

Design of a gas extractor for minimizing the concentration of chemical aerosols in the automotive ironing and painting process, Arequipa – 2025

Choquepata Huayta, Pedro Luis¹ ; Tapia Chuquirimay, Glenn Robert² ; Velarde Loayza, Pamela Elizabeth³ 
^{1,2,3} Universidad Tecnológica del Perú, Perú, U21319883@gmail.com, U21306336@utp.edu.pe, pvelarde@utp.edu.pe

Abstract_ *In automotive body and paint shops, one of the main causes of exposure to chemical aerosols is poor ventilation and the lack of extraction systems, affecting workers' health. Therefore, this study will evaluate the concentration of chemical aerosols to which workers in an automotive workshop in the city of Arequipa are exposed, in order to design a localized extraction system that improves ventilation and occupational health and safety conditions. To this end, three environmental measurements were taken during the work shift, lasting one hour for each stage of the production process (normal conditions, paint mixing, and spray application), using a personal sampling pump and the NIOSH 0600 gravimetric method. Concentrations of 0.143 mg/m³, 2.36 mg/m³, and 6.19 mg/m³ were obtained, respectively, the latter exceeding the maximum permissible limit of 3 mg/m³ established in the D.S. No. 015-2005-SA for respirable particles, which demonstrates significant overexposure during the spray gun application stage. Finally, given that the maximum permissible limits for chemical aerosols to which workers are exposed are exceeded, the implementation of a 2 HP centrifugal fan, a Ø300 mm flexible duct, and a three-stage filtration system is proposed. This system captures and expels contaminated air to the outside through a metal chimney, aiming to significantly reduce the concentration of contaminants.*

Keywords: *chemical aerosols, fume extractor, industrial ventilation, automotive paint, occupational health.*

Diseño de un extractor de gases para minimizar la concentración de aerosoles químicos en el proceso de planchado y pintura automotriz, Arequipa – 2025

Choquepata Huayta, Pedro Luis¹ ; Tapia Chuquirimay, Glenn Robert² ; Velarde Loayza, Pamela Elizabeth³ 
^{1,2,3} Universidad Tecnológica del Perú, Perú, U21319883@gmail.com, U21306336@utp.edu.pe, pvelarde@utp.edu.pe

Resumen -En los talleres de planchado y pintura automotriz, una de las principales causas de exposición a aerosoles químicos, es la deficiente ventilación y la ausencia de sistemas extractores, afectando la salud de los trabajadores. Por ello, el presente estudio va a evaluar la concentración de aerosoles químicos a los que están expuestos los trabajadores de un taller automotriz en la ciudad de Arequipa, con el fin de diseñar un sistema de extracción localizada que mejore la ventilación y las condiciones de seguridad y salud ocupacional. Para ello, se realizaron tres mediciones ambientales durante el turno de trabajo, con una duración de una hora por cada etapa del proceso productivo (condiciones normales, mezcla de pinturas y aplicación con pistola), utilizando una bomba de muestreo personal y el método gravimétrico NIOSH 0600. De este modo, se obtuvieron concentraciones de 0.143 mg/m³, 2.36 mg/m³ y 6.19 mg/m³, respectivamente, siendo esta última superior al límite máximo permisible de 3 mg/m³ establecido en el D.S. N.º 015-2005-SA para partículas respirables, lo que evidencia una sobreexposición significativa durante la etapa de aplicación con pistola. Finalmente, al sobrepasar los límites máximos permisibles de aerosoles químicos a los que están expuestos los trabajadores, se propone la implementación de un ventilador centrífugo de 2 HP, un conducto flexible de Ø300 mm y un sistema de filtración en tres etapas, que capta y expulsa el aire contaminado al exterior mediante una chimenea metálica; orientado a disminuir significativamente la concentración de contaminantes.

Palabras clave: aerosoles químicos, extractor de gases, ventilación industrial, pintura automotriz, salud ocupacional.

I. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, el sector automotriz concentra más de 10 millones de trabajadores, quienes enfrentan riesgos significativos para la salud en procesos como el pintado de vehículos. En esta etapa se emplean solventes, aerosoles y compuestos con metales pesados que liberan compuestos orgánicos volátiles (COVs) y sustancias como BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno y xileno), afectando principalmente los sistemas respiratorio y nervioso [1] [2] [3]. Asimismo, la exposición prolongada a estos contaminantes puede causar enfermedades respiratorias, irritaciones dérmicas y oculares, alteraciones neurológicas y cardiovasculares; incluso se han descrito casos de “demencia del pintor” en trabajadores [4], [5]. En América latina como Perú y Colombia, muchos talleres de pintura automotriz operan de forma informal, incrementando el riesgo de enfermedades ocupacionales [6], [7], [8]. En Arequipa, gran parte de los talleres de planchado y pintura carecen de sistemas de extracción de gases y medidas efectivas para controlar la exposición [9]. Métodos analíticos como cromatografía de gases, espectrometría de masas y muestreos

24th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: “Engineering without Borders: Artificial Intelligence, Knowledge, Innovation, and Alliances for a Future from the Americas”. Hybrid Event, Santiago-Chile, July 15 - 17, 2026

personales han evidenciado concentraciones que superan los valores límite permisibles [10] [11] [12]. En los talleres de pintura automotriz con ventilación deficiente, la exposición a estos aerosoles aumenta considerablemente, pudiendo los trabajadores inhalar hasta un 50% de los COVs liberados durante el proceso de aplicación [13], [14]. Las partículas interactúan directamente con el tejido pulmonar a través de su área superficial, lo que puede influir en la intensidad de la respuesta biológica [15]. A nivel celular, también se ha asociado con la inducción de mutaciones genéticas, estrés oxidativo que daña el ADN y un mayor riesgo de desarrollar cáncer [16]. Sin embargo, la exposición ocupacional al cadmio y plomo (presentes en la composición de aerosoles) pueden provocar efectos tóxicos, incluyendo el hematológico, renal y cardiovascular [17] [18] [19]. Asimismo, [20] realizó un muestreo a 30 trabajadores, de los cuales 15 estaban expuestos a dióxido de titanio (TiO₂) en el área de producción y los otros 15 no tenían contacto con dicha sustancia. Por otro lado, [7] desarrolló un análisis con 120 trabajadores expuestos a solventes orgánicos presentes en pinturas en aerosol. Posteriormente, [21] evaluó la exposición de pintores automóbiles utilizando un sistema de muestreo que consistía en tubos con carbón activado conectados a una bomba portátil. [3] midió varios contaminantes en el ambiente, como monóxido y dióxido de carbono, formaldehído, dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno, sulfuro de hidrógeno y diferentes tipos de partículas en el aire (PM_{2.5}, PM₁₀, partículas respirables e inhalables), las concentraciones de partículas inhalables estaban por encima de los valores permitidos. Por otra parte, [22], [23], [24], [25] se enfocaron en evaluar las medidas de seguridad al utilizar solventes orgánicos, midiendo la exposición de los operarios a COVs durante su jornada laboral, así como los niveles de partículas en suspensión y gases contaminantes presentes en el ambiente de trabajo. [15] desarrolló un monitoreo individual de la exposición a partículas en diferentes zonas de trabajo, utilizando un dosimétrico de deposición pulmonar que permite estimar cuánto del material presente en el aire podría llegar a los pulmones de los trabajadores. Mientras que, [26] empleó una técnica de análisis muy precisa, basada en rayos X y radiación sincrotrón, para examinar filtros de cuarzo y así detectar pequeñas cantidades de metales presentes en PM_{2.5}. [27] propuso un sistema de ventilación general, combinando simulaciones por computadora de movimiento del aire (CFD) con herramientas de optimización, con el fin de mejorar la circulación del aire en espacios cerrados. Sin embargo, [28] llevó a cabo un análisis detallado de los COVs presente en el ambiente, utilizando una técnica avanzada que combina cromatografía de gases con espectrometría de movilidad iónica (GC-IMS). Esta

