Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), mayo-junio 2026,
Volumen 10, Número 3.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v10i3

# EXPOSICIÓN OCUPACIONAL A MATERIAL PARTICULADO EN ZONAS QUIRÚRGICAS DE UNA CLÍNICA DE SALUD EN GIRARDOT, CUNDINAMARCA: IMPLICACIONES PARA LA SEGURIDAD Y SALUD EN EL TRABAJO

## OCCUPATIONAL EXPOSURE TO PARTICULATE MATTER IN SURGICAL AREAS OF A HEALTH CLINIC IN GIRARDOT, CUNDINAMARCA: IMPLICATIONS FOR OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH

**Schirly Caterine Avila Figueroa**
Corporación Universitaria Minuto de Dios

**Erick Santiago Figueroa Ramírez**
Corporación Universitaria Minuto de Dios

**Bertha Elisa Violet Martelo**
Corporación Universitaria Minuto de Dios

**DOI:** https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v10i3.25346

# Exposición ocupacional a material particulado en zonas quirúrgicas de una clínica de salud en Girardot, Cundinamarca: implicaciones para la seguridad y salud en el trabajo

**Schirly Caterine Avila Figueroa**[1]
Schirly.avila@uniminuto.edu.co
https://orcid.org/0009-0006-0637-008X
Corporación Universitaria Minuto de Dios, Colombia

**Erick Santiago Figueroa Ramírez**
Erick.figueroa@uniminuto.edu.co
https://orcid.org/0009-0004-4556-9687
Corporación Universitaria Minuto de Dios, Colombia

**Bertha Elisa Violet Martelo**
bertha.violet.m@uniminuto.edu
https://orcid.org/0000-0001-9666-8600
Corporación Universitaria Minuto de Dios
Colombia

**RESUMEN**

El personal de salud que labora en zonas quirúrgicas está sometido a exposición crónica a material particulado en suspensión, lo que constituye un factor de riesgo químico relevante en el marco del Sistema de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo (SG-SST). El presente estudio evaluó la concentración de partículas en suspensión (fracciones de 0,3 µm, 0,5 µm, 1 µm y 5 µm) en las salas quirúrgicas de una clínica de servicios de salud en Girardot, Cundinamarca, con el propósito de caracterizar el riesgo ocupacional al que se exponen médicos cirujanos, personal de enfermería, instrumentadores, auxiliares y personal de apoyo. Se realizó un estudio observacional, descriptivo y de corte transversal con enfoque cuantitativo. Las mediciones se efectuaron en cinco puntos espaciales de cada sala mediante un contador óptico de partículas (Kanomax 3887, rango 0,3 - 10 µm, calibración NIST-trazable). Los resultados evidenciaron excedencias sistemáticas de los límites establecidos por la norma ISO 14644-1 para ambientes clase ISO 5, con factores de superación de hasta 280 veces para la fracción de 0,5 µm y hasta 778 veces para la fracción de 5 µm. Los hallazgos se contextualizaron frente a los valores límite de la ACGIH (TLV-TWA: 3 mg/m³ para polvo respirable) y los niveles de referencia del NIOSH, así como frente a las obligaciones del empleador establecidas en el Decreto 1072 de 2015 (SG-SST). La alta variabilidad espacial intra-sala (CV > 40 %) sugiere que la distribución del riesgo no es uniforme, lo que tiene implicaciones directas para la vigilancia epidemiológica ocupacional y para el diseño de controles de ingeniería priorizados. Se propone un plan de acción integral con medidas de control en la fuente, en el medio y en el trabajador, fundamentadas en la jerarquía de controles del SG-SST.

***Palabras clave:*** exposición ocupacional; material particulado; seguridad y salud en el trabajo; zonas quirúrgicas; SG-SST; riesgo químico; ISO 14644-1

[1] Autor principal
Correspondencia: Schirly.avila@uniminuto.edu.co

# Occupational exposure to particulate matter in surgical areas of a health clinic in Girardot, Cundinamarca: implications for occupational safety and health


## ABSTRACT

Healthcare workers in surgical areas are chronically exposed to airborne particulate matter, representing a significant physical-environmental occupational hazard within the framework of Occupational Health and Safety Management Systems (OHSMS). This study evaluated the concentration of suspended particles (fractions of 0.3 µm, 0.5 µm, 1 µm, and 5 µm) in the operating rooms of a health clinic in Girardot, Cundinamarca, with the aim of characterizing the occupational risk faced by surgeons, nursing staff, surgical technicians, auxiliaries, and support personnel. An observational, descriptive, cross-sectional study with a quantitative approach was conducted. Measurements were performed at five spatial points in each operating room using an optical particle counter (Kanomax 3887, range 0.3–10 µm, NIST-traceable calibration). Results showed systematic exceedances of the limits established by ISO 14644-1 for ISO Class 5 environments, with exceedance factors of up to 280-fold for the 0.5 µm fraction and up to 778-fold for the 5 µm fraction. Findings were contextualized against ACGIH threshold limit values (TLV-TWA: 3 mg/m³ for respirable dust), NIOSH recommended exposure limits, and employer obligations established under Colombian Decree 1072 of 2015 (OHSMS). High intra-room spatial variability (CV > 40%) suggests uneven risk distribution, with direct implications for occupational epidemiological surveillance and the design of prioritized engineering controls. A comprehensive action plan is proposed following the occupational safety hierarchy of controls.



