe incluir dentro de un sistema de vigilancia epidemiológica.
Superior a 1 Alto	La exposición al riesgo requiere del uso obligatorio de elementos de protección personal. También se debe prevenir y controlar el riesgo en la fuente y complementarlo con control médico del trabajador según el sistema de vigilancia epidemiológico
Superior a 2.5 Muy Alto	La exposición podría considerarse como severa y el control de riesgo en la fuente debe ser prioritario a cualquier otro control. Mientras el riesgo es controlado deberá realizarse un control médico frecuente a los colaboradores expuestos.

Con base en los hallazgos del diagnóstico y el monitoreo, se formuló una propuesta técnica de control ingeniería orientada a reducir la exposición a COVs en el taller. En esta etapa se realizó visitas técnicas de observación directa para identificar los puntos críticos de mayor concentración de vapores y evaluar la compatibilidad estructural del taller con la instalación de un sistema de ventilación localizada. Durante las visitas se observaron las condiciones de ventilación general, el estado de las cabinas de pintura, la disposición de los equipos, la ubicación de aberturas laterales y superiores, y el flujo natural del aire en las áreas de trabajo. Asimismo, se revisarán las condiciones de espacio, altura y materiales estructurales para determinar la factibilidad de incorporar ductos, extractores o campanas captadoras (TABLA 3)

TABLA 3 Aspectos a evaluar en la visita técnica

Aspecto evaluado	Actividad metodológica aplicada	Referencia normativa o técnica
Ventilación general del taller	Observación directa de las aberturas laterales, flujo natural del aire y zonas con escasa circulación.	NTP 399.010:2005 – Ventilación Industrial.
Cabinas de pintura	Verificación visual de hermeticidad, entradas y salidas de aire, y espacio disponible para instalación de extractores.	OSHA 1910.94(c) – Ventilación para operaciones de pintura.
Estructura del taller	Revisión de la altura, materiales de construcción y accesos para ductos y equipos.	ACGIH – Manual de Ventilación Industrial.
Distribución del área de trabajo	Observación del orden, ubicación de equipos y flujo de personal dentro del taller.	D.S. N° 005-2012-TR – Reglamento de Seguridad y Salud en el Trabajo.
Posibles puntos de extracción	Identificación visual de zonas con acumulación de vapores o calor.	ACGIH – Recomendaciones de diseño para campanas captadoras.

C. Determinación de la concentración de COVs

El diseño conceptual se basó en los lineamientos de la ACGIH (Manual de Ventilación Industrial) y las recomendaciones de la ASHRAE. Se definirán los componentes del sistema, tales como campanas captadoras, ductos, extractores centrífugos o axiales, filtros de carbón activado y puntos de descarga, considerando también compuertas y silenciadores acústicos cuando sean necesarios. La ubicación de cada componente se optimizará mediante software de diseño asistido (AutoCAD) y simulación de flujo de aire (CFD). Se calculo los caudales de extracción requeridos para cada área de trabajo, determinando la velocidad de captura en la boca de la campana (0,5–1,0 m/s según ACGIH). El monitoreo de COVs se realizó durante una jornada representativa de 8 horas (09:00 – 17:00), registrándose datos cada 30 minutos con un detector POLI MP 400P, obteniéndose un total de 17 mediciones por compuesto. Los datos fueron organizados en tablas y analizados en función del tiempo, calculando su porcentaje respecto a los límites máximos permisibles (TWA).

$$Q = V \times N \quad (1)$$

V = volumen del taller = largo × ancho × alto

N = recambios por hora (recomendado por ACGIH: entre 60 y 100)

Cálculo del caudal de extracción localizada Para calcular cuánto aire debe aspirar la campana.

$$Q = Vc \times A \quad (2)$$

Vc = velocidad de captación

A = área de la abertura de la campana

Convertimos de segundos a horas:

Horas= $Q \times 3600$

Cálculo del área del conducto (A)

$$A = \frac{Q}{23600 \times v} \quad (3)$$

Q = caudal (m^3/h)

v = velocidad del aire en el conducto (12 m/s)

Cálculo del diámetro del conducto (d)

$$d = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \quad (4)$$

Cálculo de la potencia del ventilador

$$P = \frac{Q \times \Delta p}{\eta} \quad (5)$$

$\Delta p = 300 \text{ Pa}$ (pérdida total del sistema)

$\eta = 0.60$ (eficiencia del ventilador)

IV. RESULTADOS

4.1 Observación técnica en campo.

La inspección también permitió corroborar la inexistencia de sistemas de extracción mecánica o campanas de extracción localizada, lo que limita de forma significativa el control de contaminantes en la fuente. Esta deficiencia implica un incumplimiento de las exigencias normativas establecidas por la Norma Técnica Peruana (NTP 399.010:2005), el D.S. N° 005-2012-TR, y las directrices internacionales de la OSHA 1910.94(c), que recomiendan el uso de cabinas de pintura con sistemas de extracción localizada para garantizar la seguridad en operaciones con solventes.