metodología permitió identificar 45 tipos de compuestos, incluyendo sustancias alifáticas, aromáticas y oxigenadas. Por otro lado, [29] demostró, mediante ensayos toxicológicos en animales, los efectos perjudiciales de la exposición a altos niveles de aerosoles. En su estudio, [30] analizó una amplia variedad de productos en aerosol usados comúnmente en talleres, como desengrasantes de motor, limpiadores de frenos y aceites lubricantes en spray. A partir del análisis de 82 productos, logró identificar más de 300 sustancias químicas distintas, algunas con una fórmula fija y otras clasificadas como mezclas de composición variable. Por otro lado, [31] realizó una medición detallada de la exposición a sustancias químicas en el ambiente laboral, aplicando métodos estandarizados como el protocolo NIOSH 1501 para recolectar muestras directamente en el lugar de trabajo. Luego, analizó los compuestos utilizando herramientas especializadas como la cromatografía de gases combinada con espectrometría de masas (GC-MS) y un detector de ionización de llama (GC-FID). En cambio, los autores [32], [33], [34] enfocaron sus estudios en el seguimiento biológico y la evaluación médica de los trabajadores expuestos. En sus análisis, seleccionaron 15 COVs y evaluaron los niveles de plomo en la sangre de pintores en la ciudad de Chennai. Además, aplicaron el análisis de ciclo de vida (ACV) como herramienta para identificar formas de reducir la emisión de formaldehído, reconociendo los altos riesgos que representan estas sustancias tanto para la salud humana como para el entorno ambiental. De acuerdo con [35], en su investigación sobre la relación entre el uso de aerosoles y problemas respiratorios, evaluó el potencial de 28 sustancias químicas presentes en limpiadores en spray para inducir asma. Para ello, utilizó modelos QSAR junto con una revisión de estudios previos que permitieron identificar cuáles de estos compuestos representaban mayor riesgo para el sistema respiratorio. [36] llevaron a cabo un estudio comparativo en el que analizaron a trabajadores expuestos a actividades de pintura automotriz y trabajadores que no tenían contacto con este tipo de labores. Los participantes fueron clasificados según su edad y el grado de exposición en el trabajo. Además, completaron un cuestionario que recogía datos sobre su salud previa, estilo de vida y condiciones laborales. También se recopiló información relacionada con síntomas respiratorios, tiempo de experiencia utilizando diversos tipos de pintura, uso de equipos de protección personal (EPP) y duración de cada tarea. Y se aplicaron herramientas estadísticas para evaluar y comparar los resultados entre ambos grupos. Posteriormente, [37] desarrolló un método para recolectar muestras de aire en interiores utilizando recipientes de acero inoxidable con sílice fundida de 3,2 litros de capacidad. Estos contenedores fueron previamente limpiados con nitrógeno y despresurizados para asegurar su pureza. Para la toma de muestras, se conectaron a un equipo de muestreo modelo CS1200, configurado con un flujo de 38 mL/min. Los dispositivos se colocaron a una altura de 1,5 metros, cerca del trabajador y a menos de un metro de la zona de aplicación de pintura, con el fin de reproducir condiciones de trabajo reales. En cada taller recolectó tres muestras,

asegurándose de verificar el vacío antes y después del proceso, y posteriormente las envió al laboratorio especializado en compuestos orgánicos volátiles (COVs) de la Universidad de Pekín para su análisis.

Por ello, [32] propuso una alternativa innovadora para el control y monitoreo de aerosoles, basada en un sistema compuesto por celulosa. Esta tecnología aprovecha la carga triboeléctrica generada por la respiración de las personas para atrapar material particulado, reducir la concentración de amoníaco en el ambiente y, al mismo tiempo, posibilitar la supervisión respiratoria en tiempo real, todo ello sin requerir una fuente de energía externa. Con el fin de obtener soluciones sostenibles destinadas a proteger a los trabajadores expuestos a COVs. De acuerdo con los resultados de los autores [17], [18], [19], observaron un aumento significativo en los niveles de cadmio (Cd) y plomo (Pb) detectados en suero y orina. En particular, la concentración de Cd en sangre se incrementó en más del 150 %, mientras que la de Pb superó el 140 %, lo que estuvo relacionado con efectos adversos como problemas cognitivos, presión arterial elevada y daños renales. Por su parte, [20] mediante su análisis determinó que, aunque las muestras de aire tomadas en puntos fijos dentro del área de trabajo mostraban concentraciones bajas de dióxido de titanio (TiO_2) con un valor de $0,114 \mu\text{g}/\text{m}^3$ durante una jornada laboral de 8 horas, las mediciones individuales en la zona de respiración de los operarios del área de producción revelaron valores más altos, con rangos que iban desde $0,011$ hasta $0,462 \mu\text{g}/\text{m}^3$, especialmente durante el proceso de fabricación de pinturas a base de agua. Según los resultados del autor [7], encontró que los trabajadores mostraron una mayor incidencia de hipertensión arterial, acompañada de síntomas como mareos, cefaleas y cansancio, los cuales están relacionados con la exposición prolongada a estos compuestos químicos. Por otro lado, [31] reportó, mediante su procedimiento metodológico, que las concentraciones de ciertos compuestos variaban desde $23.76 \pm 0.57 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en el caso de la acetona, hasta $92,489.91 \pm 0.65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el m,p-xileno. Además, detectó la presencia de compuestos como benceno, n-nonano, tricloroetileno, tetracloroetileno, xileno y etilbenceno, los cuales presentaban un índice de riesgo no cancerígeno (HQ) superior a 1, indicando posibles efectos adversos en la salud. [35] determinó que compuestos como la cloramina y el cloruro de benzalconio tienen respaldo clínico sobre su posible relación con el desarrollo de asma. Asimismo, otras sustancias como el EDTA (ácido etilendiaminotetraacético) y el ácido cítrico mostraron efectos negativos en estudios realizados con animales. Mientras que, [2] señaló que las concentraciones medidas pueden ser utilizadas como una referencia preliminar para detectar posibles riesgos para la salud. Además, resaltó la necesidad de profundizar en el análisis considerando características físicas de los aerosoles, como el tamaño de las partículas y la presencia de bioaerosoles viables, a fin de obtener una evaluación más completa del impacto sanitario. Por otra parte, [27], [38] indican que la fracción predominante del material particulado inhalado (PM_{10} , PM_4 y $\text{PM}_{2.5}$) tiende a acumularse

principalmente en las vías respiratorias superiores, mientras que cantidades menores logran alcanzar las zonas traqueobronquiales y alveolares del sistema respiratorio. Finalmente, [16], [38] identificaron la presencia de compuestos aromáticos nitrados, destacando el 4-nitrofenol y derivados del ácido salicílico. Las concentraciones detectadas en la fase particulada oscilaron entre $114,7 \pm 63,5$ y $296,6 \pm 62,5$ ng/m³, y en la fase gaseosa se encontraron niveles entre $148,7 \pm 7,4$ y $309,8 \pm 26,2$ ng/m³. Además, reportó que, entre los compuestos presentes en las pinturas, el butil acetato fue el de mayor concentración, alcanzando los 3256 ppb, lo que representa un 65,5 % del total.