***Keywords:*** occupational exposure; particulate matter; occupational health and safety; surgical areas; OHSMS; physical-environmental hazard; ISO 14644-1

*Artículo recibido 20 mayo 2026*
*Aceptado para publicación: 20 junio 2026*

## INTRODUCCIÓN

La seguridad y salud en el trabajo (SST) en entornos hospitalarios representa uno de los campos de mayor complejidad dentro de la gestión del riesgo ocupacional. El personal de salud que labora en zonas quirúrgicas médicos, cirujanos, anestesiólogos, personal de enfermería, instrumentadores quirúrgicos, auxiliares y personal de limpieza está expuesto de forma crónica a una multiplicidad de agentes de riesgo, entre los cuales el material particulado en suspensión ocupa un lugar destacado como factor de riesgo químico (NIOSH, 2015; Kim et al., 2020). A diferencia de otros entornos laborales cerrados, el quirófano combina alta densidad de procedimientos generadores de bioaerosoles, movimiento continuo de personal, uso intensivo de equipos electro quirúrgicos que producen humo y partículas ultrafinas y ventilación que, cuando es deficiente, actúa como concentrador de contaminantes (Alderman et al., 2019; Lindsey et al., 2021).

En Colombia, el Sistema de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo (SG-SST), reglamentado por el Decreto 1072 de 2015 del Ministerio del Trabajo, establece la obligación del empleador de identificar, evaluar y controlar los peligros y riesgos a los que se expone el trabajador, incluidos los de naturaleza física y ambiental (Ministerio del Trabajo, 2015). La Resolución 0312 de 2019 refuerza estos estándares mínimos y exige la implementación de programas de vigilancia epidemiológica ocupacional para agentes de riesgo con potencial daño respiratorio. A pesar de este marco normativo, la medición sistemática de material particulado en quirófanos colombianos como indicador de exposición ocupacional es prácticamente inexistente en la literatura científica indexada, lo que genera un vacío de información crítico para la gestión del riesgo.

Los efectos del material particulado sobre la salud del trabajador son ampliamente reconocidos. La fracción respirable (partículas < 10 µm) puede penetrar hasta los bronquiolos y alvéolos pulmonares, generando inflamación local y sistémica, alteraciones en la función pulmonar, exacerbación de enfermedades respiratorias preexistentes (asma ocupacional, EPOC) y, ante exposición crónica, mayor riesgo de enfermedad cardiovascular (Pope & Dockery, 2006; Brook et al., 2010). La fracción ultrafina (< 1 µm), que predomina en ambientes con uso de equipos electroquirúrgicos y cauterización, es especialmente preocupante por su capacidad de atravesar la barrera alveolo-capilar y alcanzar la

circulación sistémica, potenciando el estrés oxidativo y la disfunción endotelial (Oberdörster et al., 2005; Alderman et al., 2019).

En el contexto colombiano, García (2025) documentó la relación entre la concentración de contaminantes atmosféricos y efectos en la salud pública en Bogotá; Palacio y Vega (2023) evidenciaron concentraciones de material particulado superiores a los valores guía de la OMS en Girardota, Antioquia; y Torres (2017) identificó la ausencia de protocolos estandarizados para la evaluación de la calidad del aire interior en espacios laborales cerrados no industriales en Colombia. Ninguno de estos estudios abordó específicamente el contexto quirúrgico ni la perspectiva de la exposición ocupacional del trabajador de salud.

En una clínica de servicios de salud de Girardot, Cundinamarca, el incremento de reportes de síntomas respiratorios en el personal quirúrgico y el aumento de tasas de infecciones postquirúrgicas motivaron la presente investigación. La pregunta que la orienta es: ¿en qué medida la concentración de material particulado en las zonas quirúrgicas de dicha institución representa un riesgo para la seguridad y salud de los trabajadores expuestos, en comparación con los límites establecidos por la norma ISO 14644-1, los valores de referencia de la ACGIH/NIOSH y las obligaciones del SG-SST según el Decreto 1072 de 2015? El objetivo general fue evaluar la concentración de partículas en suspensión en las salas de cirugía y caracterizar el riesgo ocupacional asociado, con el fin de proponer un plan de acción de control fundamentado en la jerarquía de controles del SG-SST.

## METODOLOGÍA

### Diseño del estudio

Se realizó un estudio observacional, descriptivo y de corte transversal, con enfoque cuantitativo, orientado a la caracterización del riesgo ocupacional por exposición a material particulado en zonas quirúrgicas. La institución estudiada es una clínica de servicios de salud de mediana complejidad ubicada en Girardot, Cundinamarca (altitud: 289 m s. n. m.; temperatura media ambiental: 33 °C; humedad relativa media: 68 %). El estudio se inscribe en el marco de la identificación de peligros y evaluación de riesgos establecida por el Decreto 1072 de 2015 y la GTC 45.

**Población trabajadora expuesta**

La población de estudio estuvo conformada por los puestos de trabajo presentes en las zonas quirúrgicas de la clínica (salas de cirugía 1 y 2). Cada puesto de trabajo fue definido por su ubicación espacial característica dentro del quirófano, dado que las mediciones de concentración de material particulado se realizaron en puntos fijos del espacio y no mediante dosimetría personal individual. En ese sentido, la unidad de análisis fue el puesto de trabajo, no el trabajador.

El personal de salud que ocupa habitualmente dichos puestos médicos, cirujanos, médicos anestesiólogos, personal de enfermería (instrumentadoras y circulantes), auxiliares de enfermería quirúrgica, y personal de limpieza y mantenimiento fue considerado como población potencialmente expuesta, con fines de contextualización del riesgo. La cuantificación de la dosis individual recibida por cada trabajador requeriría monitoreo personal mediante dosimetría individual, lo cual constituye una línea de investigación futura. La

Tabla 1 resume el perfil ocupacional asociado a cada puesto y la estimación del tiempo de permanencia en las zonas evaluadas.