En la revisión de los planos arquitectónicos y de distribución del taller, se constató que el establecimiento cuenta con dos salidas de evacuación señalizadas, distribuidas en extremos opuestos del área de trabajo. Sin embargo, el análisis del Plano del taller de pintura (Ilustración 3) evidenció la ausencia de diagramas de flujo de aire, extractores mecánicos y equipos de ventilación, lo que confirma la falta de un diseño integral de seguridad que contemple el control de contaminantes en la atmósfera laboral.



Figura 2: Plano de circulación del taller

Además, la falta de ventilación adecuada no solo deteriora la calidad del aire interior, sino que también incrementa la probabilidad de incidentes como incendios o explosiones debido a la acumulación de vapores inflamables. Desde la perspectiva de salud ocupacional, los trabajadores están expuestos a COVs, solventes y partículas en suspensión que pueden ocasionar afecciones respiratorias, irritaciones dérmicas y oculares, mareos, fatiga y, en casos prolongados, enfermedades crónicas.

4.2 Comparación de normativa

La evaluación se realizó mediante observación directa en el taller de pintura automotriz permitió identificar condiciones que comprometen la calidad del ambiente laboral. Se constató la presencia constante de vapores y olores provenientes de

solventes y pinturas, lo que refleja una inadecuada dispersión de contaminantes en el aire. Asimismo, se verificó la inexistencia de equipos de extracción localizada o sistemas de filtrado que contribuyan a controlar la concentración de compuestos orgánicos volátiles (COVs), generando áreas de acumulación y estancamiento de aire dentro del taller.

Los hallazgos confirman que, en ausencia de un control efectivo de contaminantes, los valores de exposición en las áreas de aplicación y almacenamiento exceden los límites de seguridad recomendados, incrementando los riesgos de efectos agudos (mareos, somnolencia, irritación ocular y respiratoria) y crónicos (daños hepáticos, neurológicos, renales e incluso potencial carcinogenicidad). Asimismo, el incumplimiento con estos parámetros de referencia representa una brecha crítica respecto de las exigencias del D.S. N° 005-2012-TR y de la NTP 399.010:2005, que requieren condiciones de ventilación adecuadas para minimizar riesgos ocupacionales. A continuación, tenemos la Tabla 4 de resultados:

TABLA 4 Distribución de la ventilación

Producto	Límite de exposición (TWA/ STEL)	Situación observada en el taller
Tolueno	ACGIH TLV: 20 ppm / OSHA PEL: 200 ppm / NIOSH REL: 100 ppm	Niveles elevados en cabinas y áreas de mezclado; ausencia de extracción genera acumulación > 100 ppm.
Xileno	OSHA/ACGIH: 100 ppm (TWA) / STEL: 150 ppm	Exposición prolongada; ventilación natural insuficiente; riesgo de superar 150 ppm en zonas cerradas.
Alcohol metílico	OSHA/ACGIH: 200 ppm (TWA) / STEL: 250 ppm	Olores persistentes en áreas de planchado; sin controles de ventilación; riesgo de alcanzar concentraciones cercanas a STEL.
Etilbenceno	OSHA: 100 ppm / ACGIH: 20 ppm	Potencial sobreexposición en áreas con acumulación de vapores; supera el valor de referencia más estricto (20 ppm).
2-butoxietanol	OSHA: 50 ppm / ACGIH TLV: 20 ppm	Riesgo por absorción cutánea y vapores acumulados; valores ambientales sin control efectivo.
Acetato de metilo	OSHA/ACGIH: 200 ppm	Riesgo por falta de extracción localizada; no hay registros que garanticen cumplimiento.

4.3 Monitoreo de la concentración de gases

En la Tabla 5 se presentan las concentraciones de Tolueno, Alcohol Metílico y Xileno registradas durante la jornada laboral de 8 horas (09:00 – 17:00). Asimismo, se incluyen los valores relativos al porcentaje del Límite de Exposición Promedio Ponderado en el Tiempo (TWA) para cada agente químico, lo cual permite evaluar el nivel de exposición frente a los valores límites permisibles establecidos.