Los autores [39], [40] subrayaron varios factores clave para reducir la emisión de COVs en los talleres dedicados a la pintura automotriz. Entre ellos destacan la implementación de tecnologías más eficientes, el uso de pinturas formuladas con bajos niveles de COVs y la mejora en los procesos tanto de aplicación como de secado. Asimismo, [3] evidenció una relación entre la exposición a contaminantes del aire en pequeñas industrias y la disminución de la función pulmonar de los trabajadores, principalmente los que no contaban con EPPs.

II. METODOLOGÍA

La investigación se desarrolla bajo un enfoque cuantitativo, según [41], [42] fundamentado en la medición y análisis de datos numéricos para evaluar la concentración de aerosoles químicos a los que están expuestos los trabajadores del taller de planchado y pintura “Chin Chin”, en la ciudad de Arequipa. El estudio tiene un alcance descriptivo [41], ya que se enfoca en describir el efecto que causan los aerosoles en los trabajadores, mediante técnicas de recolección de datos, con el fin de evaluar el nivel de exposición ocupacional existente. El diseño metodológico es no experimental de tipo transversal, ya que según [41], [42] indica que no hay manipulación de la variable y los datos se recolectarán en un solo momento determinado.

2.1 Visitas al ambiente de trabajo

Se realizó una inspección general del área de pintado, empleando una ficha de observación y registro fotográfico, para verificar la limpieza y presencia de residuos (restos de pintura, solventes); el nivel y distribución de la iluminación (natural y artificial); y la ventilación (existencia de aberturas, extractores y dirección del flujo de aire).

2.2 Evaluación de flujo de aire y ventilación

El ingreso de aire natural es por las puertas frontales, lo que genera una circulación limitada. En las zonas interiores, especialmente en esquinas y en el área de pintado, el aire se estanca, favoreciendo la acumulación de vapores, aerosoles y partículas.

2.3 Revisión de fichas técnicas y etiquetas de productos

Se identificaron deficiencias en su conservación y almacenamiento, como envases deteriorados, etiquetas ilegibles, desorden y falta de ventilación adecuada. De acuerdo con [43], [44], [45] los empleadores deben contar con hojas de seguridad actualizadas de todas las

sustancias peligrosas que se utilizan para garantizar la protección de la salud y seguridad de los trabajadores.

2.4 Revisión de la normativa vigente sobre Valores Límite Permisibles (VLP) de agentes químicos según el DS N° 015-2005-SA

Se identificaron los valores límite permisibles de los principales agentes químicos asociados a las actividades de pintura automotriz, incluyendo solventes volátiles como tolueno, xileno, acetona y cloruro de metileno, los cuales pueden provocar irritación respiratoria y efectos sobre el sistema nervioso central. Asimismo, se consideraron sustancias de alta toxicidad y carácter cancerígeno, como el benceno, formaldehído, arsénico, cromo VI y cloruro de vinilo, cuyos bajos límites de exposición evidencian su peligrosidad incluso a concentraciones mínimas. Además, se evaluó la presencia de partículas respirables, las cuales representan un riesgo adicional al poder penetrar en los pulmones y generar daños crónicos.

2.5 Identificación de los contaminantes a evaluar

Se estableció que los contaminantes prioritarios a evaluar en el aire del área de pintado corresponden a los aerosoles líquidos y sólidos generados durante la aspersión, incluyendo partículas inhalables y respirables (PM₁₀ y PM_{2.5}), así como vapores orgánicos volátiles liberados durante las etapas de mezcla, aplicación y secado. Asimismo, se consideran los isocianatos presentes en pinturas y barnices de poliuretano, responsables de la sensibilización respiratoria, y otros compuestos señalados en las MSDS, como el formaldehído en aditivos, que aun en bajas concentraciones representan riesgos relevantes debido a sus propiedades tóxicas.

2.6 Selección del método de muestreo adecuado

Se utilizó una bomba de muestreo AirChek® TOUCH Serie 220, un equipo portátil utilizado en higiene industrial para la recolección de aerosoles y vapores. Funciona con batería recargable de ion-litio, mantiene un flujo constante entre 1000 y 5000 ml/min (con opción de bajo flujo) y compensa automáticamente variaciones de presión y temperatura, garantizando precisión en las mediciones.

2.7 Realización de mediciones

A continuación, en la Tabla 1 se presenta el registro de cadena de custodia del laboratorio, el cual documenta el procedimiento de muestreo realizado el 30 de septiembre de 2025 en el distrito de Hunter – Ampliación Pampas del Cuzco, correspondiente al proyecto “Evaluación de la concentración de partículas respirables”. Se efectuaron tres mediciones consecutivas (P-01, P-02 y P-03) en el área de trabajo del pintor automotriz, con una duración aproximada de una hora cada una, utilizando filtros codificados y una bomba de muestreo (código EL/BG/15). Los parámetros evaluados correspondieron a partículas respirables, bajo las condiciones establecidas para el monitoreo de higiene ocupacional. Este registro asegura la trazabilidad, control y confiabilidad de los datos obtenidos durante el proceso de medición.

TABLA 1 Gestión del laboratorio de ensayo

	GESTIÓN DEL LABORATORIO DE ENSAYO					Código:	PL-LEN-FOR-01		
						Página:	01 de 01		
	CADENA DE CUSTODIA DE MONITOREO DE SALUD E HIGIENE OCUPACIONAL					Versión:	1		
						Fecha:	30-09-2025		
OT N°		106462							
DATOS DEL SOLICITANTE DEL SERVICIO					DATOS DEL PROYECTO				
CLIENTE		Pedro Luis Choquepata Huayta			NOMBRE DEL PROYECTO		Evaluación de la concentración de partículas respirables		
DNI		70598974							
CELULAR		997696281			LUGAR DE MUESTREO		Hunter – Ampliación Pampas del Cuzco		
Código de laboratorio	Estación de muestreo	Descripción	DATOS DEL MUESTREO			PARÁMETROS SOLICITADOS		OBSERVACIONES	
			Inicio	Final	Código de filtro o placa	AGENTES QUÍMICOS			
						Partículas respirables	Partículas inhalables		
M25000490	P-01	Pintor de autos	F: 30/09/25 H: 13:35	F: 30/09/25 H: 14:45	0C25067	x			
M25000491	P-02	Pintor de autos	F: 30/09/25 H: 15:00	F: 30/09/25 H: 16:00	0C25073	x			
M25000492	P-03	Pintor de autos	F: 30/09/25 H: 16:10	F: 30/09/25 H: 17:10	0C25071	x			

2.8. Sistema de monitoreo en tiempo real integrado al sistema de extracción

Como parte del sistema de extracción localizada diseñado, se incorpora un sistema de monitoreo en tiempo real basado en un sensor de material particulado tipo PMS5003, el cual permite medir concentraciones de partículas respirables (PM_{2.5} y PM₁₀) generadas durante el proceso de pintura automotriz. Este sensor opera mediante el principio de dispersión láser, en el cual un haz de luz interactúa con las partículas suspendidas en el aire; la luz dispersada es captada por un fotodetector y procesada mediante la teoría de dispersión de Mie, la cual describe la interacción de la luz con partículas de tamaño similar a su longitud de onda y permite determinar su tamaño y concentración en el aire. El dispositivo proporciona datos en tiempo real en formato digital, permitiendo el monitoreo continuo de la calidad del aire en la zona de respiración del trabajador, especialmente en el área de aplicación de pintura, lo que facilita la verificación de la eficiencia del sistema de extracción y el control de la exposición a aerosoles químicos, tal como se observa en la Fig. 1.