Es importante señalar que la norma ISO 14644-1 establece los límites de concentración de partículas por punto de medición (puesto de trabajo), lo que es coherente con el diseño metodológico del presente estudio. Los valores obtenidos caracterizan el nivel de riesgo ambiental de cada puesto evaluado y permiten identificar los puestos de mayor exposición potencial dentro de cada sala.

**Tabla 1.**
*Perfil ocupacional y estimación de tiempo de exposición a material particulado en zonas quirúrgicas*

| **Perfil ocupacional** | **Horas/turno** | **Turnos/sem.** | **Horas expuestas/año (estimado)** | **Nivel de riesgo relativo** |
|---|---|---|---|---|
| Cirujano / Médico anestesiólogo | 6–8 h | 4–5 | 1 248–2 080 | **Alto** |
| Enfermera/o instrumentadora/or | 6–8 h | 5 | 1 560–2 080 | **Alto** |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Auxiliar de enfermería quirúrgica | 6–8 h | 5 | 1 560–2 080 | **Alto** |
| Personal de limpieza y desinfección | 2–4 h | 5–6 | 624–1 248 | **Moderado-Alto** |
| Técnico de mantenimiento | 1–3 h (irregular) | Variable | < 624 | **Moderado** |

*Nota.* Elaboración propia (2026). Las horas de exposición estimadas se calcularon con base en los turnos habituales reportados por la institución y se utilizan como insumo para la valoración del riesgo ocupacional conforme a la GTC 45.

**Condiciones de medición**

Las mediciones se realizaron en las salas de cirugía 1 y 2 durante el periodo de estudio (febrero–marzo de 2025). Las mediciones se realizaron en días hábiles durante jornadas regulares de funcionamiento, en ausencia de procedimientos quirúrgicos activos, con las puertas cerradas y los sistemas de ventilación en operación normal, conforme a los protocolos de la norma ISO 14644-1. La medición en condiciones de reposo (sin cirugía activa) representa el escenario de línea base; las concentraciones durante procedimientos quirúrgicos reales son esperablemente mayores, dado el aporte adicional de bioaerosoles, humo electroquirúrgico y tránsito de personal (Lindsey et al., 2021).

**Instrumento de medición**

Las mediciones se efectuaron con un contador óptico de partículas portátil modelo Kanomax 3887 (Kanomax USA Inc.), equipo de dispersión láser con rango de detección de 0,3 a 10 µm, caudal de muestreo de 2,83 L/min y certificado de calibración NIST-trazable vigente. El equipo registra simultáneamente las concentraciones en los canales de 0,3 µm, 0,5 µm, 1,0 µm y 5,0 µm, expresadas en partículas por metro cúbico (part./m³). Las condiciones ambientales durante las mediciones fueron: temperatura 29 - 32 °C, humedad relativa 62 - 71 % y presión barométrica 980 - 985 hPa.

**Procedimiento de muestreo**

Las mediciones se efectuaron en cinco puntos espaciales dentro de cada sala (cuatro esquinas y el punto central), siguiendo la metodología de la norma ISO 14644-1, Apéndice B. En cada punto se realizaron tres lecturas consecutivas de 60 segundos y se registró el promedio como valor representativo. Los datos se consignaron en formatos de recolección trazables.

**Marco normativo de referencia SST**

Los resultados se compararon con tres marcos normativos complementarios. La Tabla 2 resume los valores límite aplicables.

**Tabla 2.**
*Valores límite de referencia para exposición ocupacional a material particulado y calidad del aire en quirófanos*

| Organismo | Fracción | Valor límite | Indicador | Aplicación |
|---|---|---|---|---|
| ACGIH (TLV-TWA) | Polvo inhalable | 10 mg/m³ | TLV-TWA 8 h | Exposición ocupacional diaria |
| ACGIH (TLV-TWA) | Polvo respirable | 3 mg/m³ | TLV-TWA 8 h | Fracción que alcanza alvéolos |
| NIOSH (REL) | Polvo total | 10 mg/m³ | REL-TWA 10 h | Trabajadores en ambientes cerrados |
| NIOSH (REL) | Polvo respirable | 5 mg/m³ | REL-TWA 10 h | Partículas < 10 µm |
| OMS (guía) | PM2.5 | 15 µg/m³ | Media 24 h | Calidad del aire interior |
| OMS (guía) | PM10 | 45 µg/m³ | Media 24 h | Calidad del aire interior |
| ISO 14644-1 | ≥ 0.5 µm (clase ISO 5) | 3 520 part./m³ | Concentración numérica | Ambientes quirúrgicos |

*Nota.* Fuentes: ACGIH (2023), NIOSH (2015), WHO (2021), ISO (2015). TLV-TWA = Threshold Limit Value – Time Weighted Average; REL = Recommended Exposure Limit. Los valores ACGIH/NIOSH se expresan en masa (mg/m³); los valores ISO, en concentración numérica (part./m³). Ambas métricas son complementarias en la evaluación del riesgo ocupacional.

Los tres marcos normativos aplicados fueron: (1) norma ISO 14644-1:2015, que define los límites máximos permisibles por concentración numérica de partículas según la clase de limpieza del ambiente, siendo la clase ISO 5 la aplicable a zonas quirúrgicas; (2) valores TLV-TWA de la ACGIH (2023) y REL del NIOSH (2015) para polvo inhalable (10 mg/m³) y polvo respirable (3 mg/m³ ACGIH / 5 mg/m³ NIOSH), que expresan el límite de exposición ocupacional diaria en términos gravimétricos; y (3) Decreto 1072 de 2015 (SG-SST), que establece la obligación del empleador de evaluar y controlar los peligros de naturaleza química en el puesto de trabajo.