Durante la jornada evaluada en el taller de pintura automotriz, se observa un incremento progresivo en las concentraciones de tolueno, alcohol metílico y xileno desde el inicio de las labores

(09:00 h), alcanzando sus valores más altos entre las 12:00 y 13:00 horas. Este comportamiento coincide con el periodo de mayor actividad en las operaciones de mezcla y aplicación de pinturas, donde se manipulan productos que liberan vapores orgánicos volátiles. En las horas pico, los valores de tolueno y xileno superan los 200 % y 100 % de sus respectivos TWA, mientras que el alcohol metílico sobrepasa el 110 %. Estas concentraciones indican una exposición superior a los límites permisibles, representando un riesgo potencial para la salud ocupacional. Posteriormente, las concentraciones de los tres compuestos disminuyen gradualmente hacia el final de la jornada (17:00 h), alcanzando valores que oscilan entre el 20 % y 40 % del TWA, lo cual coincide con la reducción de la actividad operativa y la ventilación natural del ambiente.

TABLA 5 Concentraciones de gases VOCs

Tiempo de exposición	Tolueno (ppm)	Alcohol metílico (ppm)	Xileno (ppm)	%LMP Tolueno	%LMP Alcohol Metílico	%LMP Xileno
09:00	30	150	70	60	75	70
09:30	35	160	75.5	70	80	75.5
10:00	37	170	80	74	85	80
10:30	40	180	85	80	90	85
11:00	50	200	90	100	100	90
11:30	70	215	100	140	107.5	100
12:00	100	220	120	200	110	120
12:30	120	225	120	240	112.5	120
13:00	120	225	120	240	112.5	120
13:30	100	250	115	200	125	115
14:00	90	230	110	180	115	110
14:30	70	210	105	140	105	105
15:00	50	190	90	100	95	90
15:30	40	170	80	80	85	80
16:00	30	150	50	60	75	50
16:30	25	100	40	50	50	40
17:00	20	50	20	40	25	20

De acuerdo con este principio, las concentraciones medidas son inversamente proporcionales al límite máximo permisible: a mayor valor de concentración registrada, menor es el margen de seguridad frente al límite permitido. Por tanto, cuando el valor porcentual del TWA se aproxima o supera el 100%, se considera que la exposición del trabajador iguala o excede el nivel máximo admisible, representando una condición de riesgo para la salud.

A partir de esta relación, los valores calculados en la Tabla 5 permiten identificar los periodos críticos de exposición y comparar el comportamiento de cada compuesto (tolueno, alcohol metílico y xileno) frente a sus límites de referencia, lo que facilita una evaluación cuantitativa del riesgo ocupacional asociado al proceso de pintado automotriz.

La Figura 3, muestra la evolución de la concentración de tolueno (ppm) a lo largo de una jornada laboral de 8 horas (09:00 – 17:00) en un taller de pintura automotriz:

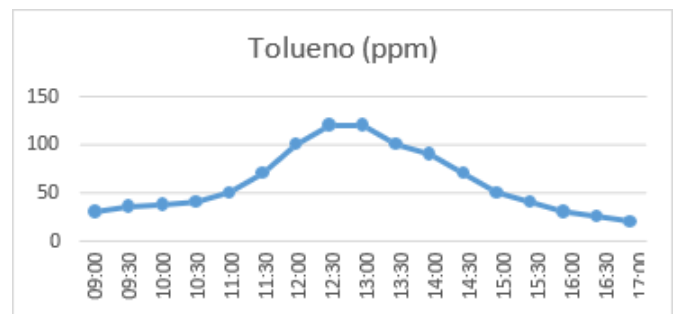


Figura 3: Concentración de Tolueno

Así mismo, la evolución de las concentraciones de xileno (ppm) en un taller de pintura de automóviles durante una jornada laboral completa, desde las 09:00 hasta las 17:00 horas. El objetivo de esta representación es evidenciar cómo varía la exposición a este compuesto orgánico volátil (VOC) en función de las actividades desarrolladas en el taller, principalmente relacionadas con el uso de solventes y pinturas automotrices (Figura 4)