Figura 1 Sensor de material particulado PMS5003 utilizado para el monitoreo en tiempo real

III. RESULTADOS

3.1 Mediciones de exposición a aerosoles químicos

Durante una jornada laboral se realizó el monitoreo ambiental de partículas respirables en tres puntos de muestreo (P-01, P-02 y P-03) del área de pintura automotriz. El procedimiento se efectuó mediante el método gravimétrico NIOSH 0600, con volúmenes de aire comprendidos entre 140 y 160 litros y caudales promedio de 2,0 a 2,5 L/min, durante aproximadamente una hora por cada medición. El objetivo fue cuantificar la concentración total de partículas respirables presentes en el ambiente laboral sin diferenciar por tipo de compuesto, considerando únicamente la fracción respirable, es decir, aquella capaz de alcanzar los alvéolos pulmonares. Los resultados obtenidos se compararon con el Límite Máximo Permissible (LMP) de 3 mg/m³ de partículas respirables establecido en el *Decreto Supremo N.º 015-2005-SA*, el cual corresponde a partículas respirables no clasificadas de otro modo (PNOC). Este valor representa la concentración promedio ponderada en ocho horas (TWA-8 h) que no debe superarse para garantizar la protección de la salud de los trabajadores expuestos a material particulado. A continuación, en la Tabla 2 se presentan los resultados del monitoreo realizado. En la estación P-01, correspondiente a la medición del trabajador en condiciones normales de trabajo y con una duración de 60 minutos, se registró una concentración de <0.143 mg/m³, equivalente a menos del 5 % del Límite Máximo Permissible de partículas respirables (LMP = 3 mg/m³), lo que evidencia una exposición mínima o prácticamente nula a partículas respirables. En la estación P-02, con una duración de 70 minutos, donde el trabajador realizaba la mezcla de pinturas y solventes, la concentración obtenida fue de 2.36 mg/m³,

correspondiente al 78.7 % del LMP, valor que se mantiene dentro del rango permitido, aunque refleja una exposición moderada asociada a la manipulación de productos químicos. Finalmente, en la estación P-03, con una duración de 64 minutos, donde el trabajador

efectuaba el pintado de vehículos, se obtuvo una concentración de 6.19 mg/m³, lo que supera el límite máximo permitido de partículas respirables (3 mg/m³), evidenciando una exposición elevada a aerosoles químicos y vapores de solventes durante la aplicación con pistola.

TABLA 2 Concentración de partículas respirables y comparación con el LMP según el D.S. N.º 015-2005-SA

Estación	Código de informe	Tarea / proceso	Duración (min)	Caudal (L/min)	Volumen (m³)	Masa colectada (mg)	Concentración (mg/m³)	LMP de partículas respirables (mg/m³)	% del LMP	Cumple
P-01	LEM-25-00490	Pintura automotriz	60	2.3	0.14	< 0.02	< 0.143	3.0	< 4.8 %	Sí
P-02	LEM-25-00491	Pintura automotriz	70	2.0	0.14	0.33	2.36	3.0	78.7 %	Sí
P-03	LEM-25-00492	Pintura automotriz	64	2.5	0.16	0.99	6.19	3.0	206.3 %	No

La Tabla 3 resume las concentraciones de partículas respirables obtenidas en las tres estaciones de muestreo y su comparación con el Límite Máximo Permisible (LMP = 3 mg/m³) establecido en el D.S. N.º 015-2005-SA. Se observa que en la estación P-01 se registró una concentración de 0.143 mg/m³, valor muy por debajo del límite, lo que indica una exposición mínima bajo condiciones normales de trabajo. En exposición moderada relacionada con la mezcla de pinturas y solventes. Finalmente, en la estación P-03, la concentración alcanzó 6.19 mg/m³, superando en más del doble el LMP (3 mg/m³), lo que refleja una sobreexposición significativa.

TABLA 3 Valores ponderados de las concentraciones de partículas respirables.

Estación	Concentración (mg/m³)	LMP (mg/m³)
P-01	0.143	3
P-02	2.36	3
P-03	6.19	3

La Fig. 2 muestra de forma comparativa las concentraciones de partículas respirables registradas en las tres estaciones de muestreo (P-01, P-02 y P-03) frente al Límite Máximo Permisible (LMP = 3 mg/m³) establecido en el D.S. N.º 015-2005-SA. En el eje horizontal se representan las estaciones y en el eje vertical las concentraciones en mg/m³. Se incluye una línea horizontal en 3.0 mg/m³, que marca el valor límite de exposición de partículas respirables, mientras que las barras azules indican concentraciones iguales o inferiores al LMP y las barras rojas aquellas que lo superan. La estación P-01 registró una concentración de 0.143 mg/m³, correspondiente a una exposición mínima, ya que el valor se encuentra por debajo del rango de detección efectiva del método analítico. En la estación P-02, la concentración fue de 2.36 mg/m³, lo que refleja una exposición moderada asociada a la mezcla de pinturas y solventes. Finalmente, la estación P-03 alcanzó una concentración de 6.19 mg/m³, superando el límite establecido de partículas respirables de 3 mg/m³, lo que evidencia una exposición crítica durante la aplicación de D.S.

N.º 005-2012-SA, y justifica la necesidad de implementar un extractor de gases en el área de trabajo.

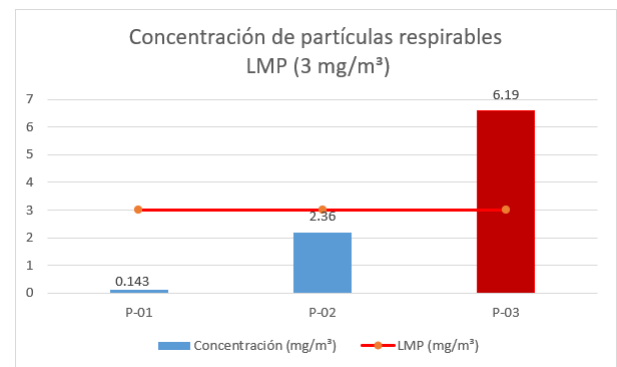


Figura 2 Concentración de partículas respirables

3.2. Determinación de los requerimientos técnicos del sistema de extracción

Durante el monitoreo ambiental realizado en el taller se registraron concentraciones de 0.143 mg/m³ (P-01), 2.36 mg/m³ (P-02) y 6.19 mg/m³ (P-03). Dando como resultado que el último valor excede el Límite Máximo Permisible (LMP) de 3 mg/m³ definido en el Decreto Supremo N.º 015-2005-SA, para partículas respirables no clasificadas (PNOC). Ante esta situación, se propuso un diseño de un sistema de extracción localizada móvil como una alternativa técnica para controlar los contaminantes directamente en la fuente de emisión. El sistema busca ofrecer una solución eficiente y económica para talleres que pintan directamente sobre el vehículo, mejorando la ventilación y la seguridad ocupacional.