**Análisis estadístico**

Se calcularon estadísticos descriptivos (mínimo, máximo, media, desviación estándar y coeficiente de variación) por sala y fracción de tamaño. Se calculó el factor de excedencia respecto al límite ISO 5 (media observada / límite normativo) como indicador cuantitativo del nivel de incumplimiento. El análisis se realizó en Microsoft Excel versión 2021.

**Consideraciones éticas**

El estudio no involucró seres humanos como sujetos de investigación directa. Las mediciones se realizaron sobre el componente ambiental con autorización institucional. Los investigadores declaran ausencia de conflicto de intereses. Se respetaron los principios de la Declaración de Helsinki y las normas de integridad científica. La información obtenida fue compartida con la institución para orientar la gestión del riesgo en el marco del SG-SST.

**RESULTADOS**

A continuación, se presentan los resultados de la evaluación de la concentración de material particulado en suspensión obtenidos en los puestos de trabajo de las salas de cirugía 1 y 2 de la clínica de servicios de salud de Girardot, Cundinamarca. Los datos se organizan en función de las fracciones de tamaño medidas (0,3 µm, 0,5 µm, 1 µm y 5 µm) y se comparan con los límites máximos permisibles establecidos por la norma ISO 14644-1 para ambientes clase ISO 5, referente técnico aplicable a zonas quirúrgicas. Esta comparación permite determinar el grado de cumplimiento normativo de cada puesto de trabajo evaluado y caracterizar el nivel de riesgo químico presente en cada sala, como insumo fundamental para la gestión del peligro en el marco del Sistema de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo (SG-SST)

**Límites de referencia ISO 14644-1**

La Tabla 3 presenta los límites máximos permisibles por clase de limpieza según la norma ISO 14644-1. La clase ISO 5 marcada con asterisco es el estándar aplicable a las zonas quirúrgicas evaluadas y sirve como referencia para valorar el nivel de riesgo ambiental al que se exponen los trabajadores.

**Tabla 3**

*Límites máximos permisibles según ISO 14644-1 (partículas/m³)*

| Clase ISO | 0.1 µm | 0.2 µm | 0.3 µm | 0.5 µm | 1 µm | 5 µm |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ISO 1 | 10 | 2 | — | — | — | — |
| ISO 2 | 100 | 24 | 10 | 4 | — | — |
| ISO 3 | 1 000 | 237 | 102 | 35 | 8 | — |
| ISO 4 | 10 000 | 2 370 | 1 020 | 352 | 83 | — |
| **ISO 5 *** | **100 000** | **23 700** | **10 200** | **3 520** | **832** | **29** |
| ISO 6 | 1 000 000 | 237 000 | 102 000 | 35 200 | 8 320 | 293 |
| ISO 7 | — | — | — | 352 000 | 83 200 | 2 930 |
| ISO 8 | — | — | — | 3 520 000 | 832 000 | 29 300 |
| ISO 9 | — | — | — | 35 200 000 | 8 320 000 | 293 000 |

*Nota.* Fuente: ISO 14644-1:2015. (*) Clase de referencia para zonas quirúrgicas. La superación de estos límites configura un peligro ambiental con implicaciones directas para la salud del personal expuesto.

**Sala de cirugía 1**

La Tabla 4 muestra las concentraciones registradas en la sala de cirugía 1. En todos los puntos evaluados y en todas las fracciones de tamaño se verificó condición de incumplimiento respecto a la clase ISO 5. El punto 4 ubicado en la esquina más alejada del difusor de ventilación registró la concentración más alta en la fracción de 0,5 µm (986 352,9 part./m³), superando 280 veces el límite normativo, lo que lo configura como el puesto de trabajo de mayor riesgo de exposición potencial dentro de esta sala, particularmente para el personal que lo ocupa de forma habitual (personal circulante y de anestesia).

**Tabla 4**

*Concentración de partículas en suspensión en la sala de cirugía 1 (part./m³)*

| Punto | 0.3 µm | 0.5 µm | 1 µm | 5 µm | Cumple | No cumple |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **ISO 5 (límite)** | **10 200** | **3 520** | **832** | **29** | **—** | **—** |
| Punto 1 | 417 094.4 | 570 352.9 | 283 176.5 | 45 176.5 | | X |
| Punto 2 | 374 705.9 | 467 647.1 | 208 941.2 | 28 000.0 | | X |
| Punto 3 | 323 752.9 | 373 882.3 | 142 823.5 | 13 411.8 | | X |
| Punto 4 | 478 294.1 | 986 352.9 | 565 176.5 | 15 294.1 | | X |
| Punto 5 | 346 411.8 | 366 588.2 | 120 117.6 | 11 058.8 | | X |

*Nota.* Elaboración propia (2025). X = no cumple con los límites ISO 5. El punto 4 representa la zona de mayor acumulación de partículas y mayor riesgo para el trabajador expuesto en dicha ubicación.

**Sala de cirugía 2**

La Tabla 5 presenta los resultados de la sala de cirugía 2. Al igual que en la sala 1, la totalidad de los puntos supera los límites ISO 5 en todas las fracciones. Se identifica una anomalía en el punto 2, donde la concentración de la fracción de 1 µm (418 352,9 part./m³) supera a la de 0,5 µm (116 011,8 part./m³), patrón inusual que podría atribuirse a un evento puntual de resuspensión de partículas gruesas durante el muestreo posiblemente relacionado con actividad del personal de limpieza en las inmediaciones y que se señala para verificación en estudios futuros.