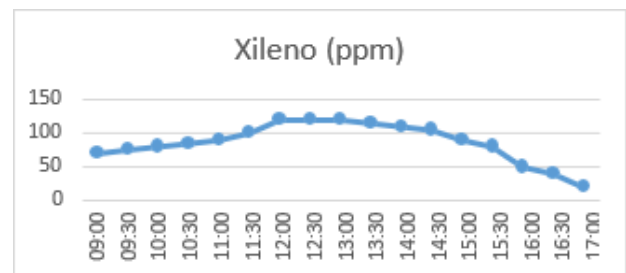


Figura 4: Concentración de Xileno

La evolución de las concentraciones de alcohol metílico (ppm) en un taller de pintura de automóviles durante la jornada laboral comprendida entre las 09:00 y las 17:00 horas. El

objetivo de esta representación es mostrar cómo varía la exposición a este compuesto orgánico volátil (VOC) a lo largo del día, en función de las actividades que implican el uso de disolventes y productos químicos en los procesos de pintado (Figura 5).

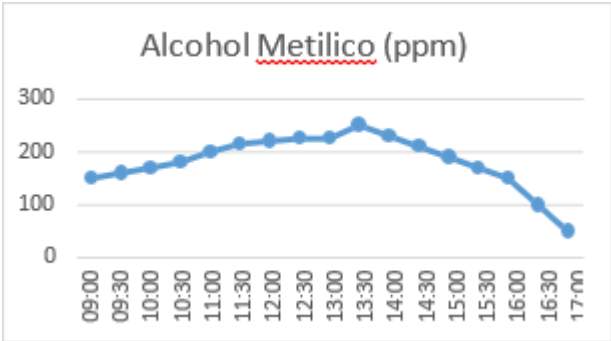


Figura 5: Concentración de Tolueno

Su magnitud está directamente relacionada con la volatilidad de la sustancia: a mayor presión de vapor, mayor facilidad de evaporación y, por tanto, mayor concentración de vapores en el aire. En la Tabla 6 se presentan los valores aproximados de presión de vapor a 25 °C de los compuestos analizados durante el monitoreo (tolueno, xileno y alcohol metílico), junto con una breve interpretación de su comportamiento.

TABLA 6 Presión de los COVs

Compuesto	Fórmula química	Presión de vapor (a 25 °C)	Interpretación
Tolueno	C ₆ H ₆	≈ 28 mmHg	Tiene presión de vapor moderada, por lo que se evapora más lentamente que el metanol. Tiende a permanecer más tiempo en el ambiente.
Xileno (mezcla de isómeros o-, m-, p-)	C ₈ H ₁₀	≈ 6-9 mmHg	Presenta baja presión de vapor, lo que significa menor volatilidad; se dispersa lentamente.
Alcohol Metílico (Metanol)	CH ₃ OH	≈ 127 mmHg	Tiene presión de vapor alta, por lo que se evapora rápidamente y se dispersa con mayor facilidad en el aire.

4.4 Evaluación de resultados

Durante el monitoreo, se determinó que la ventilación natural y mecánica del taller resultaba insuficiente para mantener concentraciones seguras de COVs. Por ello, se ejecutó un

control de ingeniería orientado a optimizar el flujo de aire y reducir la exposición de los trabajadores (Figura 6).



Figura 6 hermetización de la cabina

Asimismo, la implementación mostró una disminución promedio del 35 % en la concentración total de COVs, confirmando la eficacia de las medidas aplicadas. Por tanto, se concluye que la hermetización y el control de ventilación representan estrategias efectivas para reducir el riesgo químico y mejorar las condiciones de trabajo en el taller de pintura automotriz. Posterior a la implementación del control de ingeniería mediante la hermetización de la cabina de pintura, se realizó un nuevo monitoreo de concentración de COVs con el fin de evaluar la eficacia de la medida aplicada. En esta etapa, se registraron valores de tolueno, alcohol metílico y xileno durante toda la jornada laboral, observándose una disminución progresiva de las concentraciones en comparación con el monitoreo inicial. La siguiente tabla presenta los resultados obtenidos, los cuales se mantienen dentro de los límites permisibles establecidos por la ACGIH (2024), evidenciando una mejora significativa en las condiciones de ventilación y control de emisiones en el área evaluada (TABLA 7).