3.2.1. Cálculo del caudal general (ventilación del taller)

El cálculo del caudal general permite determinar la cantidad de aire que debe circular en el taller de pintura automotriz para mantener condiciones adecuadas de ventilación.

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

V: Volumen de aire del taller (área)

N: Recambios de aire por hora (adaptado de [46]: 100 recambios)

Para 100 recambios: $Q = 72 \times 100 = 7,200 \text{ m}^3/\text{h}$

El resultado del cálculo indica que el sistema de ventilación del taller debe renovar entre 4,320 y 7,200 m³ de aire por hora, es decir, reemplazar completamente el aire interior entre 60 y 100 veces cada hora. En este caso, se trabajará con 100 recambios por hora ($Q = 72 \times 100 = 7,200 \text{ m}^3/\text{h}$), ya que el proceso de pintura automotriz genera una alta concentración de vapores de solventes y partículas que requieren una extracción más intensa. Este caudal asegura una ventilación eficiente, elimina contaminantes y protege la salud de los trabajadores.

3.2.2. Cálculo de la potencia del ventilador

El cálculo de la potencia del ventilador permite determinar la energía que debe suministrar el motor para vencer las pérdidas de presión del sistema.

$$P = \frac{Q \times \Delta p}{\eta} \quad (2)$$

Q: Caudal de aire

Δp : Pérdida de potencia

n: Eficiencia del ventilador

$$P = \frac{2.0 \times 300}{0.60} = 1,000 \text{ W} = 1.34 \text{ HP}$$

El resultado indica que el ventilador debe contar con una potencia mínima de 1.34 HP para mover el caudal de aire de 7,200 m³/h, superando las pérdidas por fricción y resistencia en los conductos y filtros. Este valor permite seleccionar un motor adecuado que garantice el funcionamiento eficiente del sistema de extracción localizada, evitando sobrecargas y asegurando una ventilación continua y efectiva dentro del taller de pintura automotriz.

3.2.3. Cálculo del caudal de extracción localizada con campana con brida

El cálculo del caudal de extracción localizada permite determinar la cantidad de aire que debe aspirar la campana para capturar eficazmente los contaminantes.

$$Q = 2750 V_c (10d^2 + S) \quad (3)$$

V_c: Velocidad de captación

A: Área de abertura de la campana

d: Profundidad de la campana

S: L x H

$$Q = 2750 \times 0.8 ((10(0.3)^2 + 0.5)) = 0.09 \text{ m}^2 \\ Q = 3080 \text{ m}^3/\text{h}$$

El resultado indica que la campana debe aspirar 3080 m³/h de aire, lo que significa que el sistema de extracción debe ser capaz

de mover ese volumen de aire cada hora para captar eficazmente los contaminantes justo en el punto donde se generan. Este caudal garantiza que los vapores de solventes, gases y partículas de pintura sean arrastrados hacia la campana antes de dispersarse por el ambiente del taller. Además, mantener este flujo de aire constante asegura un control más eficiente de los contaminantes en la fuente, lo cual es una práctica recomendada por las normas de higiene industrial y ventilación ocupacional.

a) Cálculo del área y diámetro del conducto de extracción

El cálculo del área del conducto permite conocer la sección transversal necesaria para que el aire se desplace con la velocidad adecuada dentro del sistema de extracción.

$$A = \frac{Q}{3600 \times v} \quad (4)$$

Q: Caudal (m³/h)

v: Velocidad del aire en el conducto (12 m/s)

$$A = \frac{7,200}{3600 \times 12} = \frac{7,200}{43,200} = 0.1667 \text{ m}^2$$

b) Cálculo del diámetro del conducto principal

El cálculo del diámetro traduce el área obtenida en una medida práctica para la selección o fabricación del conducto.

$$d = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \quad (5)$$

$$d = \sqrt{\frac{4 \times 0.1667}{3.1416}} = \sqrt{0.2123} = 0.46 \text{ m} = 460 \text{ mm}$$

c) Cálculo del área del conducto secundario

$$A = \frac{3,080}{3600 \times 12} = \frac{3,080}{43,200} = 0.0714 \text{ m}^2$$

d) Cálculo del diámetro del conducto secundario

$$d = \sqrt{\frac{4 \times 0.0714}{3.1416}} = \sqrt{0.0424} = 0.205 \text{ m} = 205 \text{ mm}$$

Los resultados obtenidos muestran que el diámetro teórico del conducto principal es de 0.46 m y el del conducto secundario es de 0.300 m, valores que representan las dimensiones necesarias para transportar el caudal de aire con una velocidad de 12 m/s sin generar pérdidas de carga excesivas ni reducción de eficiencia en el sistema. Al comparar estos valores con las medidas comerciales disponibles, se seleccionan conductos de Ø500 mm y Ø300 mm, respectivamente, ya que permiten mantener el flujo constante, estable y con una velocidad de aire controlada dentro del rango óptimo de operación.

3.2.4. Parámetros técnicos del diseño

La Tabla 4 presenta los parámetros técnicos aplicados al diseño del sistema de extracción localizada, que aseguran la eficiencia

en la captación y evacuación de contaminantes en el taller de pintura automotriz. El caudal total de diseño (Q_g) es de 7,200 m^3/h , equivalente a 100 recambios de aire por hora, garantizando una adecuada ventilación. El caudal por punto (Q_p) es de 3,080 m^3/h , con una velocidad de captación (V_c) de 0.8 m/s, valor recomendado por [1]. La velocidad en conductos (v) se fijó en 12 m/s, óptima para el transporte de aerosoles sin sedimentación. La presión total del sistema es de 300 Pa, con una potencia de ventilador de 1.0 kW (1.34 HP) y un motor de 2 HP que brinda margen operativo. Finalmente, se adoptaron un conducto principal de Ø500 mm, un secundario de Ø300 mm y una altura de descarga de 3 m mediante chimenea metálica, asegurando la correcta dispersión de los gases al exterior.