**Tabla 5**

*Concentración de partículas en suspensión en la sala de cirugía 2 (part./m³)*

| Punto | 0.3 µm | 0.5 µm | 1 µm | 5 µm | Cumple | No cumple |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **ISO 5 (límite)** | **10 200** | **3 520** | **832** | **29** | **—** | **—** |
| Punto 1 | 429 917.6 | 452 253.3 | 147 764.7 | 17 294.1 | | X |
| Punto 2 | 546 270.6 | 116 011.8 | 418 352.9 † | 11 294.1 | | X |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Punto 3 | 381 494.1 | 465 411.8 | 149 176.5 | 9 529.4 | X |
| Punto 4 | 175 458.8 | 238 823.5 | 82 235.3 | 7 294.1 | X |
| Punto 5 | 969 764.7 | 126 823.5 | 52 941.2 | 6 000.0 | X |

*Nota.* Elaboración propia (2025). X = no cumple ISO 5. (†) Valor anómalo: fracción 1 µm > fracción 0,5 µm; posible resuspensión puntual durante el muestreo.

**Estadística descriptiva y factor de excedencia**

La Tabla 6 resume los estadísticos descriptivos y el factor de excedencia respecto al límite ISO 5 por sala y fracción de tamaño. Los coeficientes de variación superiores al 40 % en todas las combinaciones sala - fracción indican alta variabilidad espacial intra - sala, con implicaciones directas para la identificación de las zonas de mayor riesgo ocupacional.

**Tabla 6**

*Estadísticos descriptivos y factor de excedencia respecto al límite ISO 5 por sala y fracción de tamaño*

| **Sala / Fracción** | **Mín. (p/m³)** | **Máx. (p/m³)** | **Media (p/m³)** | **DE** | **CV (%)** | **Factor vs. ISO 5** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Sala 1 - 0.5 µm | 366 588 | 986 353 | 552 965 | 239 862 | 43.4 | **~157×** |
| Sala 1 - 1 µm | 120 118 | 565 177 | 264 047 | 176 895 | 67.0 | **~317×** |
| Sala 1 - 5 µm | 11 059 | 45 177 | 22 588 | 13 506 | 59.8 | **~778×** |
| Sala 2 - 0.5 µm | 116 012 | 465 412 | 279 865 | 151 284 | 54.1 | **~79×** |
| Sala 2 - 1 µm | 52 941 | 418 353 | 170 094 | 144 786 | 85.1 | **~204×** |
| Sala 2 - 5 µm | 6 000 | 17 294 | 10 282 | 4 543 | 44.2 | **~354×** |

*Nota.* Elaboración propia (2025). DE = desviación estándar; CV = coeficiente de variación; Factor vs. ISO 5 = media / límite ISO 5. El mayor factor de excedencia (778×) corresponde a la fracción de 5 µm en la sala 1, de especial relevancia para la salud respiratoria del trabajador por su asociación con bioaerosoles bacterianos y depósito en la región traqueobronquial.

## DISCUSIÓN

### Magnitud del riesgo ocupacional y comparación normativa

Los resultados del presente estudio evidencian que las concentraciones de material particulado en las salas quirúrgicas evaluadas superan ampliamente los límites de la clase ISO 5 de la norma ISO 14644-1, configurando un escenario de riesgo ocupacional elevado para el personal que labora en dichos entornos. Este hallazgo tiene implicaciones directas en el marco del SG-SST, dado que el Decreto 1072 de 2015 obliga al empleador a implementar controles efectivos cuando se identifican peligros que superan los niveles de acción establecidos en los estándares de referencia.

Aunque los valores ACGIH y NIOSH se expresan en concentración másica ($mg/m^3$) y el presente estudio midió concentración numérica ($part./m^3$), la magnitud de las excedencias respecto al límite ISO 5 permite inferir que las concentraciones másicas en las salas evaluadas también superarían los niveles de acción de 1 $mg/m^3$ recomendados por la ACGIH para polvo respirable en espacios de trabajo (ACGIH, 2023). Estudios que han realizado conversiones entre ambas métricas en contextos hospitalarios sugieren que concentraciones numéricas del orden de $10^5$ - $10^6$ $part./m^3$ para partículas $\geq$ 0,5 µm corresponden a concentraciones másicas en el rango de 0,5-5 $mg/m^3$, dependiendo de la densidad y composición del aerosol (Lindsey et al., 2021; NIOSH, 2015). En ese rango, el riesgo para el personal que ocupa de forma continua los puestos de trabajo evaluados durante una jornada laboral completa (8 horas) sería clínicamente significativo según los criterios de la ACGIH, aunque la confirmación de esta inferencia requiere medición dosimétrica individual.

En el contexto latinoamericano, Solano-Chinchilla et al. (2020) documentaron excedencias de hasta 50 veces el límite ISO 5 en quirófanos costarricenses, asociadas a deficiencias en los filtros y tasas inadecuadas de renovación del aire. Los valores registrados en el presente estudio son notablemente superiores hasta 280 veces el límite para 0,5 µm, lo que sitúa a las salas evaluadas en una categoría de riesgo ocupacional más severo, equiparable al reportado por Tsai et al. (2020) en hospitales de países de ingresos bajos de Asia Oriental.