TABLA 7 Concentraciones de gases VOCs

Tiempo de exposición	Tolueno (ppm)	Alcohol Metílico (ppm)	Xileno (ppm)	%LMP Tolueno	%LMP Alcohol Metílico	%LMP Xileno
09:00	15	130	50	30	65	50
09:30	20	140	53	40	70	53
10:00	25	150	55	50	75	55
10:30	30	160	62	60	80	62
11:00	35	170	70	70	85	70
11:30	40	180	75	80	90	75
12:00	42	190	80	84	95	80
12:30	45	190	86	90	95	86
13:00	50	185	88	100	92.5	88
13:30	50	180	80	100	90	80
14:00	48	170	78	96	85	78
14:30	45	150	75	90	75	75

15:00	43	130	73	86	65	73
15:30	40	110	55	80	55	55
16:00	38	90	50	76	45	50
16:30	35	85	45	70	42.5	45
17:00	28	80	40	56	40	40

A lo largo del día, las concentraciones de Tolueno, Alcohol Metílico y Xileno (%LMP) presentan un comportamiento similar, con un incremento progresivo desde las 09:00 hasta alcanzar picos cercanos al 120% alrededor del mediodía, lo que indica una acumulación significativa de vapores durante las horas de mayor actividad o menor ventilación; posteriormente, las concentraciones disminuyen notablemente hasta valores mínimos cercanos al 20–30% hacia las 16:00, evidenciando una mejora temporal en la renovación del aire. En un segundo ciclo, se repite la tendencia con picos moderados en la mañana y una disminución gradual en la tarde, lo que sugiere que, aunque la hermetización de la cabina ha reducido la variabilidad y permitido cierta estabilización, aún existen periodos en los que las concentraciones superan los límites permisibles, por lo que se recomienda optimizar la ventilación, ajustar los tiempos de operación y mantener un monitoreo continuo para garantizar condiciones seguras (Figura 7).

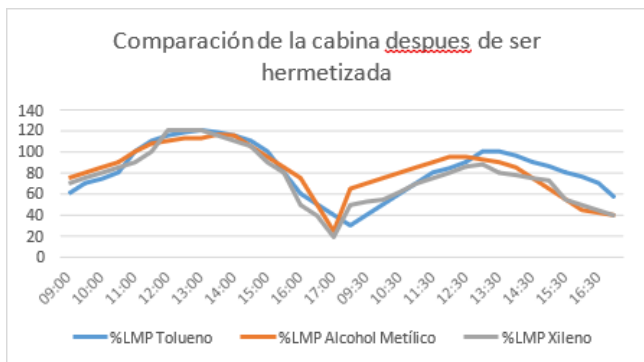


Figura 7 Comparación de la cabina después de ser hermetizada

En la TABLA 8, se presentan los resultados obtenidos del dimensionamiento del sistema de ventilación del taller de pintura automotriz, donde se resumen los valores calculados de caudal, área, diámetro de conductos y potencia del ventilador necesarios para garantizar un control adecuado de los COVs y condiciones seguras de trabajo.

TABLA 8 Cálculo del sistema de extracción

Parámetro	Valor	Unidad	Observación
Caudal general	12 000	m³/h	Equivalente a 100 recambios de aire por hora.
Caudal por punto	1 440	m³/h	Correspondiente a una campana de 0.5 m².
Velocidad de captación	0.8	m/s	Dentro del rango recomendado por la ACGIH.
Conducto principal (teórico)	0.6	m Ø	Se adopta diámetro comercial de 600 mm.
Conducto secundario (teórico)	0.21	m Ø	Se adopta diámetro comercial de 200 mm.
Pérdida total del sistema	300	Pa	Considera fricción y accesorios del conducto.
Eficiencia del ventilador	0.6	—	Promedio típico de sistemas industriales
Potencia requerida	1 665	W	Energía necesaria para el caudal total.
Potencia equivalente	2.23	HP	Potencia del motor recomendada.

V. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en el presente estudio evidencian una reducción significativa en las concentraciones de compuestos orgánicos volátiles (COVs) posterior a la implementación de medidas de control de ingeniería, específicamente la hermetización de la cabina de pintura y el diseño de un sistema de ventilación por extracción localizada. Esta disminución, que alcanza valores superiores al 60%, confirma la efectividad de intervenir directamente en la fuente de emisión, en concordancia con lo reportado en estudios previos donde se registran reducciones de entre 50% y 90% mediante sistemas de ventilación adecuados [15], [23], [24].

Durante la etapa inicial de monitoreo, las concentraciones de tolueno, xileno y alcohol metílico superaron los límites permisibles establecidos para exposición ocupacional, especialmente en las horas de mayor actividad operativa. Este comportamiento coincide con investigaciones desarrolladas en talleres automotrices de Asia y América Latina [8], [33], donde se evidencia que la ausencia de ventilación mecánica y el uso intensivo de solventes generan acumulación progresiva de contaminantes en espacios confinados. En este sentido, los picos registrados entre las 12:00 y 13:00 horas reflejan una correlación directa entre la intensidad del proceso productivo y el incremento de la exposición, lo cual refuerza la necesidad de implementar controles dinámicos adaptados a la operación real del taller.