TABLA 4 Parámetros técnicos aplicados al diseño del sistema de extracción localizada

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad	Observación
Caudal total de diseño	(Q_g)	7 200	m^3/h	100 recambios/h
Caudal por punto de extracción	(Q_p)	3 080	m^3/h	Captura localizada
Velocidad de captación	(V_c)	0.8	m/s	Según [1]
Velocidad en conductos	(v)	12	m/s	Transporte de aerosoles
Presión total estimada	Delta P	300	Pa	Pérdida del sistema
Potencia del ventilador	(P)	1.0	kW	Equiv. 1.34 HP
Motor seleccionado	-	2	HP	Margen operativo
Diámetro conducto principal	(d1)	0.46	m	Se adopta Ø500 mm
Diámetro conducto secundario	(d2)	0.205	m	Se adopta Ø300 mm
Altura de descarga	-	3	m	Chimenea metálica

La Fig. 3 ilustra las configuraciones adecuadas de extracción de contaminantes según el tipo de labor realizada en el taller, comparando distintos métodos de captación del aire contaminado, donde se evidencia que la eficacia del sistema no depende únicamente de la capacidad de extracción, sino principalmente de la correcta dirección del flujo de aire, la ubicación del punto de captación y la distancia entre la fuente de emisión y dicho punto, ya que cuando la extracción se realiza de forma localizada del contaminante se logra capturar aerosoles, vapores y partículas antes de su dispersión en el ambiente; en

contraste, configuraciones inadecuadas favorecen la propagación de los contaminantes en el área de trabajo, incrementando la exposición del operario, por lo que el gráfico refuerza el principio de que un diseño adecuado y una correcta orientación del flujo de ventilación mejoran significativamente la eficiencia del sistema de extracción, reducen la concentración de contaminantes en el aire y contribuyen a la protección de la salud y seguridad del trabajador.

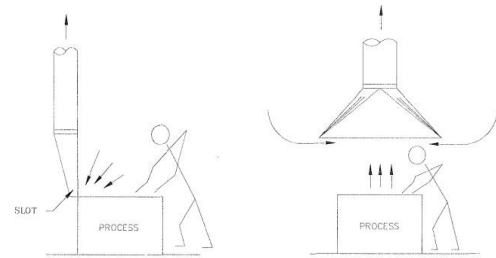


Figura 3 Dirección y configuración del flujo de aire, adaptado de [46]

3.3. Elaboración del diseño del sistema de extracción localizada

El diseño del sistema de extracción localizada se desarrolló tomando como base los resultados del monitoreo ambiental, los parámetros técnicos calculados y los criterios de ventilación industrial recomendados.

3.3.1. Funcionamiento del sistema

La Fig. 4 muestra el diseño del sistema de extracción localizada fijo con campana con brida, destinado a la captación de contaminantes generados durante la aplicación de pintura. El sistema cuenta con una unidad principal fija que integra filtros, ventilador centrífugo y chimenea de descarga, ubicada estratégicamente en el taller. La campana extractora, conectada mediante un conducto flexible de Ø205 mm, permite una captación directa y eficiente de los aerosoles en el punto de emisión sin interferir con el operario.

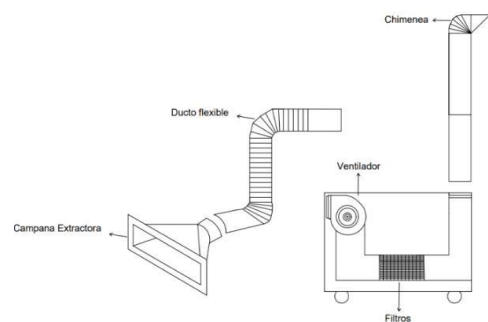


Figura 4 Plano técnico del sistema de extracción localizada

3.4. Estimación de costos del sistema de extracción localizada

El costo del sistema de extracción localizada fue estimado considerando los equipos y materiales necesarios para su implementación. Entre los componentes principales se incluyen el ventilador centrífugo, los conductos, la campana de captación, el sistema de filtración y la chimenea de descarga. Como se

observa en la Tabla 5, el costo total estimado del sistema asciende a S/ 4,848.9, siendo el ventilador centrífugo el componente de mayor incidencia en el costo total. Asimismo, el uso combinado de ductos rígidos y flexibles permite optimizar los costos sin comprometer la eficiencia en la captación y extracción de contaminantes.

TABLA 5 Costos de equipos y materiales del sistema de extracción localizada

Ítem	Componente	Cantidad	Costo unitario (S/.)	Costo total (S/.)
1	Ventilador centrífugo de 2HP	1	2,000	2,000
2	Ducto principal de acero galvanizado de Ø500 mm	3 m	200	600
3	Ducto secundario flexible aluminio de Ø300 mm	3 m	66.3	198.9
4	Campana metálica con brida	1	500	500
5	Prefiltros MERV 8	1	150	150
6	Filtro de cartucho MERV 13, 15	1	400	400
7	Filtro de carbón activado	1	300	300
8	Chimenea metálica de descarga	1	700	700
TOTAL				4,849

IV. DISCUSIÓN

A partir de los resultados obtenidos, se evidencia que las operaciones de pintura automotriz, especialmente la aplicación con pistola, generan altas concentraciones de aerosoles y vapores que superan el límite máximo permisible de 3 mg/m³, evidenciando que la ventilación natural es insuficiente para controlar los contaminantes. Esta situación se debe a la atomización de los solventes y al reducido volumen del taller, lo que favorece la acumulación de partículas finas, coincidiendo con lo reportado por [18], [20], [47], [48] quienes señalan que la ausencia de ventilación localizada incrementa la exposición ocupacional en talleres de pintura automotriz. El análisis del diseño propuesto determinó que un caudal de 7,200 m³/h y una velocidad de captación de 0.8 m/s son adecuados para asegurar una renovación constante del aire y mantener las concentraciones de aerosoles dentro de los límites recomendados, en concordancia con lo señalado de [46]. En consecuencia, el sistema cumple con las exigencias técnicas necesarias para reducir la exposición directa del trabajador. Además, la potencia del ventilador (1.34 HP) y las dimensiones de los conductos (Ø500 mm y Ø300 mm) aseguran un flujo estable y eficiente, en concordancia con los criterios de [46], que señala que una adecuada relación entre velocidad y diámetro de los conductos optimiza el transporte de aerosoles y reduce la sedimentación interna. Asimismo, la incorporación de un sistema de filtración en tres etapas constituye una solución integral para la remoción de partículas

y vapores orgánicos, donde el prefiltro actúa como barrera inicial para partículas gruesas, el cartucho plisado retiene aerosoles finos y el carbón activado adsorbe los compuestos orgánicos volátiles. Este enfoque coincide con lo reportado de [46] que destaca la eficiencia de los sistemas multietapa en procesos de pintado industrial. Finalmente, las dimensiones reducidas y la baja altura del taller justifican la implementación de un sistema fijo de extracción instalado en el techo, con posibilidad de regulación según la operación.

Esta disposición favorece el flujo de aire ascendente y mejora la captura de contaminantes en suspensión, en concordancia con las recomendaciones técnicas de [46], para el control de aerosoles generados por pulverización. En síntesis, los resultados confirman que la implementación de un sistema fijo de extracción localizada con filtración multietapa es una alternativa técnica viable y eficiente para reducir la concentración de aerosoles y vapores, mejorando la calidad del aire y la seguridad ocupacional de los trabajadores del taller automotriz.

V. CONCLUSIONES

Ante la evidencia de la deficiente ventilación, el desorden, la falta de limpieza y el uso inadecuado de equipos de protección personal en el área de pintura, se corroboró que la concentración de aerosoles químicos en el ambiente laboral supera los Límites Máximos Permisibles (LMP) de 3 mg/m³ para partículas respirables establecidos en el D.S. N.º 015-2005-SA. Esta superación de los valores permisibles se presentó principalmente durante la aplicación de pintura con pistola, donde la ventilación natural fue insuficiente para dispersar los contaminantes, generando una acumulación considerable de partículas y vapores en el aire que incrementa el riesgo de exposición ocupacional.