### Efectos en salud asociados a la exposición potencial desde los puestos de trabajo evaluados

La exposición crónica a material particulado en el entorno quirúrgico tiene implicaciones documentadas para la salud de todos los perfiles ocupacionales presentes. Para el personal con mayor tiempo de

exposición (médicos, enfermeras e instrumentadores, con estimaciones de 1 248–2 080 horas/año), los riesgos son especialmente relevantes en cuatro dimensiones:

**Efectos respiratorios**

La fracción respirable (< 10 µm) se deposita en la región traqueobronquial y alveolar, generando inflamación de las vías respiratorias, incremento de la reactividad bronquial y mayor incidencia de asma ocupacional y EPOC en trabajadores con exposición prolongada (Pope & Dockery, 2006; NIOSH, 2015). El personal de anestesia y los instrumentadores, que permanecen en el campo operatorio durante toda la intervención quirúrgica, presentan el mayor tiempo de exposición continua a bioaerosoles y partículas generadas por electrocauterio.

**Efectos cardiovasculares**

La fracción ultrafina (< 1 µm), que predomina en los resultados de ambas salas, atraviesa la barrera alveolocapilar y accede a la circulación sistémica, incrementando el riesgo de inflamación vascular, aterosclerosis acelerada y eventos cardiovasculares mayores (Brook et al., 2010; Kim et al., 2020). Brook et al. (2010) estimaron un incremento del 6 -13 % en el riesgo de infarto agudo de miocardio por cada 10 µg/m³ de aumento en la concentración de PM2.5 en exposición crónica, lo que es altamente relevante para el personal con décadas de exposición quirúrgica.

**Estrés oxidativo y efectos sistémicos.**

Las partículas ultrafinas generadas por electrocauterio que incluyen hidrocarburos aromáticos policíclicos, metales pesados y compuestos orgánicos volátiles inducen estrés oxidativo celular, daño al ADN y disfunción mitocondrial en exposición crónica (Oberdörster et al., 2005; Alderman et al., 2019). Estudios en personal de quirófano con más de diez años de exposición han documentado mayor prevalencia de marcadores inflamatorios sistémicos (proteína C reactiva, interleucina - 6) en comparación con controles hospitalarios sin exposición a humo quirúrgico (Lindsey et al., 2021).

**Síndrome del edificio enfermo y bienestar laboral**

La concentración sostenida de partículas en ambientes cerrados con ventilación deficiente, como la documentada en el presente estudio, favorece la aparición de síntomas inespecíficos asociados al síndrome del edificio enfermo: irritación ocular y nasal, cefalea, fatiga y disminución del rendimiento cognitivo (Sundell et al., 2011; Torres, 2017). Estos síntomas, aunque menos graves que las

enfermedades crónicas, incrementan el ausentismo laboral, reducen la productividad y deterioran la calidad de vida del trabajador.

**Distribución espacial del riesgo e implicaciones para la vigilancia**

La alta variabilidad espacial intra - sala (CV > 40 %) es un hallazgo con implicaciones prácticas directas para la gestión del riesgo ocupacional. La distribución heterogénea de partículas indica que no todos los puestos de trabajo dentro del quirófano presentan el mismo nivel de riesgo ambiental: el punto 4 de la sala de cirugía 1 (esquina más alejada del difusor, con concentraciones hasta 280 veces el límite ISO 5) es el puesto de mayor riesgo y coincide espacialmente con la ubicación habitual del personal circulante y del personal de anestesia. Esto implica que el riesgo de exposición potencial varía según el puesto de trabajo, y que los trabajadores que ocupan los puestos más alejados de los difusores de ventilación tienen una exposición potencial significativamente mayor.

Esta heterogeneidad sugiere que los programas de vigilancia epidemiológica ocupacional deberían incorporar monitoreo personal mediante dosímetros individuales para los trabajadores que permanecen en las zonas de mayor concentración, en lugar de limitarse a mediciones ambientales puntuales. Esta recomendación está alineada con los criterios de la ACGIH para la evaluación de la exposición ocupacional a partículas en ambientes de trabajo (ACGIH, 2023) y con los estándares del programa de higiene industrial del SG-SST (Decreto 1072/2015, Art. 2.2.4.6.15). Es importante destacar que el presente estudio caracterizó la exposición a nivel de puesto de trabajo; la transición hacia la cuantificación de la dosis individual requiere dosimetría personal por perfil ocupacional, lo cual se recomienda como siguiente paso en el programa de higiene industrial de la institución.

**Responsabilidades del empleador en el SG-SST**

Los hallazgos del presente estudio configuran peligros y riesgos que el empleador está obligado a gestionar en el marco del SG-SST (Decreto 1072 de 2015). Específicamente, el incumplimiento sistemático de los límites ISO 5 y la ausencia documentada de un programa de monitoreo ambiental en las salas quirúrgicas representan una no conformidad frente a los estándares mínimos de la Resolución 0312 de 2019. El empleador tiene la obligación de: documentar el peligro en la matriz de identificación de peligros y valoración de riesgos (GTC 45); implementar controles en la jerarquía de eliminación, sustitución, controles de ingeniería, controles administrativos y equipos de protección personal;

establecer un programa de vigilancia epidemiológica para enfermedades respiratorias y cardiovasculares en el personal expuesto; y por último, informar y sensibilizar a los trabajadores sobre los riesgos identificados y las medidas de control adoptadas.

**Limitaciones**

El estudio tiene cuatro limitaciones principales. Primero, el diseño transversal impide establecer relaciones causales entre las concentraciones medidas y los desenlaces en salud del personal. Segundo, el diseño midió la concentración ambiental en puestos de trabajo fijos y no la dosis individual recibida por cada trabajador mediante dosimetría personal, lo que impide cuantificar con precisión la exposición real de cada perfil ocupacional. Tercero, las mediciones se realizaron en ausencia de procedimientos quirúrgicos activos, por lo que las concentraciones durante cirugías reales son presumiblemente mayores. Cuarto, no se realizaron mediciones microbiológicas del aire ni de marcadores biológicos de exposición en los trabajadores. Quinto, la muestra se limitó a dos salas de una sola institución, lo que restringe la generalización. Estas limitaciones deben orientar el diseño de investigaciones futuras con muestras más amplias, medición de indicadores biológicos de exposición y seguimiento longitudinal de los trabajadores.