Desde el punto de vista fisicoquímico, las diferencias observadas en el comportamiento de los compuestos analizados pueden explicarse por su

presión de vapor y volatilidad. El alcohol metílico, con una presión de vapor significativamente mayor, mostró una tendencia más pronunciada a evaporarse y acumularse en el ambiente, lo cual coincide con lo señalado en [44]. Por su parte, el xileno presentó una menor variabilidad debido a su menor volatilidad, mientras que el tolueno evidenció un comportamiento intermedio. Estas características influyen directamente en la dinámica de dispersión de los contaminantes y, por ende, en la efectividad de las estrategias de control implementadas.

La reducción observada tras la hermetización de la cabina pone en evidencia la importancia del control de fugas como medida preliminar antes de la implementación de sistemas mecánicos más complejos. Este hallazgo es consistente con lo reportado en la literatura [40], donde se destaca que la contención del contaminante en la fuente mejora significativamente la eficiencia de los sistemas de extracción. Asimismo, la estabilización de las concentraciones a lo largo de la jornada laboral sugiere una mejora en la renovación del aire y una disminución en la acumulación de vapores, lo que contribuye a generar condiciones más seguras para los trabajadores.

En relación con la propuesta de ventilación localizada, el dimensionamiento del sistema basado en criterios de la ACGIH y normativas internacionales demuestra coherencia técnica y aplicabilidad práctica. La capacidad de extracción planteada (12 000 m³/h) y la velocidad de captura adoptada (0,8 m/s) se encuentran dentro de los rangos recomendados para el control de contaminantes en procesos de pintura, lo que permite inferir que el sistema sería capaz de mantener las concentraciones de COVs por debajo de los límites permisibles en condiciones normales de operación. Este enfoque basado en parámetros técnicos validados refuerza la confiabilidad de la propuesta y su potencial de implementación en entornos similares.

Adicionalmente, desde una perspectiva operativa y económica, la solución planteada presenta ventajas relevantes en términos de costo-beneficio. La inversión estimada y el periodo de recuperación proyectado evidencian que la implementación de controles de ingeniería no solo mejora las condiciones de seguridad y salud ocupacional, sino que también resulta sostenible en el tiempo. Este aspecto es particularmente importante en contextos como el peruano, donde la informalidad y la limitada adopción de tecnologías de control representan barreras significativas para la gestión ambiental en el sector automotriz. Finalmente, los resultados del estudio no solo validan la efectividad de las medidas implementadas, sino que también aportan evidencia empírica sobre la aplicabilidad de soluciones de ingeniería en talleres de pequeña y mediana escala. En este sentido, la investigación contribuye al desarrollo de estrategias replicables para la reducción de emisiones de COVs, alineadas con los principios de sostenibilidad y mejora continua en la industria.

VI. CONCLUSIONES

El estudio determinó que las concentraciones iniciales de COVs en el taller de pintura automotriz superaban los límites permisibles del D.S. N. °015-2005-SA, evidenciando una ventilación deficiente y un alto riesgo de exposición para los trabajadores. Tras la hermetización de la cabina SAIMA, las concentraciones de tolueno, xileno y alcohol metílico se redujeron entre 60% y 70%, alcanzando valores dentro de los

límites permitidos, lo que confirma la efectividad del sellado estructural y el control de fugas como medidas inmediatas de mejora.

Asimismo, se validó técnicamente una propuesta de ventilación localizada con una capacidad total de 8 500 m³/h y una renovación general de 12 000 m³/h, diseñada conforme a la NTP 399.010:2005, la OSHA 1910.94(c) y la ACGIH (2024). Esta solución permitiría optimizar la extracción y disipación de vapores en las zonas críticas, complementando las mejoras estructurales implementadas y fortaleciendo el control de la exposición a contaminantes.

Desde una perspectiva operativa y económica, la propuesta presenta beneficios sostenibles, con una inversión estimada de S/ 6,200 y una recuperación proyectada en 2 a 3 años gracias a la reducción de riesgos, ausentismo y costos de mantenimiento. En conjunto, las acciones realizadas y las soluciones proyectadas representan una estrategia técnica eficaz y replicable, recomendándose para futuras investigaciones evaluar el comportamiento de los COVs en distintas condiciones operativas y el desempeño energético del sistema propuesto.