Los cálculos realizados demostraron que los caudales de ventilación son directamente proporcionales a la frecuencia de trabajo y a la concentración de contaminantes generados en cada estación. En la estación P-01 (0.143 mg/m³) se determinó que un caudal localizado de 900 m³/h y un caudal general de 4,320 m³/h resultan adecuados para mantener condiciones seguras de exposición; mientras que en la estación P-02 (2.36 mg/m³) fue necesario incrementar el caudal localizado a 1,350 m³/h y el caudal general entre 5,760 y 7,200 m³/h, debido a una mayor manipulación de productos y a niveles de concentración próximos al límite máximo permisible. Finalmente, en la estación P-03 (6.19 mg/m³), correspondiente a la aplicación con pistola, se superó ampliamente dicho límite, lo que justificó la necesidad de una extracción localizada mínima de 1,440 m³/h y un caudal general de 7,200 m³/h para garantizar una ventilación efectiva y reducir el riesgo de exposición ocupacional. Los cálculos realizados demostraron que los caudales de ventilación son directamente proporcionales a la frecuencia de trabajo y a la concentración de contaminantes generados en cada estación. En la estación P-01 (0.143 mg/m³) se determinó que un caudal localizado de 900 m³/h y un caudal general de 4,320 m³/h resultan adecuados para mantener condiciones seguras de exposición; mientras que en la estación P-02 (2.36 mg/m³) fue necesario incrementar el caudal

localizado a 1,350 m³/h y el caudal general entre 5,760 y 7,200 m³/h, debido a una mayor manipulación de productos y a niveles de concentración próximos al límite máximo permisible. Finalmente, en la estación P-03 (6.19 mg/m³), correspondiente a la aplicación con pistola, se superó ampliamente dicho límite, lo que justificó la necesidad de una extracción localizada mínima de 1,440 m³/h y un caudal general de 7,200 m³/h para garantizar una ventilación efectiva y reducir el riesgo de exposición ocupacional.

Mediante el análisis realizado, se determinó que el diseño del sistema de extracción localizada fijo con campana móvil, con un caudal de 7 200 m³/h y una unidad de filtración en tres etapas (prefiltro, cartucho y carbón activado), representa una solución técnica eficiente y viable para el control de aerosoles químicos en talleres automotrices. Su aplicación permitirá optimizar la ventilación, reducir la concentración de contaminantes a niveles inferiores al límite permisible y garantizar el cumplimiento de los criterios de higiene industrial y seguridad ocupacional.

AGRADECIMIENTO/RECONOCIMIENTO

De manera especial, se reconoce el apoyo y la orientación brindados por el docente asesor, cuyos conocimientos técnicos y recomendaciones metodológicas fueron de gran importancia para la adecuada planificación, ejecución y culminación de la presente investigación. Asimismo, se agradece a los trabajadores y responsables del taller de planchado y pintura por las facilidades otorgadas para la realización de las mediciones, observaciones de campo y la recolección de información, lo que permitió evaluar de manera objetiva las condiciones reales de exposición a contaminantes en el ambiente laboral. Finalmente, se expresa un sincero agradecimiento a los familiares y compañeros por su apoyo constante, motivación y colaboración durante el desarrollo del presente trabajo de investigación.

REFERENCIAS

- [1] C. Reggiani Da Silva and M. Oliveira, "Compuestos orgánicos volátiles (COV): Efecto de las técnicas de reducción de COV en Síntesis de Látex con Baja Concentración de Propiedades de los látex y pinturas," vol. 24, p. 478, 2014, doi: 10.1590/0104-1428.1506.
- [2] H. J. Oh, Y. Ma, and J. Kim, "Human inhalation exposure to aerosol and health effect: Aerosol monitoring and modelling regional deposited doses," Int. J. Environ. Res. Public Health, vol. 17, no. 6, Mar. 2020, doi: 10.3390/ijerph17061923.
- [3] I. Ahmad and M. A. Balkhyour, "Occupational exposure and respiratory health of workers at small scale industries," Saudi J. Biol. Sci., vol. 27, no. 3, pp. 985–990, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.sjbs.2020.01.019.
- [4] I. C. James, N. A. Imaga, T. M. Dokunmu, I. O. Adedeji, O. O. Emmanuel, and M. E. Orija, "Effects of chronic exposure to paint fumes among artisans in Lagos State, Nigeria," Toxicol. Rep., vol. 9, pp. 663–669, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.toxrep.2022.03.027.
- [5] Prashant Kumar et al., "Potential health risks due to in-car aerosol exposure across ten global cities," Environ. Int., vol. 155, 2021.
- [6] M. Varona-Urbe et al., "Biomarkers of susceptibility and

- effect in car painters exposed to organic solvents," Colomb. Med., vol. 51, no. 1, pp. 1–12, 2020, doi: 10.25100/cm.v51i1.3646.
- [7] A. A. O. Temitope Olumuyiwa Ojo, "Work Practices and Health Problems of Spray Painters Exposed to Organic Solvents in Ile-Ife, Nigeria".
- [8] W. H. Cheng, H. L. Huang, and M. H. Chuang, "Use of passive SPME sampling devices to determine exposure of oil painters to organic compounds," J. Air Waste Manage. Assoc., vol. 70, no. 3, pp. 253–259, Mar. 2020, doi: 10.1080/10962247.2019.1694090.H. V. Marco Olmos, "Determinación del nivel de concentración de compuestos orgánicos volátiles (COV) presente en matizados y los efectos que pueden producir en la salud de los trabajadores en la tienda de venta de pinturas 'Satinados Master,'" 2020, Accessed: May 16, 2025. [Online]. Available: <https://repositorio.utp.edu.pe/handle/20.500.12867/4116>
- [9] Jacques. Lesage, Irene. DeGraff, and Richard. Danchik, Isocyanates : sampling, analysis, and health effects. ASTM, 2001.
- [10] A. Pronk, Isocyanate exposure and respiratory health effects in the spray painting industry. 2007. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/46687015>
- [11] V. Castañeda, "Implementación de controles en el área de pintura para la entrega de vehículos reparados en el taller multimarca Germania automotriz S.A.C.," 2018.
- [12] 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.
- [13] M. Tiessen, N. L. Stock, and T. Stotesbury, "Untargeted SPME-GC-MS characterization of VOCs released from spray paint," J. Chromatogr. Sci., vol. 59, no. 2, pp. 103–111, Feb. 2021, doi: 10.1093/chromsci/bmaa082.
- [14] L. Davulienė et al., "Evaluation of Work-Related Personal Exposure to Aerosol Particles," Toxics, vol. 10, no. 7, Jul. 2022, doi: 10.3390/toxics10070405.
- [15] C. Lu et al., "Substantial emissions of nitrated aromatic compounds in the particle and gas phases in the waste gases from eight industries," Environmental Pollution, vol. 283, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.envpol.2021.117132.
- [16] A. E. Abdrabouh, A. E. Hagra, N. M. Essam, and M. I. El-Gammal, "Related health hazards with occupational exposure to cadmium and lead during spray painting in car and furniture workshops," Journal of Environmental Sciences, vol. 52, no. 3, pp. 1–8, 2023, [Online]. Available: <http://joese.journals.ekb.eg>
- [17] R. S et al., "Analysis of blood lead level and its clinical significance among occupational exposed painters in chennai based population: A cross sectional study," Journal of Trace Elements in Medicine and Biology, vol. 79, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.jtemb.2023.127257.
- [18] A. M. Monsalve-Lancheros, N. C. González-Rincón, M. Ibáñez-Pinilla, and S. Ramírez-Clavijo, "Telomere length and chromosomal fragility increase in car painters exposed to organic solvents," J. King Saud Univ. Sci., vol. 34, no. 8, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.jksus.2022.102359.
- [19] Enrico Bergamaschi, Giacomo Garzaro, Valeria Bellisario, Manuela Macri, and Martina Buglisi, "A Biomonitoring Pilot Study in Workers from a Paints Production Plant Exposed to Pigment-Grade Titanium Dioxide (TiO₂)," Toxics, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/toxics10040171>.
- [20] W. H. Cheng, H. L. Huang, and M. H. Chuang, "Use of passive SPME sampling devices to determine exposure of oil painters to organic compounds," J. Air Waste Manage. Assoc., vol. 70, no. 3, pp. 253–259, Mar. 2020, doi:

10.1080/10962247.2019.1694090.

- [21] H. Hasylin, K. H. Abdul-Mumin, P. K. Pg-Hj-smail, A. Trivedi, and K. N. Win, "A Preliminary Assessment of Health and Safety in the Automobile Industry in Brunei Darussalam: Workers' Knowledge and Practice of Organic Solvents," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 19, no. 23, Dec. 2022, doi: 10.3390/ijerph192315469.
- [22] W. H. Cheng and N. Y. Chen, "Abnormal Respiratory Symptoms of Workers and Sampling of Organic Vapors Using Solid-phase Microextraction Devices in a Golf Ball Manufacturing Factory," *Aerosol Air Qual. Res.*, vol. 22, no. 9, Sep. 2022, doi: 10.4209/aaqr.220087.
- [23] N. Lothrop et al., "Studying full-shift inhalation exposures to volatile organic compounds (VOCs) among Latino workers in very small-sized beauty salons and auto repair shops," *Front. Public Health*, vol. 11, 2023, doi: 10.3389/fpubh.2023.1300677.
- [24] A. L. Ana Ferreira, "Occupational exposure to particles and air pollutants in a car paint workshop," *Eur. J. Public Health*, 2021.
- [25] Y. Zhang et al., "Quantifying metallic components in aerosol filter samples using micro-synchrotron radiation X-ray fluorescence: With quartz filter as an example," *Atmos. Environ.*, vol. 318, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.atmosenv.2023.120205.
- [26] C. Chen, F. Liu, S. Liu, J. Liu, D. Lai, and Q. Chen, "A novel method for designing general and local ventilation systems for a manufacturing plant," *Energy Build.*, vol. 299, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.enbuild.2023.113612.
- [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] O. J. Onyebuchi, O. I. Emmanuel, N. O. Uzoma, and E. S. Ikechukwu, "Generational impact of exposure to volatile organic compounds from automobile paint spray on reproductive hormonal response in Wistar rats from parents to their filial generation (F1)," *Journal of Hazardous Materials Advances*, vol. 18, May 2025, doi: 10.1016/j.hazadv.2025.100675.
- [29] J. B. Sørli, M. Frederiksen, N. G. Nikolov, E. B. Wedebye, and N. Hadrup, "Identification of substances with a carcinogenic potential in spray-formulated engine/brake cleaners and lubricating products, available in the European Union (EU) – based on IARC and EU-harmonised classifications and QSAR predictions," *Toxicology*, vol. 477, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.tox.2022.153261.
- [30] S. Ghobakhloo, A. H. Khoshakhlagh, S. Morais, and A. Mazaheri Tehrani, "Exposure to Volatile Organic Compounds in Paint Production Plants: Levels and Potential Human Health Risks," *Toxics*, vol. 11, no. 2, Feb. 2023, doi: 10.3390/toxics11020111.
- [31] Z. Ding et al., "Hybrid Cellulose-Based Systems for Triboelectrification in Aerosol Filtration, Ammonia Abatement and Respiration Monitoring," *Adv. Funct. Mater.*, vol. 34, no. 19, May 2024, doi: 10.1002/adfm.202313790.
- [32] L. Mwai, J. Onyatta, and F. H. Were, "Lead content in automotive paints purchased at formal and informal outlets in Kenya," *Heliyon*, vol. 9, no. 1, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e12831.
- [33] 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.
- [34] N. Hadrup et al., "Asthma-inducing potential of 28 substances in spray cleaning products—Assessed by quantitative structure activity relationship (QSAR) testing and literature review," Jan. 01, 2022, John Wiley and Sons Ltd. doi: 10.1002/jat.4215.
- [35] P. Pandey and U. V. Kiran, "Exposure to paints and respiratory health ailments among painting workers," *Cogent Eng.*, vol. 10, no. 1, 2023, doi: 10.1080/23311916.2023.2185936.
- [36] Z. Mo, S. Lu, and M. Shao, "Volatile organic compound (VOC) emissions and health risk assessment in paint and coatings industry in the Yangtze River Delta, China," *Environmental Pollution*, vol. 269, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.envpol.2020.115740.
- [37] M. Y. Song and H. Chun, "Species and characteristics of volatile organic compounds emitted from an auto-repair painting workshop," *Sci. Rep.*, vol. 11, no. 1, Dec. 2021, doi: 10.1038/s41598-021-96163-4.
- [38] A. M. Jiménez-López and G. A. Hincapié-Llanos, "Identification of factors affecting the reduction of VOC emissions in the paint industry: Systematic literature review - SLR," *Prog. Org. Coat.*, vol. 170, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.porgcoat.2022.106945.
- [39] Q. Wang, J. Liu, J. Liu, and J. Li, "Experimental research on the impact of annular airflow on the spraying flow field: A source control technology of paint mist," *Build. Environ.*, vol. 207, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.buildenv.2021.108444.
- [40] Roberto Hernández Sampieri, "Metodología de la investigación," p. 634, 2014.
- [41] César A. Bernal, "Metodología de la investigación," p. 322, 2010.
- [42] "Safety data sheet," 2019.
- [43] "Standocryl 2K PREMIUM CLEAR 4024669162523 (CHEMTREC)-800-424-9300 FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD Identificador de producto."
- [44] Axalta Coating Systems, "Ficha de datos de seguridad," 2024.
- [45] OSHA, "OSHA Technical Manual (OTM) Section III: Chapter 3 Ventilation Investigation," Occupational Safety and Health Administration. Accessed: May 16, 2025. [Online]. Available: <https://www.osha.gov/otm/section-3-health-hazards/chapter-3>
- [46] L. Molina and J. Almeida, "Diseño de un sistema para recolección de partículas de pintura," 2014.
- [47] Olazo Esteban and Palacios Gladys, "Propuesta de mejora para el proceso de planchado y pintura para incrementar la productividad en la empresa Autonort Cajamarca S.A.C.," 2018.