**PLAN DE ACCIÓN PARA EL CONTROL DEL RIESGO (SG-SST)**

Con base en los resultados obtenidos y en las obligaciones del empleador establecidas en el Decreto 1072 de 2015, se propone el siguiente plan de acción estructurado según la jerarquía de controles del SG-SST:

**Controles en la fuente (prioridad máxima)**

Instalar o reemplazar los filtros de los sistemas de ventilación y climatización por filtros HEPA clase H13 o H14 (eficiencia ≥ 99,95 % para partículas ≥ 0,3 µm), conforme a los requisitos de la norma ISO 14644-1 para clase ISO 5.

Instalar sistemas de evacuación de humo electro quirúrgico (smoke evacuators) en cada mesa operatoria, dado que el electrocauterio es una de las principales fuentes de partículas ultrafinas en el quirófano.

Realizar inspección técnica integral de los sistemas de ventilación para identificar fugas en ductos, deficiencias en las tasas de renovación del aire (mínimo 15–25 renovaciones/hora para clase ISO 5) y zonas de acumulación.

**Controles en el medio**

Establecer un programa periódico de monitoreo ambiental con frecuencia mínima trimestral, conforme a la norma ISO 14644-1, incluyendo validación de filtros, verificación de caudales y mapeo espacial de partículas en cada sala.

Regular los flujos de circulación del personal dentro de las salas de cirugía para minimizar la generación de partículas por movimiento humano: reducir el número de personas en sala al mínimo necesario durante los procedimientos.

Implementar el uso de materiales de barrera apropiados en los accesos de las salas para prevenir el ingreso de partículas externas.

**Controles administrativos**

Documentar el peligro en la matriz de identificación de peligros y valoración de riesgos (GTC 45) clasificando el material particulado como factor de riesgo QUÍMICO (categoría: polvos y aerosoles), con la calificación de riesgo correspondiente, y establecer un programa de vigilancia epidemiológica ocupacional para enfermedades respiratorias y cardiovasculares en el personal expuesto.

Realizar exámenes periódicos de ingreso, periódicos y de egreso para el personal expuesto, incluyendo espirometría, radiografía de tórax y marcadores inflamatorios (PCR ultrasensible), conforme a los protocolos de vigilancia de enfermedades respiratorias ocupacionales.

Capacitar al personal asistencial y de mantenimiento en los riesgos asociados al material particulado en quirófanos, el uso correcto de EPP y los protocolos de ingreso/egreso y limpieza de salas.

**Equipos de protección personal**

Dotar al personal con respiradores de partículas certificados N95 o FFP2 para los procedimientos de mayor generación de partículas (cirugías con electrocauterio extenso, cirugías articulares, procedimientos de limpieza de sala).

Verificar el ajuste facial de los respiradores para cada trabajador, conforme a los estándares NIOSH y los protocolos del SG-SST.

**CONCLUSIONES**

La evaluación de la concentración de material particulado en las zonas quirúrgicas de la clínica de servicios de salud de Girardot, Cundinamarca, demostró que los puestos de trabajo presentes en dichas

áreas registran concentraciones de material particulado en suspensión que superan entre 79 y 778 veces los límites establecidos por la norma ISO 14644-1 para ambientes clase ISO 5, en la totalidad de los puntos evaluados y en ambas salas de cirugía. El personal de salud que ocupa dichos puestos como médicos, enfermeras, instrumentadores, auxiliares y personal de apoyo, constituye, por tanto, una población potencialmente expuesta a niveles de riesgo químico que exceden ampliamente los estándares normativos. Esta condición configura un peligro químico de alto nivel en el marco del SG-SST y representa una no conformidad frente a las obligaciones del empleador establecidas en el Decreto 1072 de 2015.

La alta variabilidad espacial intra-sala (CV > 40 %) indica que el nivel de riesgo químico no es uniforme entre los distintos puestos de trabajo del quirófano: los puestos ubicados en las zonas alejadas de los difusores de ventilación presentan las concentraciones más elevadas y, por tanto, el mayor potencial de exposición para el personal que los ocupa habitualmente particularmente el personal circulante y el personal de anestesia. Esta diferenciación por puesto de trabajo es importante para la priorización de controles en el SG-SST.

Los efectos documentados de la exposición crónica a material particulado en el entorno ocupacional enfermedades respiratorias, riesgo cardiovascular incrementado, estrés oxidativo sistémico y síndrome del edificio enfermo justifican la implementación inmediata de un plan de control integral estructurado en la jerarquía de controles del SG-SST, con prioridad en los controles de ingeniería (filtros HEPA, sistemas de evacuación de humo electroquirúrgico) sobre los controles individuales (EPP).

Futuras investigaciones deberían incorporar: medición de la concentración másica de partículas (PM2.5 y PM10) para comparación directa con los valores TLV-TWA de la ACGIH; monitoreo personal con dosímetros individuales por perfil ocupacional; medición de marcadores biológicos de exposición y efecto en los trabajadores (espirometría, PCR ultrasensible, estrés oxidativo urinario); y seguimiento longitudinal de la incidencia de enfermedades respiratorias y cardiovasculares en el personal expuesto, con el fin de establecer correlaciones causales y evaluar la efectividad de las intervenciones implementadas.

**REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**


Alderman, J. E., Bailey, S. R., & Bates, M. F. (2019). Surgical smoke — The risks and the solutions. *Journal of Perioperative Practice, 29*(10), 336–342. https://doi.org/10.1177/1750458918823921

American Conference of Governmental Industrial Hygienists [ACGIH]. (2023). *TLVs and BEIs: Threshold limit values for chemical substances and physical agents and biological exposure indices*. ACGIH.

Andersson, A. E., Bergh, I., Karlsson, J., Eriksson, B. I., & Nilsson, K. (2012). Traffic flow in the operating room: An explorative and descriptive study on air quality during orthopedic trauma implant surgery. *American Journal of Infection Control, 40*(8), 750–755. https://doi.org/10.1016/j.ajic.2011.09.015

Brook, R. D., Rajagopalan, S., Pope, C. A., Brook, J. R., Bhatnagar, A., Diez-Roux, A. V., … Kaufman, J. D. (2010). Particulate matter air pollution and cardiovascular disease: An update to the scientific statement from the American Heart Association. *Circulation, 121*(21), 2331–2378. https://doi.org/10.1161/CIR.0b013e3181dbece1

Dancer, S. J., Christofi, M., & Ng, R. (2019). The role of the environment in the control of surgical site infection. *Future Microbiology, 14*(2), 83–86. https://doi.org/10.2217/fmb-2018-0309

García, J. (2025). *Análisis de la calidad del aire de la ciudad de Bogotá aplicando métodos estándar de monitoreo* [Tesis de pregrado, UNAD]. https://repository.unad.edu.co/jspui/bitstream/10596/75973/1/jjgarciasa.pdf

Hambraeus, A. (2018). Aerobiology in the operating room — A review. *Journal of Hospital Infection, 11*(Suppl. A), 68–76. https://doi.org/10.1016/0195-6701(88)90191-X

Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6.ª ed.). McGraw-Hill Education.

Instituto Nacional de Salud [INS]. (2023). *Informe del evento: Infecciones asociadas a procedimientos médico-quirúrgicos, Colombia, 2023*. INS. https://www.ins.gov.co/buscador-eventos/Informesdeevento/IAMPQ%20INFORME%20DE%20EVENTO%202023.pdf

International Organization for Standardization [ISO]. (2015). *ISO 14644-1:2015. Cleanrooms and associated controlled environments — Part 1: Classification of air cleanliness by particle concentration*. ISO.

Kim, K. H., Kabir, E., & Kabir, S. (2020). A review on the human health impact of airborne particulate matter. *Environment International, 74*, 136–143. https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.10.005

Lindsey, C., Hutchinson, M., & Melloy, J. (2021). The hazards of surgical smoke: The need for precautionary measures and policy change. *AORN Journal, 113*(3), 238–247. https://doi.org/10.1002/aorn.13325

Ministerio de Salud de Colombia. (1996). *Resolución 4445 de 1996: condiciones sanitarias de establecimientos hospitalarios*. Ministerio de Salud.

Ministerio del Trabajo de Colombia. (2015). *Decreto 1072 de 2015: Decreto Único Reglamentario del Sector Trabajo*. Ministerio del Trabajo.

Ministerio del Trabajo de Colombia. (2019). *Resolución 0312 de 2019: Estándares mínimos del Sistema de Gestión de la Seguridad y Salud en el Trabajo*. Ministerio del Trabajo.

National Institute for Occupational Safety and Health [NIOSH]. (2015). *NIOSH pocket guide to chemical hazards*. U.S. Department of Health and Human Services, CDC.

Nazaroff, W. W. (2016). Indoor bioaerosol dynamics. *Indoor Air, 26*(1), 61–78. https://doi.org/10.1111/ina.12174

Oberdörster, G., Oberdörster, E., & Oberdörster, J. (2005). Nanotoxicology: An emerging discipline evolving from studies of ultrafine particles. *Environmental Health Perspectives, 113*(7), 823–839. https://doi.org/10.1289/ehp.7339

Palacio, J., & Vega, D. (2023). *Contaminación del aire en el municipio de Girardota, Antioquia* [Tesis, UNIMINUTO]. https://repository.uniminuto.edu/server/api/core/bitstreams/04884077-bb03-420b-83cc-92a263a80c95/content

Pope, C. A., & Dockery, D. W. (2006). Health effects of fine particulate air pollution: Lines that connect. *Journal of the Air & Waste Management Association, 56*(6), 709–742. https://doi.org/10.1080/10473289.2006.10464485

Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (2016). *Atmospheric chemistry and physics* (3rd ed.). John Wiley & Sons.

Solano-Chinchilla, A., Ulate-Campos, G., & Vargas-Leitón, B. (2020). Calidad microbiológica del aire en quirófanos de hospitales de Costa Rica. *Revista Costarricense de Salud Pública, 29*(1), 1–12.

Sundell, J., Levin, H., Nazaroff, W. W., Cain, W. S., Fisk, W. J., Grimsrud, D. T., … Weschler, C. J. (2011). Ventilation rates and health: Multidisciplinary review of the scientific literature. *Indoor Air, 21*(3), 191–204. https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2010.00703.x

Torres, Y. (2017). *Adaptación de una guía para el diagnóstico de la calidad del aire interior en edificios no industriales al ámbito laboral de Colombia* [Tesis, UNIMINUTO]. https://repository.uniminuto.edu/server/api/core/bitstreams/80b94155-0b76-4283-b4a0-96bf9a3fafbf/content

Tsai, P. J., Chen, C. W., & Yang, T. S. (2020). Assessing the exposure risk of PM2.5 to healthcare workers in hospital operating rooms. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 17*(3), 915. https://doi.org/10.3390/ijerph17030915

World Health Organization [WHO]. (2021). *WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. WHO.