REFERENCIAS

- [1] J. O. Ogbodo, S. I. Egba, C. G. Ogbodo, I. E. Onwurah, and O. U. Njoku, "Effects of exposure to volatile organic compounds (VOCs) content from paint on automobile paint workers in Nsukka, South Eastern Nigeria," *Heliyon*, vol. 10, no. 17, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e37015.
- [2] M. Gao et al., "Source profiles and emission factors of VOCs from solvent-based architectural coatings and their contributions to ozone and secondary organic aerosol formation in China," *Chemosphere*, vol. 275, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.129815.
- [3] Y. Shi et al., "Sector-based volatile organic compound emission characteristics and reduction perspectives for coating materials manufacturing in China," *J Clean Prod*, vol. 394, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.136407.
- [4] Z. Liu et al., "Characterizing the emission behaviors of cumulative VOCs from automotive solvent-based paint sludge," *J Environ Manage*, vol. 317, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.jenvman.2022.115369.
- [5] H. Zheng et al., "Source apportionment of volatile organic compounds: Implications to reactivity, ozone formation, and secondary organic aerosol potential," *Atmos Res*, vol. 249, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.atmosres.2020.105344.
- [6] T. E. Burghardt and A. Pashkevich, "Emissions of Volatile Organic Compounds from road marking paints," *Atmos Environ*, vol. 193, pp. 153–157, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.atmosenv.2018.08.065.
- [7] X. Zhang et al., "A new classification approach to enhance future VOCs emission policies: Taking solvent-consuming industry as an example," *Environmental Pollution*, vol. 268, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.envpol.2020.115868.
- [8] B. Zhu et al., "Characterization of VOC source profiles, chemical reactivity, and cancer risk associated with petrochemical industry processes in Southeast China," *Atmos Environ X*, vol. 21, Jan. 2024, doi:

10.1016/j.aeaoa.2024.100236. C. Abreviaturas y acrónimos

[9] D. Tan, Z. Qin, H. Yin, J. Wang, and Y. Ge, "Implementation of monitoring and certification with the developed China heavy-duty vehicle energy consumption and carbon emission calculation model," *Atmos Pollut Res*, vol. 15, no. 12, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.apr.2024.102297.

[10] Q. Lin et al., "Impact of fine particulate pollution exposures on respiratory health in a megacity of Pakistan," *Atmos Pollut Res*, vol. 15, no. 12, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.apr.2024.102277.

[11] L. Hui et al., "VOC characteristics, chemical reactivity and sources in urban Wuhan, central China," *Atmos Environ*, vol. 224, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117340.

[12] Z. Zhao et al., "Ambient air pollution and stroke risk among different accumulation patterns of comorbidities: Casual inference study based on marginal 'between-within' model," *Atmos Pollut Res*, vol. 15, no. 12, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.apr.2024.102308.

[13] L. Wen, H. Fu, J. Hu, and S. Huang, "Analytical model for assessing mass transfer of VOC in liquid desiccant dehumidifier: A broad-range response to Henry's law constant," *Int J Heat Mass Transf*, vol. 221, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.125016.

[14] L. Zhang et al., "Characteristics of atmospheric volatile organic compounds in urban area of Beijing: Variations, photochemical reactivity and source apportionment," *J Environ Sci (China)*, vol. 95, pp. 190–200, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.jes.2020.03.023.

[15] D. Granadero, A. Garcia-Muñoz, R. Adam, F. Omil, and G. Feijoo, "Evaluation of abatement options to reduce formaldehyde emissions in vehicle assembly paint shops using the Life Cycle methodology," *Cleaner Environmental Systems*, vol. 11, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.cesys.2023.100139.

[16] Y. Wang et al., "Measurement of the key parameters of VOC emissions from wooden furniture, and the impact of temperature," *Atmos Environ*, vol. 259, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.atmosenv.2021.118510.

[17] Y. Zhang, N. Xu, J. Liu, Z. Guo, H. Guan, and Y. Bai, "A multisource mass transfer model for simulating VOC emissions from paints," *Science of the Total Environment*, vol. 902, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.165945.

[18] D. Zhang, B. He, M. Yuan, S. Yu, S. Yin, and R. Zhang, "Characteristics, sources and health risks assessment of VOCs in Zhengzhou, China during haze pollution season," *J Environ Sci (China)*, vol. 108, pp. 44–57, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.jes.2021.01.035. [19] A. Shojaei and R. Rostami, "BTEX concentration and health risk assessment in automobile workshops," *Atmos Pollut Res*, p. 102306, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.apr.2024.102306. [20] Z. Liu et al., "Comprehensive understanding the emission characteristics

and kinetics of VOCs from automotive waste paint sludge in a environmental test chamber," *J Hazard Mater*, vol. 429, May 2022, doi: 10.1016/j.jhazmat.2022.128387.

[21] B. Zhu et al., "Characterization of VOC source profiles, chemical reactivity, and cancer risk associated with petrochemical industry processes in Southeast China," *Atmos Environ X*, vol. 21, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.aeaoa.2024.100236.

[22] D. Granadero, A. Garcia-Muñoz, R. Adam, F. Omil, and G. Feijoo, "Evaluation of abatement options to reduce formaldehyde emissions in vehicle assembly paint shops using the Life Cycle methodology," *Cleaner Environmental Systems*, vol. 11, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.cesys.2023.100139.

[23] T. E. Burghardt and A. Pashkevich, "Emissions of Volatile Organic Compounds from road marking paints," *Atmos Environ*, vol. 193, pp. 153–157, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.atmosenv.2018.08.065.

[24] W. Villalobos-González, J. P. Sibaja-Brenes, J. C. Mora-Barrantes, and B. Álvarez-Garay, "Evaluación de los riesgos químicos por inhalación de las sustancias utilizadas en una industria gráfica," *Revista Tecnología en Marcha*, Mar. 2021, doi: 10.18845/tm.v34i2.4977. [25] X. Zhang et al., "A new classification approach to enhance future VOCs emission policies: Taking solvent-consuming industry as an example," *Environmental Pollution*, vol. 268, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.envpol.2020.115868.

[26] R. Ou et al., "Emission characteristics and ozone formation potentials of VOCs from ultralow-emission waterborne automotive painting," *Chemosphere*, vol. 305, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.135469.

[27] P. C. Moura, F. Santos, C. Fajão, and V. Vassilenko, "Towards the identification of the volatile organic compounds emitted by the coatings used in a car factory painting line," *J Coat Technol Res*, vol. 21, no. 2, pp. 665–682, Mar. 2024, doi: 10.1007/s11998-023-00847-7.

[28] W. Wei, S. Cheng, G. Li, G. Wang, and H. Wang, "Characteristics of volatile organic compounds (VOCs) emitted from a petroleum refinery in Beijing, China," *Atmos Environ*, vol. 89, pp. 358–366, 2014, doi: 10.1016/j.atmosenv.2014.01.038.

[29] Z. Zhao et al., "Ambient air pollution and stroke risk among different accumulation patterns of comorbidities: Casual inference study based on marginal 'between-within' model," *Atmos Pollut Res*, vol. 15, no. 12, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.apr.2024.102308.

[30] P. C. Moura, F. Santos, C. Fajão, and V. Vassilenko, "Towards the identification of the volatile organic compounds emitted by the coatings used in a car factory painting line," *J Coat Technol Res*, vol. 21, no. 2, pp. 665–682, Mar. 2024, doi: 10.1007/s11998-023-00847-7.

[31] D. Tan, Z. Qin, H. Yin, J. Wang, and Y. Ge, "Implementation of monitoring and certification with the developed China heavy-duty vehicle energy consumption and carbon emission calculation model," *Atmos Pollut Res*, vol. 15, no. 12, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.apr.2024.102297.

[32] Q. Lin et al., "Impact of fine particulate pollution

exposures on respiratory health in a megacity of Pakistan,” *Atmos Pollut Res*, vol. 15, no. 12, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.apr.2024.102277.

[33] W. Villalobos-González, J. P. Sibaja-Brenes, J. C. Mora- Barrantes, and B. Álvarez-Garay, “Evaluación de los riesgos químicos por inhalación de las sustancias utilizadas en una industria gráfica,” *Revista Tecnología en Marcha*, Mar. 2021, doi: 10.18845/tm.v34i2.4977.

[34] X. Zhang et al., “A new classification approach to enhance future VOCs emission policies: Taking solvent-consuming industry as an example,” *Environmental Pollution*, vol. 268, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.envpol.2020.115868.

[35] A. Levet et al., “Solvent database and in silico classification: A new methodology for solvent substitution and its application for microencapsulation process,” *Int J Pharm*, vol. 509, no. 1–2, pp. 454–464, Jul. 2016, doi: 10.1016/j.ijpharm.2016.05.053.